

# **Les glissements de terrain-: des outils pour évaluer les risques**

*Qui n'a, sans le savoir, marché, habité ou roulé sur les dépôts d'un effondrement passé-? Description théorique et compréhension physique de ces processus constituent aujourd'hui un problème largement ouvert. S'y attaquer, c'est vouloir comprendre l'une des composantes principales de l'évolution des surfaces des planètes. C'est, aussi, chercher à appréhender la dynamique de transfert et de stockage de matière. C'est, enfin, au-delà des aspects fondamentaux, se doter d'un cadre incontournable pour la gestion des risques.*

*par Anne Mangeney,  
Institut de physique du globe de Paris*

**E**n décembre 1999, les glissements de terrain et les écoulements de débris catastrophiques provoqués par une tempête au Venezuela affectaient 40-km de côte au nord de Caracas causant la mort de 30-000 personnes, l'évacuation de 140 000 résidents et la destruction d'à peu près 23-000 maisons. La perte économique a été estimée à 1,8 billion de dollars. Si les forêts des pentes sud des Monts Avila ont contribué à protéger la ville de Caracas, la très forte urbanisation du versant nord a

favorisé la destruction de celle de Vargas (voir figure 1).

## **Une composante importante mais dangereuse de la morphologie des planètes**

Comme le montre cet exemple, les glissements de terrain représentent un risque naturel majeur par l'ampleur des dégâts humains et matériels qu'ils génèrent, chaque

année, dans le monde. Aérien ou sous-marin, terrestre ou extra-terrestre, un glissement de terrain se déclenche sur un relief dès qu'une masse de débris rocheux se déstabilise-: la masse de débris ainsi mise en mouvement s'écoule le long du relief sous l'effet de la gravité et finit par s'arrêter sur des pentes plus faibles ou par descendre vers la vallée ou la mer où elle forme un dépôt. Ces événements catastrophiques jouent un rôle important dans les processus d'érosion et dans la dynamique des paysages aussi bien sur la Terre

que sur d'autres planètes telluriques, comme nous le montrent les images satellites des glissements sur les flancs du Canyon Valles Marineris, sur Mars (voir figure 2). Qui n'a, sans le savoir, marché, habité ou roulé sur les dépôts d'un effondrement passé? La description théorique et la compréhension physique de ces processus constituent aujourd'hui un problème largement ouvert. S'attaquer à ces questions, c'est vouloir comprendre l'une des principales composantes de l'évolution des surfaces des planètes. C'est également chercher à appréhender la dynamique de transfert et de stockage de matière, jusqu'à son accumulation au sein des bassins. Enfin, au-delà des aspects fondamentaux, l'étude de ces écoulements gravitaires fournit un cadre incontournable pour la gestion des risques liés à ces catastrophes naturelles.

## La variété des causes, des contextes géologiques et des types de glissements

Les glissements de terrain peuvent être provoqués par différents événements comme une

pluie intense, un tremblement de terre, l'activité volcanique, un changement du niveau de la mer mais aussi les activités humaines comme la déforestation ou la construction d'infrastructures sur les pentes. Les risques liés aux glissements de terrain sont essentiellement concentrés en région montagneuse, notamment dans les régions volcaniques où les fortes pentes sont potentiellement instables. Dans les régions glaciaires comme le Nord du

magma, la fragilisation par altération hydrothermale ou la surcharge due aux extrusions de laves constituent les principaux facteurs déclencheurs. Outre les zones détruites par l'effondrement lui-même, l'interaction d'un glissement de terrain avec le milieu naturel peut générer des risques indirects comme l'endiguement d'un ruisseau, conduisant à la création de lacs superficiels. L'approvisionnement en eau des régions en aval est alors perturbé et la rup-

Photo Jean-Pierre Violette

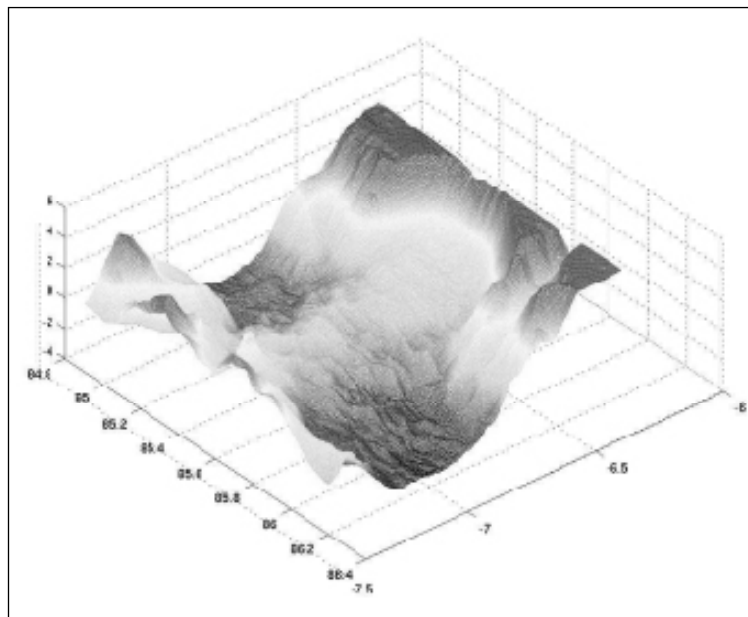


Figure 2 : Modèle Numérique de Terrain d'un glissement de terrain dans le Canyon de Valles Marineris sur Mars reconstruit à partir des données topographiques MOLA, et des images satellites (Viking, THEMIS, MOC) (1).

