Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles

Band: 90 (2006)

Heft: 1

Artikel: Apports des modèles numériques d'altitude pour la géologie et l'étude des mouvements de versant

Autor: Jaboyedoff, Michel / Giorgis, David / Riedo, Marc

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-281998

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 18.11.2025

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

Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 90.1: 1-21 ISSN 0037-9603

Apports des modèles numériques d'altitude pour la géologie et l'étude des mouvements de versant

par

Michel JABOYEDOFF[1], *David GIORGIS*[2] *et Marc RIEDO*[3]

Résumé.–JABOYEDOFF M., GIORGIS D. et RIEDO M., 2006. Apport des modèles numériques d'altitude pour la géologie et à l'étude des mouvements de versant. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 90.1*: 1-21.
L'avènement des modèles numériques d'altitude (MNA) de haute résolution améliore considérablement la connaissance du territoire offrant de nouvelles représentations du paysage et de sa morphologie et ouvrant la voie à de nouvelles méthodes d'investigation. Cet article illustre quelques exemples concrets d'utilisation des MNA de haute résolution dans le domaine de la cartographie géologique, de l'analyse structurale et des dangers naturels. Les quelques exemples choisis montrent qu'à l'avenir de telles données devraient faire partie des outils de base de tout spécialiste en géosciences amené à aborder une problématique de terrain. Ces données devraient ainsi permettre d'optimiser la préparation de campagnes de terrain, de mieux formuler des hypothèses de travail et ainsi de faciliter toute approche basée sur le terrain comme la cartographie.
Les figures dans leur version couleur sont accessibles sur le site Internet:
http://www.quanterra.org/repository/repository.htm

Mots clés: LIDAR, modèle numérique d'altitude (MNA), géologie, dangers naturels, géologie structurale.

Abstract.–JABOYEDOFF M., GIORGIS D. and RIEDO M., 2006. Contribution of digital elevation models for geology and slope movement. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat. 90.1*: 1-21.
The advent of high resolution digital elevation models (DEM) improves considerably territory knowledge offering new representations of landscape and its morphological features and opening the way for new methods of investigation. This article illustrates some concrete examples of use of high resolution DEM in the field of the geological cartography, tectonics and natural hazards. The few selected examples show that in the future such data (when they exist) should form part of the basic tools of any specialist in

[1]Correspondant: IGAR–Institut de Géomatique et d'Analyse du Risque, FGSE, Université de Lausanne, Amphipôle, CH-1015 Lausanne, Suisse et QUANTERRA, Ch. de la Tour-Grise 28, CH-1007 Lausanne.
Tél: +41 21 692 35 32, E-mail: Michel.Jaboyedoff@unil.ch
[2]Service de l'information sur le territoire - SIT, Département des Infrastructures, Av. de l'Université 4, CH-1014 Lausanne.
[3]Système d'Information du Territoire Neuchâtelois, Service du cadastre et de la géomatique, Rue de Tivoli 22, CH-2003 Neuchâtel.

CODEN: BSVAA6
© Société vaudoise des Sciences naturelles
Droits de reproduction réservés

geosciences which has to approach fieldwork problematic. These data should optimize work hypothesis, facilitate field work preparation and thus any approach based on the field like the cartography.
The figures in their color version are accessible on the website:
http://www.quanterra.org/repository/repository.htm

Keywords: digital elevation model (DEM), geology, structural geology, natural hazard.

INTRODUCTION

Les modèles numériques d'altitude (MNA) permettent des représentations simplifiées du relief (topographie) à partir de points définis par les coordonnées géographiques et l'altitude. Ils sont produits par différentes technologies: photogrammétrie, levés terrestres, balayage laser ou radar (p. ex. données SRTM: voir tableau 1 pour les abréviations). Il existe principalement trois types de MNA (BURROUGH et MCDONNELL 1998):

1. Les MNA constitués par des grilles carrées régulières de valeurs d'altitude dont les coordonnées X et Y sont données par leurs positions dans une grille de maille constante (matrice).

Tableau 1.–Abréviations courantes.

Abréviations	Termes
DEM	Digital Elevation Model *Modèle numérique d'altitude*
GPS	Global Positioning System *Système de positionnement global*
LIDAR	Light Detection And Ranging
MNA	Modèle Numérique d'Altitude
MNS	Modèle Numérique de Surface
MNT	Modèle Numérique de Terrain
MNT25	Modèle Numérique de Terrain à 25 m
MNT-MO	Modèle Numérique de Terrain de la Mensuration Officielle
SIG	Système d'Information Géographique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission Mission topographique Radar par la navette spatiale
TIN	Triangular Irregular network Triangulation irrégulière

2. Les MNA constitués de points x, y, z quelconques (répartis de manière irrégulière) appelé TIN sont essentiellement utilisés par les systèmes d'informations géographiques (SIG) et les programmes de représentation 3D.

