

PAR JEAN-LOUIS DURVILLE (68)

Conseil général des  
Ponts et Chaussées

# Une **approche probabiliste** pour mieux gérer les **mouvements de terrain**

Les mouvements de terrain, affectant une zone limitée, sont l'aboutissement d'un processus qui peut prendre plusieurs milliers d'années. Peut-on les prévoir et surtout évaluer les conséquences des risques encourus ? L'emploi des probabilités peut-il aider les spécialistes ? Lorsque l'on ne dispose que de très peu d'informations, une analyse déterministe, mise en œuvre par un expert chevronné, permet en général de faire face aux incertitudes de façon satisfaisante. Dans les cas où l'on a collecté suffisamment de données quantitatives, l'approche probabiliste, combinée avec une appréciation des enjeux et de leur vulnérabilité, devient un puissant outil d'aide à la décision.

■ L'expression « mouvements de terrain » regroupe des phénomènes très variés et la terminologie est riche : glissements, éboulements, chutes de blocs, coulées boueuses, fontis, etc., correspondant à différents mécanismes de rupture, différents matériaux (argiles, roches dures, etc.), différentes dynamiques, ou différentes dimensions (de quelques décimètres cubes à plusieurs centaines de millions de mètres cubes). La demande de « probabilisme » et de quantification des risques est de plus en plus pressante, dans le domaine des mouvements de terrain comme pour tous les autres risques. Si l'utilisation des probabilités en génie parasismique ou en hydrologie a déjà une longue histoire, il n'en est pas de même pour ce qui concerne les mouvements de

## Un événement « unique »

Par rapport à d'autres phénomènes naturels, séismes, inondations, avalanches, etc., les mouvements de terrain présentent quelques spécificités : chaque événement affecte une zone limitée, à la différence par exemple d'un séisme qui frappe de vastes régions ; certains événements sont parfaitement identifiés à l'avance, par exemple lorsqu'il s'agit du basculement d'une colonne rocheuse bien individualisée ; d'autres en revanche ne sont pas bien localisés (chutes de pierres le long d'une falaise, par exemple) ; chaque événement est unique, par opposition aux pluies extrêmes, aux crues ou aux avalanches qui peuvent se produire quasiment à l'identique plusieurs fois au même endroit.

terrain. Nous examinons ci-dessous dans quelle mesure l'emploi des probabilités peut aider à répondre aux premières questions posées au spécialiste : quand ? où ? quoi ? Selon la terminologie habituelle des risques naturels, le terme d'aléa désigne l'occurrence du phénomène naturel, le terme de risque incluant les conséquences sur les personnes et sur les biens.

## Le déclenchement d'un mouvement de terrain

Un mouvement de terrain d'origine naturelle est l'aboutissement d'un processus de préparation et de développement de la rupture qui peut prendre plusieurs décennies, plusieurs siècles ou plusieurs milliers d'années. Les mouvements de terrain constituent en effet un des mécanismes de l'érosion qui assure le démantèlement progressif des reliefs. En ce sens, on peut considérer que la mise en mouvement, en un point donné d'un versant,

de tranches successives de terrain (à l'échelle du temps géologique), sous forme de glissements de sol meuble ou d'éboulements rocheux, se produit suivant un *processus de renouvellement* : les dates d'occurrence se répartissent suivant un modèle aléatoire analogue à celui utilisé pour les panes de lampes électriques par exemple, chaque occurrence « ramenant le compteur à zéro ». En effet, le départ d'une portion de terrain met à nu une nouvelle surface, qui va progressivement être dégradée (altération météorique, fatigue mécanique, érosion de pied par un cours d'eau, etc.) jusqu'à ce qu'une nouvelle rupture se produise, et ainsi de suite. Dans ce type de modèle, le « temps d'attente avant rupture » que l'on peut estimer (aujourd'hui et pour un point précis du versant) dépend du stade de mûrissement du processus de dégradation de ce point.