Canada ou même encore les Alpes, les phénomènes de gel et de dégel favorisent la déstabilisation des versants alors que, dans les régions volcaniques, les séismes, la déformation du volcan après une injection de

ture potentielle de cette digue naturelle constitue une nouvelle menace pour les populations. La rencontre d'un glissement de terrain et de la mer peut générer un tsunami, risque indirect susceptible de toucher les

régions côtières avoisinantes, voire même très éloignées. Des glissements atteignant la mer se produisent régulièrement sur les îles volcaniques comme Hawaii, les Canaries, la Réunion ou encore les Antilles où un tsunami, généré en 2003 par une avalanche de débris sur l'île de Monserrat, s'est propagé jusqu'en Guadeloupe (2). Aux effondrements de falaises, fréquents sur les reliefs côtiers escarpés, s'ajoutent, dans ces régions littorales, les conséquences de glissements de terrain sous-marin. Celui qui, en 1979, fut à l'origine de l'effondrement de l'aéroport de Nice et qui fit 9 morts avant de générer un tsunami de 2,5 à 3,5-m de haut qui déferla sur Antibes 9 minutes plus tard nous l'a tragiquement rappelé. Plus rarement, les glissements de terrain peuvent aussi toucher plaines ou plateaux en raison de l'exploitation des sous-sols ou leur évolution naturelle.

Les glissements peuvent mettre en jeu des matériaux très divers, depuis les éboulements rocheux ou les avalanches de débris impliquant un matériel granulaire sec jusqu'aux écoulements de débris saturés d'eau. Avalanche de débris, effondre-

ment, éboulement rocheux, glissement de terrain, écoulement de débris... Une quantité impressionnante de travaux ont été menés proposant une nomenclature caractérisant chaque type de glissement, la terminologie variant d'une communauté scientifique à l'autre (3). Au-delà des termes retenus, l'intérêt de ces études est de mettre en évidence les critères les plus pertinents déterminant l'évolution et la dynamique des glissements: la nature du matériel mobilisé, le contenu en eau, la vitesse ainsi que les conditions particulières d'écoulement ou de déstabilisation comme le volume initial ou la topographie sous-jacente.

**Même si les événements rares mais impliquant une masse énorme constituent un risque important par leur immense pouvoir de destruction, ce sont certainement les glissements de terrain de taille moyenne qui représentent le risque le plus grand pour les populations.**

## **L'éventail des échelles de temps et d'espace**

Selon le mode de déclenchement, le contexte géologique et les matériaux impliqués, la masse déstabilisée peut se comporter de manière complètement différente impliquant des échelles de temps et d'espace variant de plusieurs ordres de grandeur:

✓-les volumes déstabilisés: les volumes impliqués dans les petits glissements parfois imperceptibles qui se produisent sur de faibles pentes ne sont pas comparables à ceux liés à la déstabilisation de tout un flanc de montagne comme dans l'exemple le plus connu et le mieux documenté: l'avalanche, en 1980, du Mont St-Helens dans la chaîne des Cascades aux Etats-Unis qui a mobilisé 1-km<sup>3</sup> de débris et s'est écoulée sur 30-km! Cependant, même si les événements rares mais impliquant une masse énorme constituent un risque important par leur immense pouvoir de destruction, ce sont certainement les glissements de terrain de taille moyenne qui représentent le risque le plus grand pour les populations ;

✓-les vitesses: la dynamique du glissement de terrain de La Clapière, dans les Alpes du Sud, probablement actif depuis un siècle et glissant à une vitesse moyenne de un cm/jour depuis 1982, n'a rien de commun avec les écoulements de débris dont les vitesses peuvent atteindre 100-m/s. Au fil du temps, un glissement lent peut se transformer en un écoulement très rapide. Un exemple impressionnant en est celui du glissement d'Attachie sur la Peace River, en Colombie britannique, en 1957. Une masse rocheuse de 7-millions de m<sup>3</sup>, fluant lentement depuis des dizaines d'an-

nées, a brusquement dévalé la pente à la suite d'une période de pluie intense. Ces débris ont traversé la vallée de la rivière Peace, large de un km, avec une vitesse suffisante pour générer une vague violente sur la rive opposée-;

✓-le matériau mobilisé-: les échelles de taille des débris peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur au sein d'un même écoulement. D'énormes blocs de plusieurs mètres peuvent être transportés conjointement à de fines particules de quelques centaines de microns-;

✓-le temps-: comme la plupart des catastrophes naturelles, l'occurrence de ces événements peut varier de l'année aux temps géologiques-: on estime à sept les déstabilisations de flancs subies par la Soufrière, en Guadeloupe, depuis les 11-500 dernières années. Mais la durée d'un événement n'est souvent que de quelques secondes! Il est difficile, d'une part, d'obtenir des données sur plusieurs événements survenant dans le même contexte géologique à cause des trop grandes périodes entre les occurrences, et, d'autre part, de mesurer les caractéristiques dynamiques de certains écou-

lements en raison de leur trop courte durée.