3. Les MNA constitués par des courbes de niveau qui sont en fait identiques au type (2), puisque les courbes de niveau peuvent être représentées par une ligne brisée. Néanmoins les z sont répartis dans un nombre restreint de classes et sont disposés le long des courbes de niveaux.

L'avènement récent de la technologie laser apporte de nouvelles alternatives (rapidité d'acquisition, précision, haute résolution, etc.) dans le domaine de la production de données tridimensionnelles pour les MNA. Cette technologie permet de produire le modèle numérique de terrain (MNT) représentant l'altitude au sol, ou MNA au sol, et le modèle numérique de surface (MNS) représentant le sommet d'objets naturels ou construits (toits de bâtiments, arbres, etc.), ou MNA des objets les plus élevés. Elle présente ainsi l'immense avantage de permettre une représentation précise du terrain dans des zones où la végétation peut être particulièrement dense (fig. 1).

Le potentiel d'exploitation des MNA de haute résolution est extrêmement vaste (Riedo *et al.* 2002, Gnerre *et al.* 2004, Queija *et al.* 2005) et concerne un large spectre d'applications allant de la télécommunication à la foresterie, en passant par l'aménagement du territoire, le tourisme ou encore l'hydrologie. Dans cet article nous proposons d'explorer, quelques applications potentielles du MNA de haute résolution dans le domaine de la géologie.

La technique du MNA laser

Actuellement un MNA de haute résolution est ou sera (en 2006) disponible pour l'ensemble de la Suisse occidentale au dessous de 2000 m d'altitude. L'acquisition de ces données a été pilotée par Swisstopo (Office fédéral de la topographie) en partenariat avec les différents cantons concernés. La technologie utilisée est un système LIDAR (Light Detection And Ranging), c'est-à-dire un laser aéroporté mesurant la distance entre le sol et l'avion à l'aide d'un télémètre laser (fig. 2). Afin de pouvoir attribuer l'altitude mesurée par le laser à une paire de coordonnées précises à la surface du sol, le positionnement absolu du faisceau laser est déterminé grâce aux informations enregistrées conjointement par un GPS et une centrale inertielle. De 20'000 à 100'000 impulsions laser peuvent être enregistrées à chaque seconde. Les levés sont habituellement établis par des vols à quelques centaines de mètres du sol (915 m pour les données acquises par les cantons et swisstopo). Les données sont ensuite traitées pour produire un fichier de coordonnées tridimensionnelles (x, y, z) et également, suivant les besoins, pour obtenir l'intensité du signal en retour. La densité de points bruts obtenue pour le MNT est en moyenne de