Un cas particulier de processus de renouvellement est le *processus de Poisson*, qui est un processus sans mémoire : dans ce cas, il n'y a pas de dégradation progressive de la situation, et celle-ci n'est pas influencée par le fait que la précédente rupture soit très ancienne ou toute récente. On voit immédiatement que ce modèle, fréquemment employé pour les événements d'origine météorologique (l'absence de mémoire d'une année sur l'autre est le plus souvent admissible), n'est pas bien adapté aux mouvements de terrain.

Si l'on appelle  $p(n)$  la probabilité que la rupture d'une masse rocheuse bien identifiée se produise durant l'année  $n$ , conditionnellement à sa survie jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier de cette année  $n$ , on peut avoir plusieurs types d'évolution de  $p(n)$  avec  $n$ , comme l'indique la figure 1. La courbe 1 représente un processus avec dégradation progressive : érosion du pied d'un versant instable (préparation d'un glissement), dissolution d'un niveau gypseux (préparation d'un effondrement), etc. La courbe 2 représente un processus de Poisson. La courbe 3 schématise le cas d'un site où une protection à effet différé a été mise en place, plantation d'arbres sur un versant, par exemple. Les notions couramment employées de « probabilité annuelle » ou de « fréquence annuelle » de rupture, implicitement considérées comme constantes, n'ont donc de sens que dans le cas du processus de Poisson.



Éboulements en Lozère.

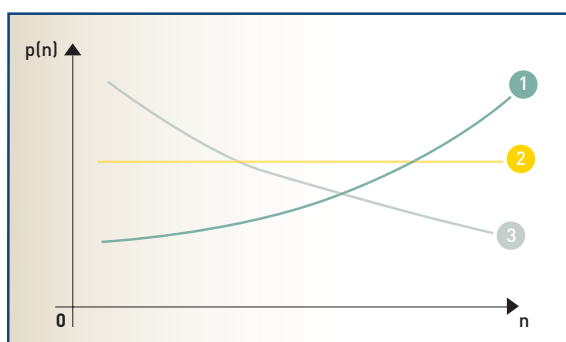


Figure 1 – Évolutions des probabilités de rupture durant l'année  $n$ , conditionnellement à la survie jusqu'à l'année  $n-1$ .

Du point de vue de la gestion du risque, les évolutions de type 1 et 2 sont bien différentes. Prenons par exemple une courbe de type 1 : la probabilité de rupture dans les dix prochains

## L'exemple de La Réunion

La route nationale n° 1, à La Réunion, longe sur une dizaine de kilomètres le pied d'une falaise constituée de coulées de basalte alternant avec des scories très érodables. La Direction départementale de l'équipement (DDE) ayant instauré une patrouille permanente pour le relevé des chutes de blocs, nous disposons de données quotidiennes : la fréquence annuelle est d'environ 100 chutes pour l'ensemble de l'itinéraire. Que peut-on en déduire pour un point donné de l'itinéraire ? La falaise possédant une hauteur moyenne de 60 m, la surface de paroi est d'environ 600 000 m<sup>2</sup>. Si l'on suppose qu'un site d'éboulement typique représente environ 6 m<sup>2</sup> de falaise, et que la paroi est globalement homogène, l'ordre de grandeur de la période de retour en un site ponctuel est de mille ans.

nes années peut être considérée comme assez faible, compte tenu de l'absence d'indices d'évolution actuelle (on n'observe pas de traces fraîches de fissures) ; mais la probabilité de rupture à long terme, d'ici un siècle, peut être relativement élevée, compte tenu de la présence d'un facteur évolutif défavorable tel qu'un banc rocheux gélif s'érodant petit à petit à la base de l'écaïlle rocheuse considérée. On peut donc accepter sur le site certains types d'activités ou d'installations, à caractère provisoire, mais on s'interdira tout aménagement lourd à durée de vie longue.