## Évaluer les risques et prévenir

Les glissements de terrain constituent une menace croissante pour nos sociétés. En effet, sous la pression de la croissance démographique et économique, les zones d'habitation et d'activité industrielle se développent de plus en plus sur des pentes instables. S'ajoute l'évolution du climat qui semble générer davantage d'épisodes pluviométriques extrêmes qui favoriseraient la déstabilisation des pentes. Où en est-on actuellement de l'évaluation des risques liés à ces glissements-?

D'abord, il est essentiel de souligner les progrès énormes faits ces vingt dernières années tant au niveau des mesures que de la modélisation ou de l'analyse des risques. Des projets réunissant tous les acteurs intervenant dans ce processus existent partout dans le monde. Les chercheurs dans

des domaines aussi variés que la mécanique des sols, la mécanique des fluides, la géographie, la démographie, l'urbanisme, interagissent avec les ingénieurs des travaux publics, l'Etat, les communautés locales et les industries. Un certain nombre d'initiatives ont vu le jour comme la création de bases de données sur les glissements de terrain ou de cartes interactives de localisation de glissements et de cartes d'aléas (4). Une réglementation existe même dans certains pays comme dans l'Ontario, le Canada, où les plans municipaux imposent d'évaluer les risques liés aux glissements pour obtenir des permis de construire. L'US *Geological Survey*, en collaboration avec l'US *National Weather Service*, a développé un système d'alerte en temps réel pour les glissements de terrain dans la baie de San Francisco en Californie. Le Japon est un exemple à suivre en raison de la forte implication du gouvernement dans le contrôle de l'aménagement du territoire, sa réglementation stricte, l'éducation des populations et la diffusion d'alertes.

Chaque année en Europe, des centaines de millions d'euros sont dépensés pour stabiliser les pentes, construire des ouvrages de protection et préserver ou développer la végétation (5). Dans de nombreux

DR

**Les glissements de terrain constituent une menace croissante pour nos sociétés. En effet, sous la pression de la croissance démographique et économique, les zones d'habitation et d'activité industrielle se développent de plus en plus sur des pentes instables.**

cas, hélas, les glissements restent inévitables et il devient fondamental de prédire les risques qu'ils peuvent générer, non seulement pour éviter les pertes humaines mais, aussi, pour mener une politique d'occupation des sols la plus rationnelle possible.

L'évaluation des risques passe par la prédiction de l'aléa (le phénomène naturel), qui sera ensuite combiné à la vulnérabilité liée à la présence humaine (personnes, habitations, infrastructures...). Les prédictions nécessaires à l'évaluation de l'aléa concernent essentiellement la prédiction de deux phases: la phase d'initiation du glissement et la phase de propagation. L'étude de ces deux phases fait appel à deux communautés assez différentes, la communauté des mécaniciens des sols pour la déstabilisation d'une pente, et la communauté des mécaniciens de fluides pour l'écoulement de la masse rocheuse (6). S'agissant de la phase d'initiation, les paramètres importants sont l'évaluation de la stabilité de la pente, la détermination des signaux précurseurs et la prédiction du type d'effondrement. En effet, les glissements lents peuvent couvrir de longues distances mais leur faible vitesse rend possible une réduction des risques par des actions de stabilisation ou d'évacuation. Ce

n'est pas le cas des glissements rapides pour lesquels la gestion des risques nécessite la prédiction de la phase de propagation, en particulier de la zone potentiellement affectée par le glissement (*runout*) et des vitesses et hauteurs d'écoulement (permettant de calculer la force d'impact sur les ouvrages). L'étude de ces deux phases implique une coordination entre mesures

sur le terrain et modélisation (Cf. encadré).

## La surveillance in-situ

La surveillance d'une pente instable consiste notamment à effectuer *in-situ* des mesures du déplacement du sol, de la pression de pores et des signaux micro-sismiques. Les

**Du terrain à la simulation, en passant par les expériences de laboratoire: l'exemple des levées**

**Lorsqu'ils ne sont pas confinés dans des vallées, certains écoulements gravitaires comme les écoulements pyroclastiques, se propagent sous la forme d'une langue à bords parallèles, créant ainsi leur propre chenal le long d'une pente. De plus, les dépôts ont une morphologie très particulière, avec des levées latérales plus hautes que le chenal central. Ces observations ont été faites sur des écoulements aussi bien sur Terre que sur Mars ou sur la Lune. Des expériences récentes de laboratoire ont montré que ce comportement pouvait être reproduit au moyen d'un dispositif simple, consistant**