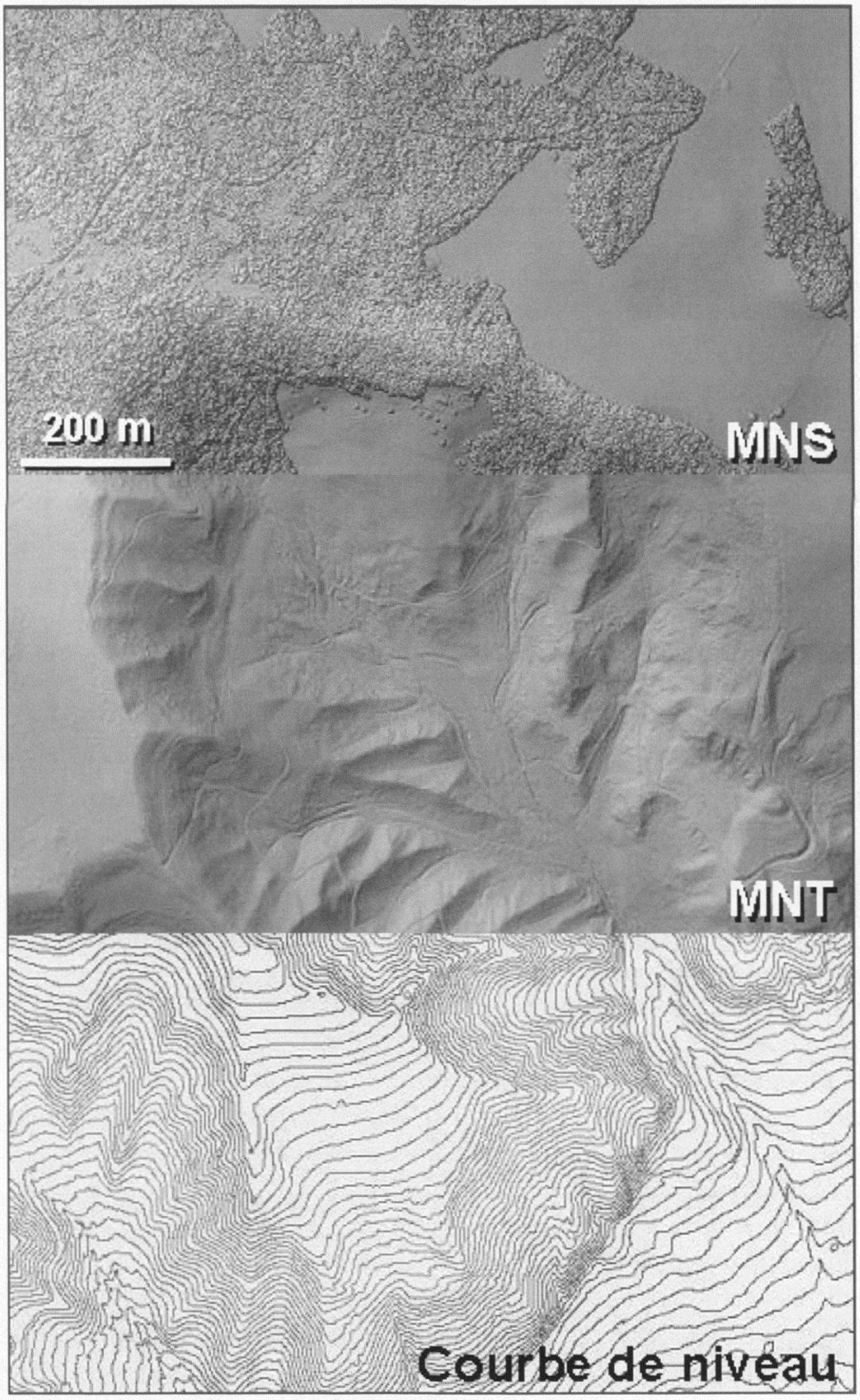

Figure 1.–Image continue présentant les différents produits cartographiques issus directement de l'interprétation des données altimétriques obtenues par laser aéroporté: Relief ombré du modèle numérique de surface à 1 m (MNS), relief ombré du modèle numérique de terrain (MNT) à 1 m, courbes de niveau à 2 m issues du MNT (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Vaud).*