### Les mouvements de terrain à l'échelle d'une zone homogène

La situation est différente si l'on considère l'occurrence d'événements non plus en un point donné, mais sur tout un secteur homogène : cas de chutes de blocs provenant d'un linéaire important de falaise, de fontis apparaissant dans un plateau karstique de plusieurs kilomètres carrés, etc. Le caractère homogène du secteur est essentiel : même formation géologique, mêmes conditions de relief, même climat, etc.

La série temporelle des événements survenant dans un tel secteur peut souvent être assimilée à un processus de Poisson. Dans la mesure où le secteur considéré comprend un grand

nombre de sites potentiels et où ces différents sites sont à des stades d'évolution très variables, l'occurrence des événements devient stationnaire et l'on peut parler alors de la période de retour T de l'événement « chute d'un bloc provenant d'un point quelconque de la falaise » par exemple. En moyenne, il tombe donc 1/T bloc(s) par an, si T est exprimée en années.

Il faut donc bien distinguer le diagnostic en un point précis, pour lequel il est indispensable d'évaluer le stade de développement actuel de la rupture, et le diagnostic à l'échelle régionale, pour lequel une approche globale de type poissonien peut suffire (fréquence annuelle des événements).

### L'influence des précipitations

L'expérience montre que les instabilités se produisent essentiellement pendant la saison pluvieuse ou à la fonte des neiges. La dépendance vis-à-vis des précipitations conduit à envisager une probabilité de l'événement conditionnellement à une précipitation donnée, par exemple cumulée sur les dernières 24 heures ; cette approche a été utilisée à une échelle régionale dans une perspective d'alerte à court terme, à Hong-Kong notamment.

Sur la RN 1 de La Réunion, il est patent que les chutes de blocs sont très nombreuses lors des fortes pluies tropicales. L'étude statistique montre que le nombre mensuel N de chutes de blocs peut être relié à la hauteur mensuelle de précipitations, la corrélation restant toutefois médiocre. Toutefois, comme on le verra plus loin, la dépendance vis-à-vis de la pluie, pour limitée qu'elle soit, peut être exploitée pour améliorer la gestion du risque à court terme.

### La difficulté de l'estimation

L'utilisation d'un modèle probabiliste n'a de sens que s'il est possible d'estimer correctement les paramètres du modèle. De façon générale, on dispose de deux types de méthodes pour identifier une probabilité : les méthodes indirectes et les méthodes directes.

Les **méthodes indirectes** sont souvent utilisées dans le risque industriel : la probabilité de ruine du système est évaluée à partir des probabilités de rupture des différents éléments qui com-

**Un modèle probabiliste n'a de sens que s'il est possible d'estimer correctement les paramètres du modèle**

posent le système, ou en fonction de caractéristiques dont les lois de probabilité sont elles-mêmes connues. Dans le domaine des instabilités de pente, on peut tenter d'évaluer :

$$\text{Proba (instabilité)} = \text{Proba} \left( F = \frac{R}{M} < 1 \right)$$

où  $F$  représente le coefficient de sécurité,  $R$  les efforts résistants maximaux mobilisables et  $M$  les efforts moteurs.  $R$  et  $M$  sont considérés comme des fonctions de variables aléatoires telles que les résistances au cisaillement des sols ou l'épaisseur des terrains meubles.

### Des calculs complexes

En pratique, l'emploi des méthodes indirectes est freiné par la complexité des calculs, si l'on veut prendre en compte la variabilité spatiale des caractéristiques mécaniques ou les corrélations entre celles-ci, et surtout par l'importance des reconnaissances géotechniques qu'il serait nécessaire d'entreprendre pour pouvoir estimer correctement les paramètres.

En outre, la plupart des auteurs qui ont expérimenté cette approche n'ont pas incorporé, dans leur modèle probabiliste, le temps, qui intervient à travers les variations de la hauteur des nappes phréatiques ou le « vieillissement » des caractéristiques mécaniques.