**en un écoulement granulaire sur un plan incliné, avec une alimentation constante (8). La simulation numérique de ces expériences, menée pour la première fois à l'IPGP, a montré l'extraordinaire capacité d'un modèle pourtant simple à reproduire une dynamique complexe. Ainsi, la confrontation entre observations de terrain, modélisation expérimentale et numérique permet de valider les modèles sur des données plus subtiles que l'aire balayée par le glissement ou la vitesse moyenne d'écoulement. Elle fournit alors un outil permettant de mieux comprendre les mécanismes gérant la dynamique et la localisation des écoulements grâce à la possibilité d'évaluer numériquement les forces mises en jeu.**

mesures de déformation du sol par interférométrie ou photos aériennes permettent d'accéder aux champs de déformation avec une très bonne couverture spatiale. De plus, des essais en laboratoire permettent d'étudier le comportement mécanique des roches et, en particulier, leur évolution vers la rupture. Mais les mesures ne suffisent pas à prédire la déstabilisation. En effet une accélération soudaine de la masse, même au-dessus d'un seuil considéré comme critique (valeur extrêmement difficile à définir et dépendant fortement du site et de la période considérée...) ne conduit pas forcément à une déstabilisation. L'histoire des 250-000-m<sup>3</sup> de roches instables près d'Innertkirchen en Suisse en est une savoureuse illustration.

En effet, après des mesures de déplacements du sol considérés comme critiques en été 2001, l'unique autoroute traversant la montagne a été coupée. Pendant ce temps, un flux de 9-000-litres de fluide par minute était injecté dans la fissure pendant 18-jours, afin de déclencher l'effondrement. L'accélération du sol augmenta mais la rupture n'eut pas lieu. La zone instable résista ensuite à 19-tonnes d'explosifs qui ne réussirent qu'à en faire

s'écrouler la moitié. Une deuxième campagne d'explosion finit par avoir raison du reste de la masse-! Même si d'autres actions de surveillance ont rencontré plus de succès, il reste difficile de prédire quand le seuil de rupture sera atteint.

## Un outil indispensable: la modélisation

Comme nous l'avons vu, les mesures *in-situ* ne suffisent pas à s'assurer de la stabilité d'une pente. De nombreuses simulations numériques sont développées pour étudier la limite de stabilité de la pente en fonction du chargement et des paramètres environne-

**Chaque année en Europe, des centaines de millions d'euros sont dépensés pour stabiliser les pentes, construire des ouvrages de protection et préserver ou développer la végétation.**

mentaux comme la pluviométrie ou la température ainsi que pour définir la profondeur et le volume de la rupture potentielle. Mais la complexité du problème ne permet pas, à l'heure actuelle, de prédire le moment où la déstabilisation aura lieu. Des problèmes similaires se posent pour la modélisation de la phase de propagation. De plus, pour les glissements rapides, les mesures des caractéristiques dynamiques de l'écoulement

sur le terrain sont limitées par la violence et la rapidité de ces événements. A titre d'exemple, nous développerons ici les tentatives déployées et les problèmes rencontrés pour modéliser ces écoulements rapides.

La simulation numérique d'avalanches réelles est maintenant possible grâce au développement des méthodes numériques et grâce aux performances toujours croissantes des ordinateurs. Dans le cadre d'une collaboration entre l'IPGP, l'INRIA, l'ENS et le *Politecnico* de Turin (7), la simulation numérique d'avalanches rocheuses a permis de reproduire plusieurs dépôts d'avalanches connues. A première vue, l'accord entre simulation et données est impressionnant comme le montre la figure-3 où l'avalanche de roches des Eaux Froides, en Suisse, a été modélisée. En est-on maintenant à pouvoir prédire le trajet d'un effondrement connaissant la topographie sous-jacente ainsi que la masse pouvant potentiellement se déstabiliser-? Hélas, non et nous allons tenter d'expliquer ici les limites auxquelles se heurtent la prédiction et les champs de recherche à explorer si l'on veut surmonter ces obstacles.

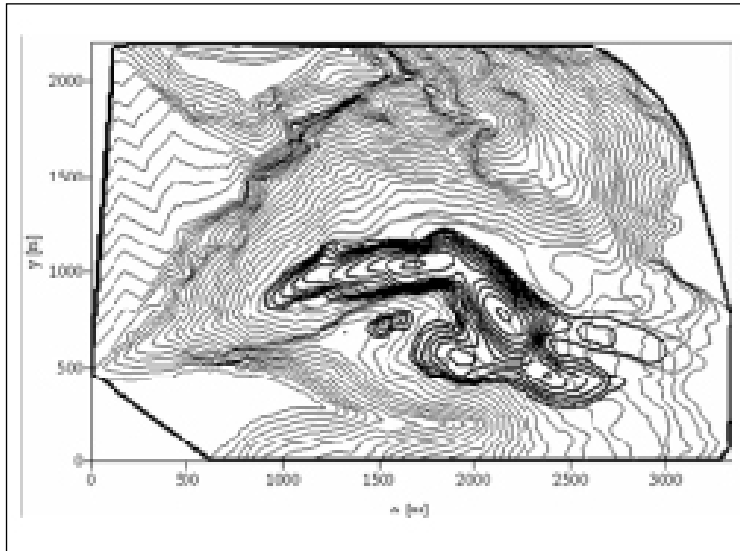


Figure 3 : Avalanche de roche des Eaux Froides en Suisse. A gauche, le dépôt de cette avalanche a été photographié et à droite, la topographie a été numérisée et l'avalanche modélisée. Le dépôt calculé numériquement [7] et représenté par des iso-valeurs de l'épaisseur de débris est en bon accord avec le dépôt observé dont le contour est matérialisé par la ligne rouge.