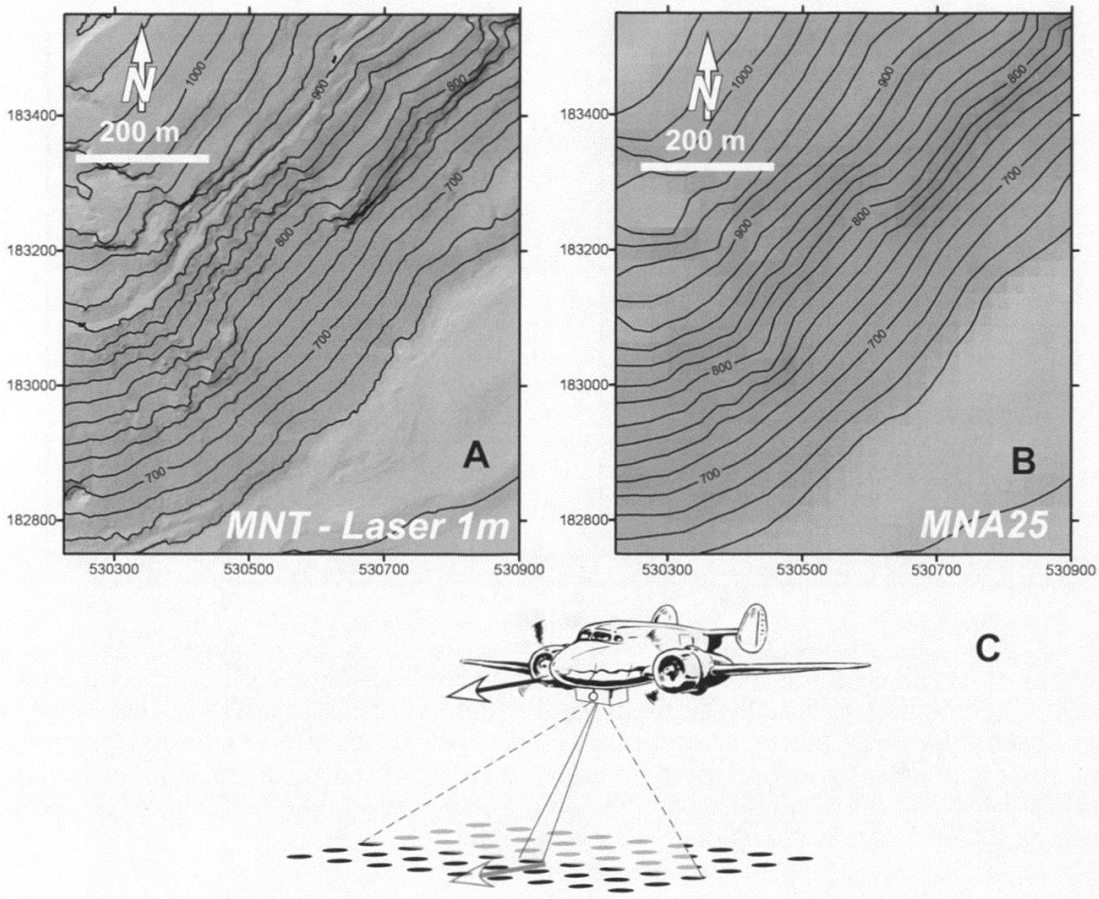

Figure 2.–Représentation ombrée du relief d'une même région géographique (les Rapilles de Baulmes) et comparaison du (A) MNT laser de haute résolution (1 m) et du (B) MNT25 (25 m). (C) Illustration du laser aéroporté.

0.4 points au sol par mètre carré ce qui améliore considérablement la résolution des précédents MNT disponibles pour toute la Suisse. En effet, le «MNT25», MNT à 25 m réalisé et distribué par Swisstopo est basé sur les courbes de niveau de l'atlas topographique suisse au 1:25'000 (fig. 2 et 3).

La précision altimétrique absolue moyenne (écart type) du MNT de haute résolution pour la Suisse est de ± 30 cm, mais elle est certainement de l'ordre de 10 cm si l'on considère l'écart relatif des points qui sont proches voisins. En d'autres termes la différence entre points proches ne doit pas être supérieure à 10 cm. A titre d'exemple, certaines représentations des données MNT de haute résolution sont actuellement visibles sous la forme de reliefs ombrés sur les sites Internet suivant: http://www.geoplanet.vd.ch et http://www.ne.ch/sitn. De nombreux sites Internet permettent d'obtenir plus d'informations sur les techniques LIDAR: http://www.lidar.com/links.htm, http://www.airbornelasermapping.com/ALMNews.html, http://www.swisstopo.ch/fr/products/digital/height/dom_dtmAV.

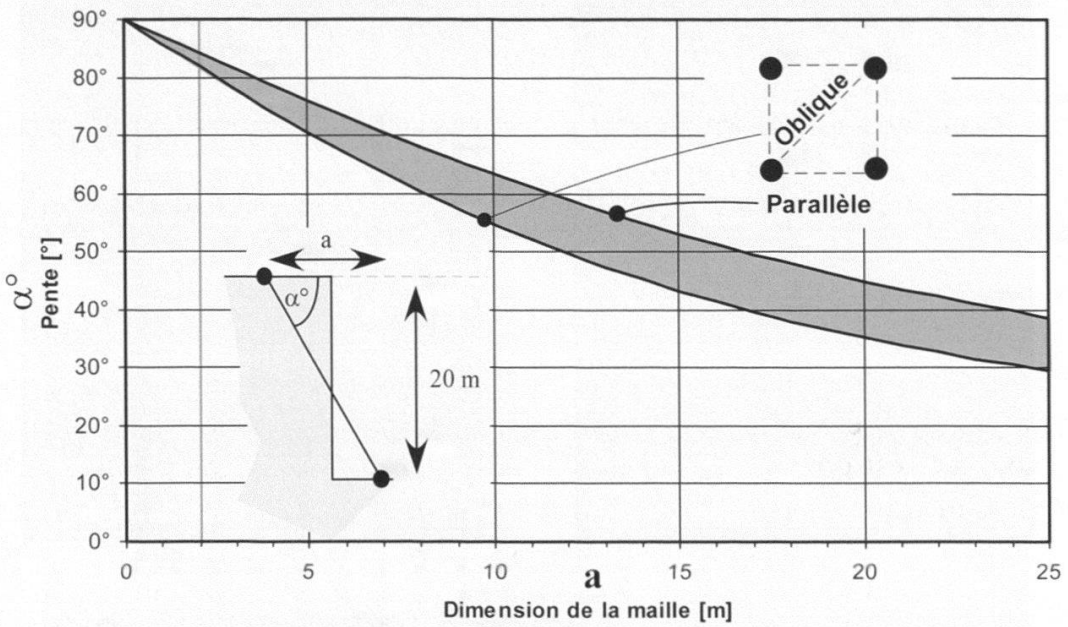

Figure 3.–Exemple de l'importance de la résolution d'un MNA pour l'estimation d'une pente. Les falaises si la taille de la maille du MNA est trop grande sont représentées par des pentes apparentes très faibles. Avec une maille de 25 m, une falaise verticale de 20 m de haut présente une pente apparente d'environ 30° à 40° suivant l'orientation de la maille de la grille d'altitude (parallèle ou oblique, c'est-à-dire à 45°), alors que pour une maille de 2 m la pente apparente est de plus de 80°.