Les **méthodes directes** d'estimation reposent sur la fréquence empirique des événements. L'hypothèse implicite est que les conditions générales futures seront les mêmes que par le passé ; elle est en général justifiée pour les phénomènes tels que les mouvements de terrain, même si les changements climatiques peuvent perturber l'analyse sur de très longues durées. Dans le cas des inondations ou des pluies extrêmes par exemple, on dispose de séries historiques de données qui permettent d'estimer des périodes de retour décennales ou centennales satisfaisantes. En ce qui concerne les mouvements de terrain, il est très rare de disposer de données suffisantes, le cas de la RN 1 cité plus haut restant exceptionnel.

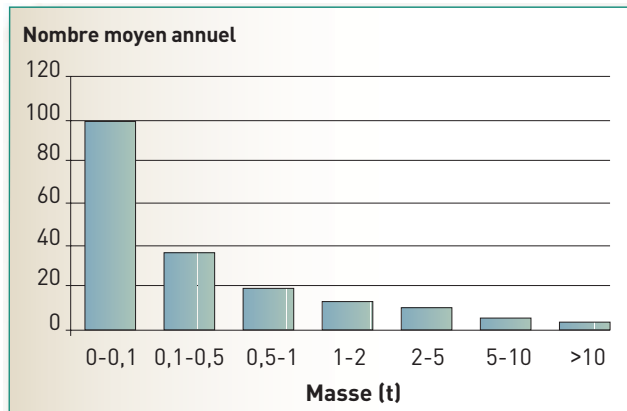


Figure 2 – Histogramme des chutes de blocs sur la RN 1, selon la masse éboulée.

### La question de l'intensité

C'est une observation de portée générale que les phénomènes de grande ampleur sont (heureusement) moins fréquents que ceux de faible ampleur, qu'il s'agisse de chutes de météorites, de séismes, de crues torrentielles ou de mouvements de terrain.

En général, le contexte morphologique et géologique permet de donner une dimension maximale aux mouvements de terrain pouvant se produire sur un site donné : pour un glissement de terrain par exemple, la longueur de la pente, l'épaisseur des formations superficielles mobilisables, etc.

Les données statistiques disponibles pour les événements de grande ampleur, donc rares, sont insuffisantes pour caler correctement un modèle probabiliste. On a recours alors le plus souvent à une extrapolation à partir des petites intensités : dans le cas des crues et des séismes, diverses méthodes ont été mises au point.

Qu'en est-il pour les mouvements de terrain ? On peut admettre qu'une extrapolation est valable tant que les phénomènes répondent aux mêmes mécanismes et aux mêmes causes. Sur la RN 1 à La Réunion par exemple, la décroissance de la fréquence selon la masse éboulée est manifeste (figure 2), mais les phénomènes majeurs s'analysent comme l'éboulement d'une tranche de falaise ayant une épaisseur de plusieurs mètres, avec une largeur et une hauteur de quelques dizaines de mètres, c'est-à-dire un mécanisme très différent des chutes de blocs courantes liées à la

mise en déséquilibre d'un niveau de coulée basaltique reposant sur des scories érodables : il n'y a donc pas de raison objective d'extrapoler les fréquences de la figure 2 à ces éboulements majeurs.

## La trajectographie

La trajectoire d'un bloc dévalant une pente par une succession de rebonds désordonnés est impossible à prévoir précisément.

Il paraît donc naturel de présenter les résultats des études trajectographiques sous forme probabiliste.

La probabilité qui intéresse le décideur est la composée de la probabilité de départ d'un bloc et de la probabilité que la trajectoire atteigne un objectif, ponctuel ou linéaire, donné. Concentrons-nous sur la seconde probabilité.