## Comportement complexe des débris hétérogènes

L'une des grandes inconnues du problème est évidemment le comportement rhéologique des milieux complexes mis en mouvement lors d'un glissement. On imagine facilement l'étendue de cette incertitude quand on sait que même

le comportement de billes de même diamètre sur un plan incliné fait actuellement l'ob-

jet de nombreuses études. De nombreux physiciens, mécaniciens et géophysiciens, en particulier en France dans le cadre du Groupement de recherche

**L'enjeu consiste à décrire l'essentiel de la physique avec les lois les plus simples et impliquant le moins de paramètres possibles. Un nombre de paramètres trop élevé permettrait de reproduire n'importe quelle situation mais aboutirait à un modèle inutilisable en termes de prédiction.**

sur les milieux divisés (GRMD) se consacrent à des essais mécaniques en laboratoire (expériences d'écoulement et de déstabilisation de matériaux granulaires modélisés (voir encadré)).

Selon le type de dissipation de l'énergie s'effectue par frottements granulaires, frottement visqueux, collisions ou turbulence. Si des lois de compor-

tement empiriques ont pu être déduites des études en laboratoire, il existe encore un vaste champ d'investigation. La polydispersité du milieu, par exemple, joue un rôle important sur la mobilité des écoulements granulaires. Quant au comportement de ces matériaux vers la rupture, songez qu'il dépend de toute la déformation qu'ils ont subie dans le passé! On pourrait dresser une longue liste des effets liés à l'hétérogénéité du matériau mis en jeu, mais un des paramètres les plus importants reste le rôle du fluide contenu dans le matériau en écoulement. En effet, le fluide (gaz ou eau), généralement présent dans les écoulements naturels peut changer radicalement le comportement d'un milieu granulaire en écoulement, en augmentant significativement sa mobilité.

Etant donné la complexité du matériau mis en jeu et la difficulté de mesurer directement des variables fondamentales comme la pression de pore, les coefficients de friction ou la viscosité lors d'événements réels, les modèles théoriques doivent nécessairement comporter des simplifications majeures. Ceci se traduit par l'introduction de paramètres empiriques, qu'il faut caler sur des observations. Tout l'enjeu consiste à décrire l'essentiel de la physique avec les lois les plus simples et impliquant

le moins de paramètres possibles. Un nombre de paramètres trop élevé permettrait de reproduire n'importe quelle situation grâce au degré élevé de liberté introduit mais aboutirait à un modèle inutilisable en termes de prédiction en raison de l'impossibilité d'évaluer les paramètres dans les conditions *in-situ*.

## Un peu de physique et de mécanique

Dans le cas des matériaux granulaires, la friction dépend d'un angle appelé angle de friction. Ces matériaux ont un comportement plastique, c'est-à-dire qu'ils ont la capacité de résister à la déformation au-dessous d'un certain seuil de contrainte, et qu'ils peuvent subir des déformations importantes au-dessus de ce seuil.

### ✓-Le comportement de type Coulomb

Une image très parlante de ce type de comportement est l'expérience dite de Coulomb illustrée par un bloc sur un plan. Si on incline progressivement le plan, le bloc reste au repos tant que l'angle de la pente reste inférieur à une

certaine valeur seuil-: la force de gravité est alors inférieure à la friction du bloc sur le plan. La friction liée aux aspérités microscopiques des surfaces en contact est proportionnelle à la pression exercée par le bloc sur le plan. Pour une pente égale à cette valeur seuil, le bloc glisse sur le plan avec une vitesse uniforme, la force de gravité est alors exactement égale à la force de friction. Pour des pentes supérieures, le bloc accélère le long de la pente car c'est alors la force de gravité qui domine.

### ✓-L'angle de repos d'un tas de sable

De manière similaire, une masse granulaire restera au repos, se comportant comme un solide, tant que la somme des forces motrices est inférieure à un certain seuil. Dans le cas d'un tas granulaire, ce seuil correspond à une pente limite d'équilibre, appelée angle de repos, de l'ordre de 35° dans le cas du sable. Avec des pentes supérieures à cet angle, le matériau se déstabilisera par avalanches successives, se comportant alors comme un fluide, jusqu'à constituer de nouveau un tas

avec une pente égale à l'angle de repos. Cet angle est lié à la friction entre les particules et à l'arrangement géométrique. Il dépend entre autres choses de la forme des grains et de la quantité de fluide présente au sein du matériau granulaire. Une petite quantité d'eau augmente les angles de repos en raison de la force de tension superficielle qui maintient les grains solidaires. En revanche, une fois le milieu saturé d'eau, les particules se désolidarisent et le tas perd sa résistance au mouvement (figure-4).