Apport au levé de la carte géologique et géomorphologique

La carte géologique est un des documents fondamentaux de l'étude de la surface et du sous-sol. Jusqu'à présent les cartes de détails (1: 25'000) ont été levées dans nos régions sur la base de travaux de terrain détaillés. Les couples de photos aériennes ont été et sont encore utilisés lors de l'établissement de telles cartes géologiques. Cependant, seules des régions dépourvues de végétation ont, jusqu'à présent, fait l'objet de levés géologiques systématiquement assistés par des images satellites ou d'autres documents numériques.

La morphologie est l'expression combinée des propriétés géomécaniques des roches (Locat *et al.* 2000), du litage, de l'altération, des structures tectoniques (failles, discontinuités et plis) ainsi que de la nature des dépôts et des modes d'érosion particuliers (modelé glaciaire, érosion de berges, etc.). Les figures d'érosion apparaissent à toutes les échelles. Le relief ombré du MNT laser sur le plateau suisse montre des formes d'érosion tout à fait caractéristiques et identifiables par les spécialistes et que l'on retrouve sur l'ensemble de notre planète (fig. 4). Les MNT laser, dont la densité de points peut varier de 0.5 à plus de 25 pts/m^2, permettent d'observer des traits morphologiques plus fins que ceux qu'il est possible de déceler sur le terrain ou sur une carte topographique au 1:25'000. Sur l'exemple de la figure 5, pris dans le Jura vaudois au sud du

Mont-Tendre, les têtes des couches sédimentaires s'observent particulièrement bien et les strates peuvent se suivre aisément, Les discontinuités comme des failles sont facilement mises en évidence. En domaine calcaire, les dolines sont parmi les objets morphologiques les plus simples à cartographier grâce à un MNT laser de haute résolution, ceci malgré un couvert végétal important (fig. 6) (CARTER *et al.* 2001). Une première comparaison nous a montré que les cartes géologiques existantes sont souvent approximatives en ce qui concerne les localisations de dolines.

Ainsi, le MNA laser de bonne qualité permet de suivre des contacts lithologiques et les failles avec un niveau de détail supérieur à celui d'une carte géologique habituelle (fig. 5A et 5B). L'apport pour le levé de cartes géologiques est donc très prometteur. L'une des premières applications qu'il est possible d'envisager à court terme est la mise à jour des cartes existantes. La correction de la position des limites géologiques semble simple à réaliser, mais peut buter contre des difficultés liées à la base topographique standard 1:25'000. En effet, celle-ci n'est plus suffisamment précise pour exploiter la précision qu'il est possible d'atteindre grâce à un MNT laser de haute résolution, surtout depuis que le positionnement par GPS est régulièrement utilisé par les utilisateurs des cartes.