L'incertitude majeure réside au niveau du rebond des blocs : la vitesse réfléchie dépend de la vitesse incidente (en translation et en rotation), de la masse et de la forme du bloc, de son orientation au moment du choc et de la nature et de la pente du terrain.

La difficulté provient du fait qu'il n'y a pratiquement aucune donnée expérimentale permettant de construire des distributions de probabilité fournissant l'angle de réflexion ou la vitesse réfléchie lors d'un rebond... Il est donc indispensable – mais c'est rarement fait – de vérifier la robustesse des résultats par rapport aux distributions de probabilité initiales.

## La gestion du risque à l'aide de l'approche probabiliste

Le gestionnaire d'un ouvrage menacé ou le maire d'une commune inquiet pour la sécurité des habitants ont à prendre des décisions telles que : investissement dans un ouvrage de protection, évacuation d'une maison, etc. Ce n'est pas seulement l'aléa, qui concerne uniquement le phénomène naturel, mais plutôt le risque, prenant en compte les conséquences, qui intéresse les décideurs.

Dans le cas d'une route située en pied de falaise par exemple, l'accident se produit si un bloc atteint la route au moment du passage d'un véhicule, conjonction heureusement beaucoup

moins probable que la seule chute (il faudrait aussi analyser la possibilité d'accident lié à la présence d'un bloc tombé peu avant le passage d'un véhicule). Pour un aléa donné, le risque de « coup au but » sera d'autant plus élevé que le temps de séjour des véhicules dans la zone exposée sera long ; ce temps d'exposition est une fonction du trafic et de la fluidité de la circulation.

Dans un premier temps, à supposer que l'on sache estimer le risque correctement, celui-ci est comparé au risque considéré comme acceptable. De façon générale, celui-ci peut s'exprimer sous la forme d'un nombre moyen annuel de victimes, ou d'un coût moyen annuel des dommages.

Si le risque est considéré comme inacceptable, il faut alors mettre en balance d'une part le coût (économique, social, environnemental) des diverses mesures de prévention, et d'autre part les risques résiduels correspondants. La mise en sécurité absolue étant rarement possible, une stratégie de protection doit être choisie en évitant deux types d'excès : l'excès d'optimisme, laissant une trop grande possibilité d'accident, et l'excès de pessimisme, entraînant des coûts injustifiés pour la collectivité (surprotection).

Dans le cas de la RN 1 à La Réunion, un mode de gestion du risque à court terme, tenant compte de la relation statistique entre pluies intenses et chutes de blocs, a été défini de la façon suivante (figure 3) : dès qu'un seuil  $S$  de pluie tombée en 24 heures est dépassé, la chaussée côté falaise, de loin la plus exposée, est fermée pendant une durée  $D$  (bien entendu prolongée si le seuil est de nouveau dépassé). Les données statistiques sur le site étant nombreuses et représentatives, une optimisation de cette stratégie de prévention a pu être effectuée, en cherchant à minimiser deux critères :

- un critère sur l'aléa résiduel, évalué par la proportion  $\alpha$  de chutes qui surviennent alors que la route est ouverte au trafic,
- un critère sur le coût (l'impact socio-économique de la fermeture partielle de la route est très important), mesuré à l'aide de la proportion  $p$  de jours de fermeture.

Plus le seuil pluviométrique  $S$  est bas, plus l'aléa résiduel ( $\alpha$ ) est important et plus  $p$  est

**C'est le risque, prenant en compte les conséquences, qui intéresse les décideurs**

faible ; plus la durée de fermeture D est longue, plus  $\alpha$  est faible et plus l'impact économique ( $p$ ) est grand. Les points de la figure 3 représentent diverses stratégies de fermeture (couples S, D) dans le diagramme ( $\alpha$ ,  $p$ ). Les stratégies optimales se situent en première approximation sur la courbe bleue ; les points situés au-dessus représentent des stratégies qui sont améliorables. Deux stratégies dont les points sont situés sur la courbe ne sont pas comparables pour les critères retenus : il revient au politique de décider *in fine* de la stratégie, à choisir parmi l'ensemble des stratégies optimales (une autre stratégie – celle qui est aussi mise en œuvre progressivement – est de mettre en place des protections).