### ✓-Le phénomène d'hystérésis

En réalité le phénomène est plus complexe et la contrainte seuil n'est pas la même suivant que le matériau se déstabilise ou qu'il s'arrête. En effet, l'angle limite à partir duquel une avalanche affectera un tas initialement au repos est supérieur à l'angle limite auquel le matériau se serait arrêté s'il avait été initialement en mouvement. Pour des angles intermédiaires, le tas est dit métastable, c'est-à-dire qu'il peut se déstabiliser sous l'effet d'infimes sollicitations. Ce phénomène d'hystérésis, caractéristique d'un milieu dont le comportement dépend de sa

**Il nous incombe à tous de combattre l'inertie qui caractérise le renouvellement des outils de prédiction lié aux derniers développements scienti-**



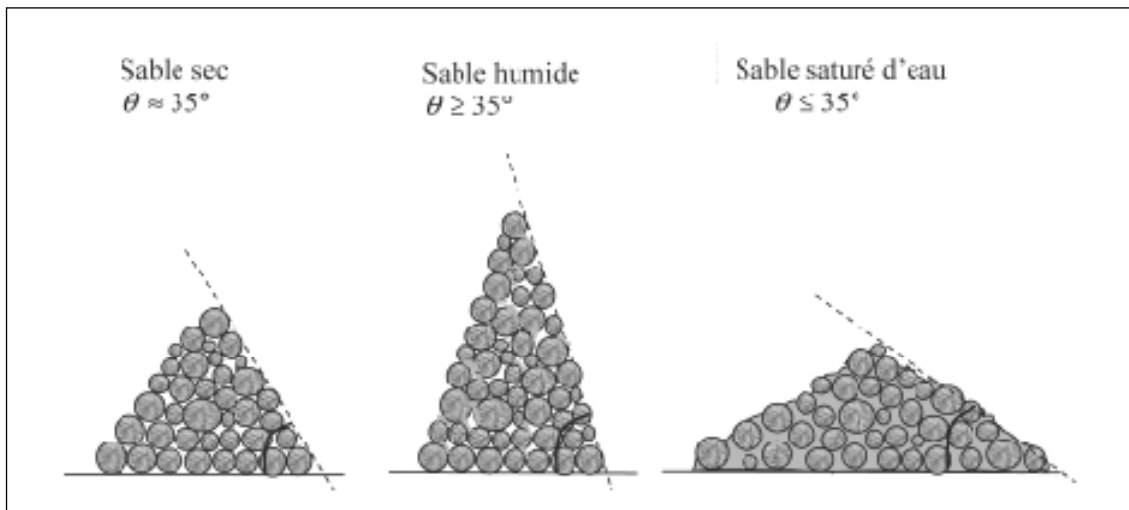


Figure 4 : Du sable humide permet de faire de beaux châteaux, mais une fois saturé, celui-ci peut s'effondrer de manière parfois catastrophique ! La taille des grains est exagérée pour visualiser la présence d'eau interstitielle.

propre histoire dynamique, joue un rôle fondamental dans les phases d'initiation et d'arrêt d'une masse granulaire.

## Des hypothèses pour simplifier la réalité

Globalement, il existe deux approches possibles pour simuler des effondrements : l'approche discrète, qui consiste à décrire les mouvements à l'échelle de la particule et l'approche continue, qui assimile le milieu granulaire à un milieu continu équivalent. S'agissant d'un milieu granulaire, l'intuition conduit naturellement à privilégier l'approche discrète. Mais plusieurs problèmes se posent quand on cherche à utiliser les modèles discrets dans

le cadre de la simulation de glissements réels. On imagine, en effet, le nombre d'interactions qu'il faudrait résoudre numériquement si l'on voulait calculer le comportement de chacun des grains contenus dans une avalanche réelle ! La prise en compte simultanée de particules de taille pouvant varier de plusieurs ordres de grandeur impliquerait des complications numériques importantes et des temps de calculs prohibitifs. Le milieu doit donc être remplacé par un ensemble de particules idéales dont la taille et la morphologie sont très éloignées de la réalité du terrain. Dans l'approche continue, généralement utilisée pour simuler des avalanches réelles, le détail du comportement à l'échelle des particules est en quelque sorte moyenné et le modèle décrit l'évolution d'une cou-

che de matériel animé d'une vitesse moyenne. L'hypothèse de base généralement utilisée pour simplifier les équations et diminuer ainsi le temps de calcul est l'approximation de couche mince : l'épaisseur de la masse en écoulement est supposée beaucoup plus petite que son étendue le long de la pente. Les mouvements verticaux sont alors supposés négligeables. Cette approche conduit à un modèle qui, bien qu'extrêmement simplifié, a permis de reproduire des phénomènes très complexes observés tant en laboratoire que sur le terrain (voir encadré).