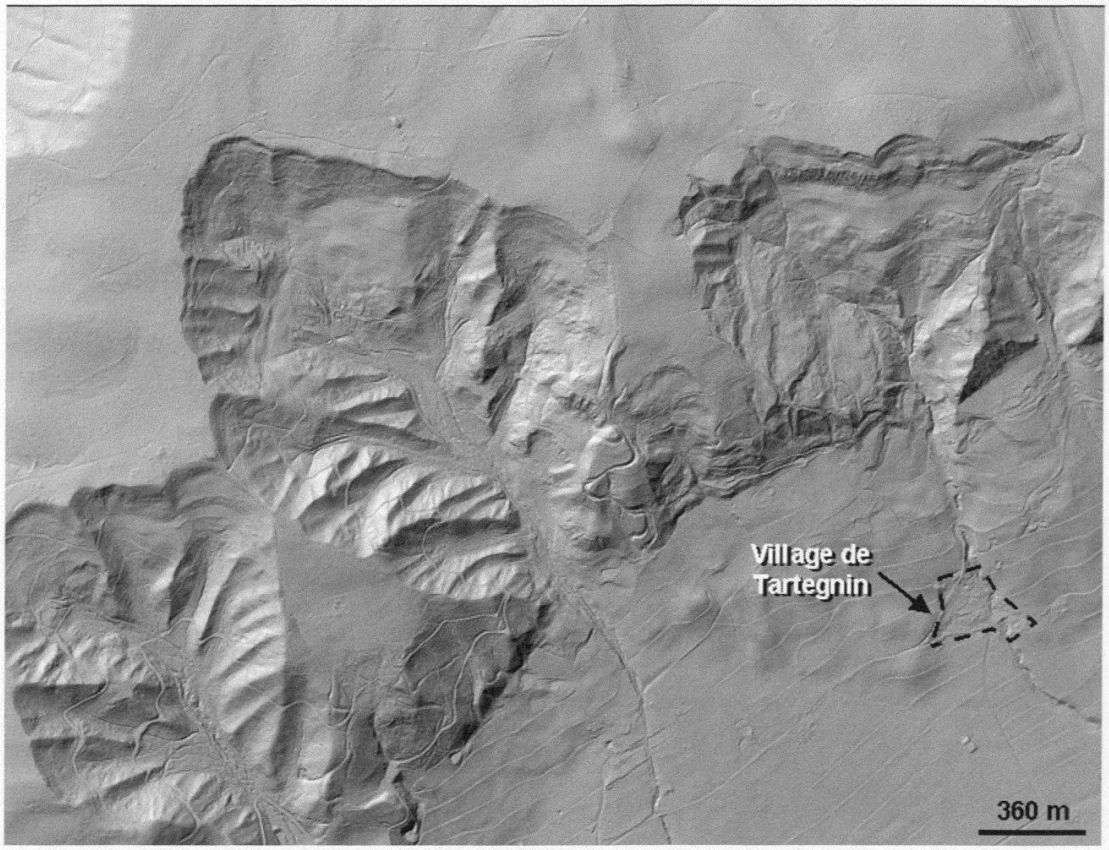

Figure 4.–Figures d'érosions dans les environs du village de Tartegnin (La Côte) (coordonnées: 512'560/147'340) (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Vaud)*.

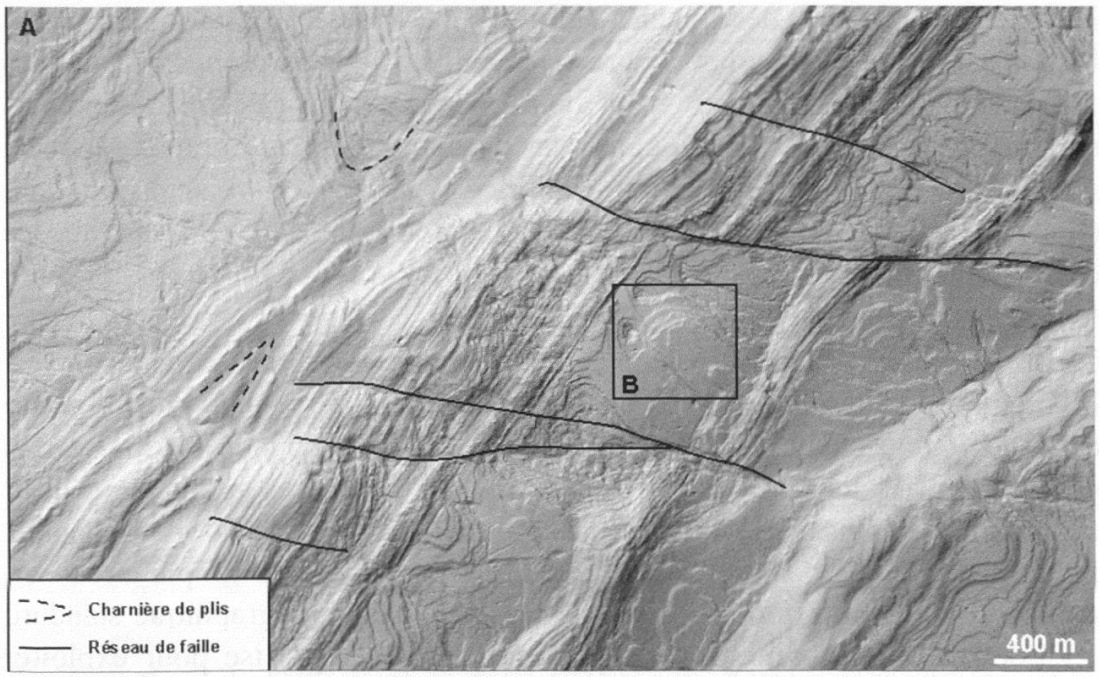

Figure 5A.–Identification et reconnaissance facilitée de failles ou de charnières de plis dans le jura vaudois (coordonnées: 512'160/159'440) (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Vaud)*.