### Mieux comprendre les mécanismes

Suivant une remarque de G. Matheron, nous pouvons rappeler que « *Il n'y a pas de probabilités en soi, il n'y a que des modèles probabilistes* » : la probabilité est construite dans le cadre d'informations connues à une certaine date par un individu pour modéliser la part d'inconnu subsistant, et sera d'autant plus fiable que ces informations seront nombreuses et de qualité (l'estimation de la probabilité de glissement par le géotechnicien n'est évidemment pas la même avant et après les forages de reconnaissance).

Lorsque l'on ne dispose que de très peu d'informations sur un site, ce qui est le cas le plus courant, on peut préférer à l'outil probabiliste une analyse déterministe mise en œuvre par un expert chevronné et intégrant toutes les observations de terrain. Une évaluation de la sensibilité des résultats aux principaux facteurs permet en général de faire face aux incertitudes de façon satisfaisante (Londe, 1998). Toutefois, dans les (très rares) cas où l'on a collecté suffisamment de données quantitatives, l'approche probabiliste, combinée avec une appréciation des enjeux et de leur vulnérabilité, devient un puissant outil d'aide à la décision, en permettant d'affecter un « poids » à différents scénarios d'évolution du phénomène, à différentes stratégies de protection, etc., le raisonnement probabiliste présentant en tout état de cause un indéniable intérêt sur un plan pédagogique.

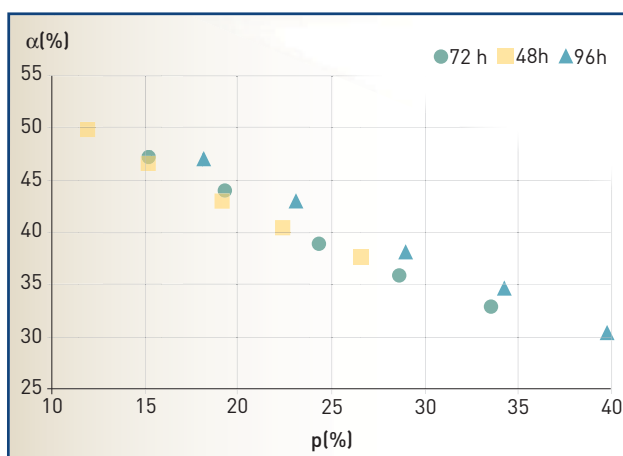


Figure 3- Représentation graphique des différentes stratégies de fermeture de la RN 1 à La Réunion : chaque point correspond à une stratégie définie par un seuil de pluie S (5 - 10 - 15 - ... mm/jour) et une durée de fermeture D (indiquée dans la légende).

Dans le court terme, un progrès significatif dans la gestion et la maîtrise des risques de mouvements de terrain viendront essentiellement, à notre avis, d'une meilleure compréhension des mécanismes d'évolution de ces phénomènes. ■

### Bibliographie

FAVRE J.-L., BRUGNOT G., GRÉSILLON J.-M., JAPPIOT M., *Évaluation des risques naturels : une approche probabiliste ?* Techniques de l'ingénieur, 1998, chapitre C3 295, 34 p.

LONDE P. *Évaluation de la stabilité des fondations rocheuses*. Actes du colloque Mécanique et géotechnique (Jubilé scientifique de P. Habib), 1998, Paris.

MATHERON G. *Estimer et choisir*. Cahier du Centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, fascicule 7, 1978, 175 p.

RAT M. *Optimisation de la gestion de la route du littoral à La Réunion vis-à-vis du risque de chutes de blocs*. Bull. Labo. Ponts et Chaussées, 2006, n° 263-264, p. 43-52.