## Description de la topographie réelle

Un des facteurs importants contrôlant la zone affectée par le glissement et sa dynamique est la topographie sous-jacente. Elle peut parfois confiner l'écoulement dans une vallée ou encore dévier sa trajectoire. De plus, la puissance de certains glissements peut leur permettre de surmonter des obstacles et d'atteindre des villages situés sur des versants opposés. L'interaction complexe entre la topographie et l'écoulement a jusqu'à maintenant été modélisée de manière très simplifiée, voire erronée, dans la majorité des modèles.

En effet, l'approximation de couche mince est très diffi-

cile à mettre en œuvre sur une topographie complexe. Ce problème conceptuel a récemment été résolu dans le cadre de la collaboration entre mathématiciens du Département de mathématiques appliquées de l'ENS de Paris et géophysiciens de l'IPGP par la réalisation d'un code numérique prenant en compte les effets complexes de la topographie. Les erreurs faites en négligeant ces effets ont forcé-ment conduit les simulations précédentes à introduire un biais dans la détermination des paramètres rhéologiques. Les paramètres calibrés contiennent donc, implicitement, les erreurs dues à la description

de la topographie! Il est maintenant fondamental d'étudier l'importance de ces effets pour évaluer leur influence potentielle sur le comportement d'un écoulement gravitaire et sur la calibration des modèles. Mais, pour cela, il faut disposer de données précises.

## L'importance des données de terrain

En dehors des limitations théoriques dues à la modélisation utilisée, le manque de données ou de précision

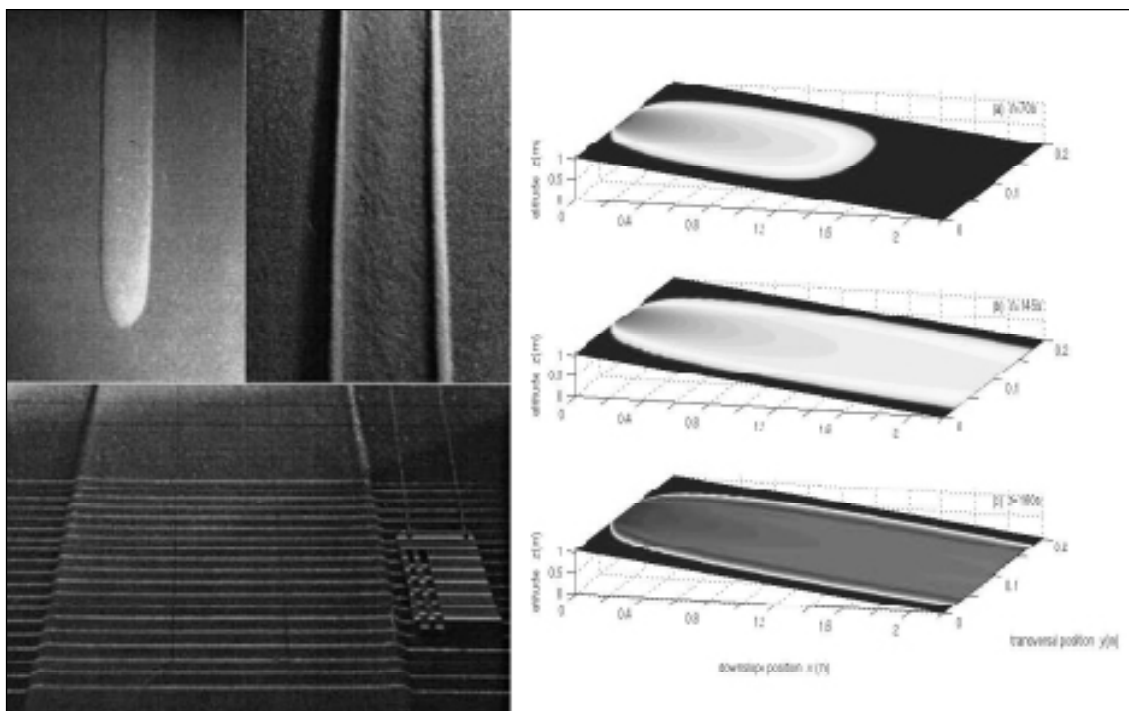


Figure 5 : Expériences en laboratoire (à gauche Photo N. Thomas) et simulation numérique (à droite) des écoulements auto-chenalisés et de la formation de levées sur les bords latéraux des dépôts, collaboration IUSTI, IPGP, ENS.

des mesures de terrain constitue la première limitation des modèles. Un modèle ne pourra être utilisé dans un but de prédiction que si les paramètres utilisés ont été calés sur des événements passés similaires à l'événement prédit. Mais les paramètres ainsi calés dépendent intrinsèquement des erreurs ou des approximations faites dans le modèle. Par exemple, plusieurs comparaisons avec des événements similaires sur des topographies différentes sont nécessaires pour évaluer l'influence des erreurs sur la valeur des paramètres, erreurs découlant de la description exagérément simplifiée de la topographie. Hélas, il est extrêmement rare d'obtenir de telles données. Aussi de nombreuses validations de modèles se limitent-elles à vérifier que, pour un glissement connu, la surface atteinte calculée numériquement est conforme aux observations.