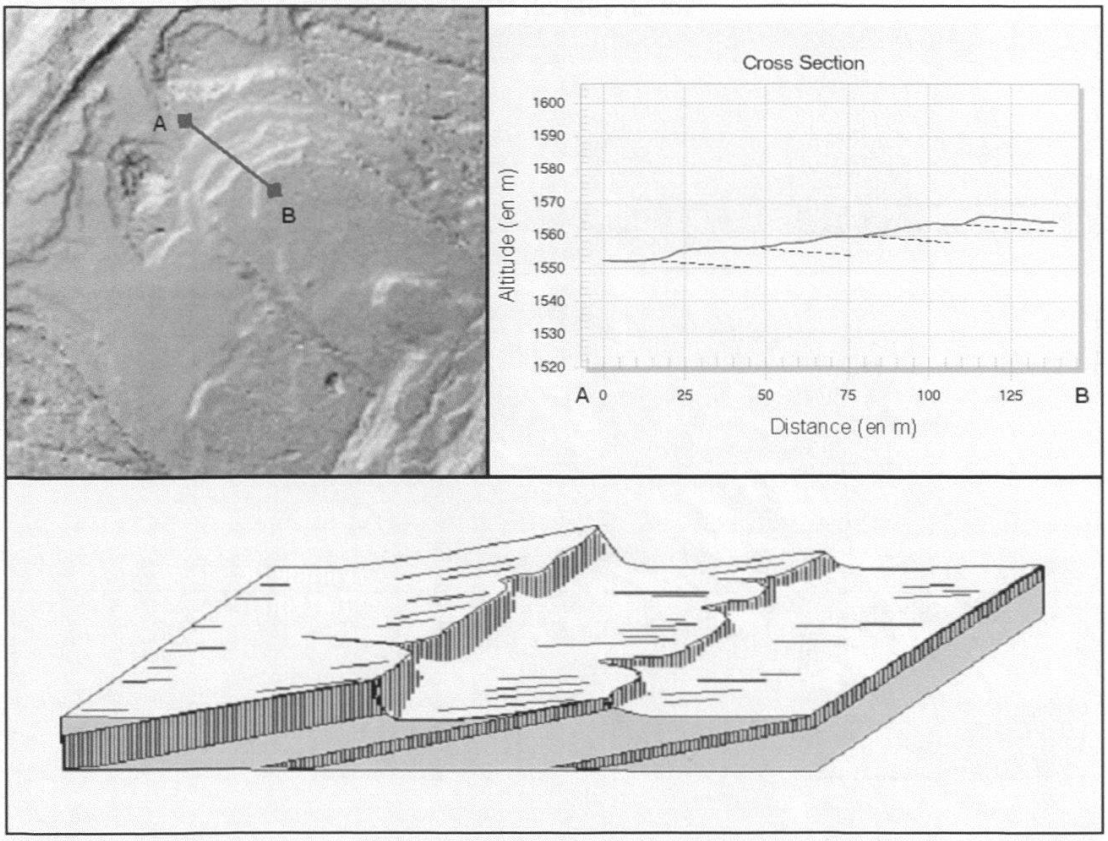

Figure 5B.–Suivi des limites des formations géologiques qui permet grâce à une coupe une estimation rapide de leurs l'épaisseurs, soit environ 6 m dans le cas présent (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Vaud*).