La modélisation d'un effondrement potentiel nécessite de connaître la topographie avant glissement, ainsi que la zone risquant de se déstabiliser. L'élaboration d'un Modèle numérique de terrain (MNT) donnant l'altitude en fonction de la localisation est un travail de recherche en soi. Les mesures satellitaires constituent, par l'étendue de leur couverture spatiale, une véritable révo-

lution pour l'acquisition de telles données. De plus elles permettent de «-photographier-» des glissements aussi bien sur Terre que sur d'autres planètes (voir figure-2). Afin d'utiliser ces données exceptionnelles pour tester les modèles numériques, il faut reconstruire la topographie ainsi que la géométrie de la masse déstabilisée avant l'avalanche. Les résultats des modèles sont très sensibles à la reconstruction de ces données. La précision obtenue dans la reconstruction de la topographie avant glissement et de la masse déstabilisée est-elle suffisante pour permettre de caler des paramètres rhéologiques dans l'optique d'une future prédiction-? De telles études, bien que nécessaires à la compréhension des limites des prédictions basées sur des modèles numériques, sont rarement menées.

## **Une avancée considérable, mais encore beaucoup de chemin à parcourir**

Des points essentiels restent à approfondir comme les lois de comportement de ces matériaux complexes, la prise en

compte de milieux diphasés ou encore la quantification et la modélisation des processus d'érosion/déposition pendant l'écoulement. Des questions fondamentales, comme la grande mobilité de certains glissements, restent en suspens. Ces recherches fondamentales impliquant de nombreuses disciplines doivent être menées avant de pouvoir développer des outils de prédiction fiables dont les paramètres ne dépendraient pas de manière incontrôlée du site sur lequel le modèle a été calibré. Il est parfois difficile, pour les scientifiques travaillant en amont, de concevoir la pertinence de méthodes d'évaluation des risques basées sur des outils qui, comme nous l'avons montré ici, sont entachés d'incertitude. Faut-il, pour cela, attendre les calendes grecques, où un modèle parfait sera enfin conçu et validé-? Non, mais il est important qu'une curiosité mutuelle entre géotechniciens, décideurs et chercheurs permette de prédire les aléas en ayant conscience, jusqu'au dernier stade de la diffusion de ces informations, des incertitudes inhérentes aux outils utilisés en amont dans la méthode de prédiction. De plus, il nous incombe à tous de combattre l'inertie qui caractérise le renouvellement des outils de prédiction lié aux derniers développements scientifiques.

En effet, beaucoup d'études sur l'évaluation font actuellement appel à des méthodes empiriques simplistes ou à des modèles erronés, alors que la prise en compte des résultats scientifiques récents permettrait d'améliorer considérablement la fiabilité des résultats obtenus.

## Notes

(1)-Ces MNT ont été reconstruits par le Laboratoire de dynamique de la lithosphère, Lyon-: Quantin, C., Allemand, P., and Delacourt, C., 2004, *Morphology and geometry of Valles Marineris landslides*, *Plan. Space Sci.*, 52, 1011-1022.

(2)-Heinrich, P., Mangeney, A., Boudon, G., et Roche, R., Modéliser un raz-de-marée créé par un volcan, *La Recherche*, mars 1999, 66-71.

(3)-Le site <http://www.glissements-deterrain.rncan.gc.ca> du projet Glissements de terrain au Canada contient une impressionnante photothèque sur différents types de glissements, des cartes interactives ainsi que de nombreuses informations sur les congrès et manifestations consacrés aux glissements de terrain.

(4)-*Programme Assessment of Landslide Risk and Mitigation in Mountain Areas (2001-2004)* ([http://spinlab.vu.nl/ alarm](http://spinlab.vu.nl/alarm)) qui rentre dans le cadre des activités du Centre européen sur les risques géomorphologiques ([http://www.coe.int/T/E/Cultural\\_Co-operation/Disasters/](http://www.coe.int/T/E/Cultural_Co-operation/Disasters/)).

(5) Par exemple, la plate-forme de recherche RNVO sur les Risques naturels et la vulnérabilité des ouvrages associant plusieurs laboratoires

et instituts de recherches français (<http://geo.hmg.inpg.fr/RNVO>).

(6)-L'ouvrage de Jakob, M. et Hungr, O., *Débris-flow hazards and related phenomena*, décrit en détail les problèmes et les recherches liés aux écoulements de débris.

(7)-Les modélisations ont été faites dans le cadre de la thèse de Marina Pirulli, sur la base du modèle développé par Mangeney-Castelnau A., Vilotte, J. P., Bristeau, M. O., Perthame, B., Bouchut, F., Simeoni, C., and Yernini, S., 2003, *Numerical modeling of avalanches based on Saint-Venant equations using a kinetic scheme*, *J. Geophys. Res.*, 108(B11), EPM 9, 2003.

(8)-Les expériences ont été menées à l'IUSTI, à Marseille et au laboratoire Magmas et volcans de Clermont-Ferrand : Félix, G., and Thomas, N., *Relation between dry granular flow regimes and morphology of deposits : formation of levees in pyroclastic deposits*, *Earth Plan. Sci. Lett.*, 221, 197-213, 2004. Des expériences de ce type sont également menées à l'IPGP.