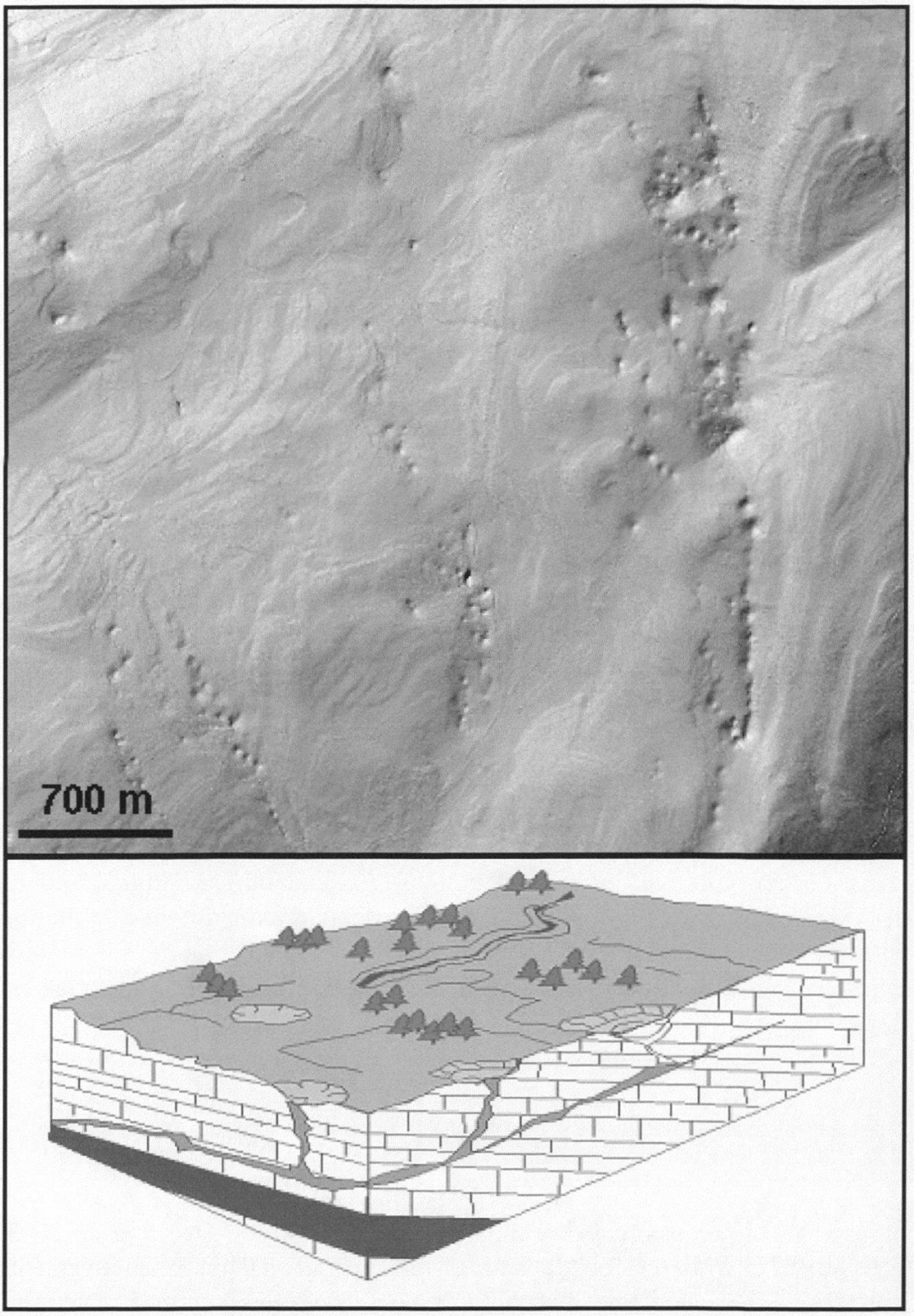

Figure 6.–Exemple d'alignements de dolines vers le NW an bas à gauche et vers le nord à droite (coordonnées: 543'800/196'400) (données sources: MNT-MO, © 2005 SIT Vaud).

La révision de cartes géologiques au 1:25'000 grâce au MNA laser de haute résolution nécessitera les travaux suivants:

- suivi et modifications si nécessaire des limites des formations reconnues;
- identification des failles;
- validation sur le terrain;
- création d'un nouveau fond topographique sur la base des données Laser;
- correction de la carte topographique 1:25'000 vectorisée (Vector25: www.swisstopo.ch) à l'aide des photos aériennes ortho-rectifiées.

Une telle approche vise à produire un document dans un format SIG supportant l'échelle 1:1'000. Ce document pourrait servir de base à une généralisation pour élaborer un document cartographique papier standard au 1:25'000.

Apport à l'analyse structurale

La restitution des pentes par un MNT laser de haute résolution est proche de la réalité. Les traits morphologiques liés à la structure permettent de les caractériser (fig. 5A, 5B et 6). Par exemple, les surfaces de couches parallèles à la topographie ou de failles sont autant d'information sur les pendages que ceux que le géologue peut relever sur le terrain. Le logiciel COLTOP-3D (Jaboyedoff *et al.* 2004, Derron *et al.* 2005), par exemple, permet d'effectuer des analyses structurales sur la base de MNA comme on peut le réaliser directement sur le terrain.

Les grandes structures peuvent être identifiées parfois plus facilement que sur le terrain (Harding et Berghoff 2000). Cependant, le nombre de points des MNA laser, n'est souvent pas suffisant pour atteindre une définition équivalente au nombre total de points visés par le laser aéroporté, car certains points ne renvoient aucun signal. Par conséquent l'information attendue est dégradée.

L'apport à la détection des mouvements de versant

L'examen du relief ombré du MNT laser permet de mettre en évidence la plupart des mouvements de versants (Schultz 1984, Haugerud *et al.* 2003, Chigara *et al.* 2004). Généralement les versants qui ont subi des mouvements gravitaires présentent une morphologie contrastée par rapport aux terrains alentours peu ou pas déplacés (fig. 7 et 8). Ce principe de dispersion des orientations de la surface topographique est un indicateur de glissements de terrain qui est utilisé par McKean et Roering (2004) pour tenter une détermination automatique des zones de glissements.

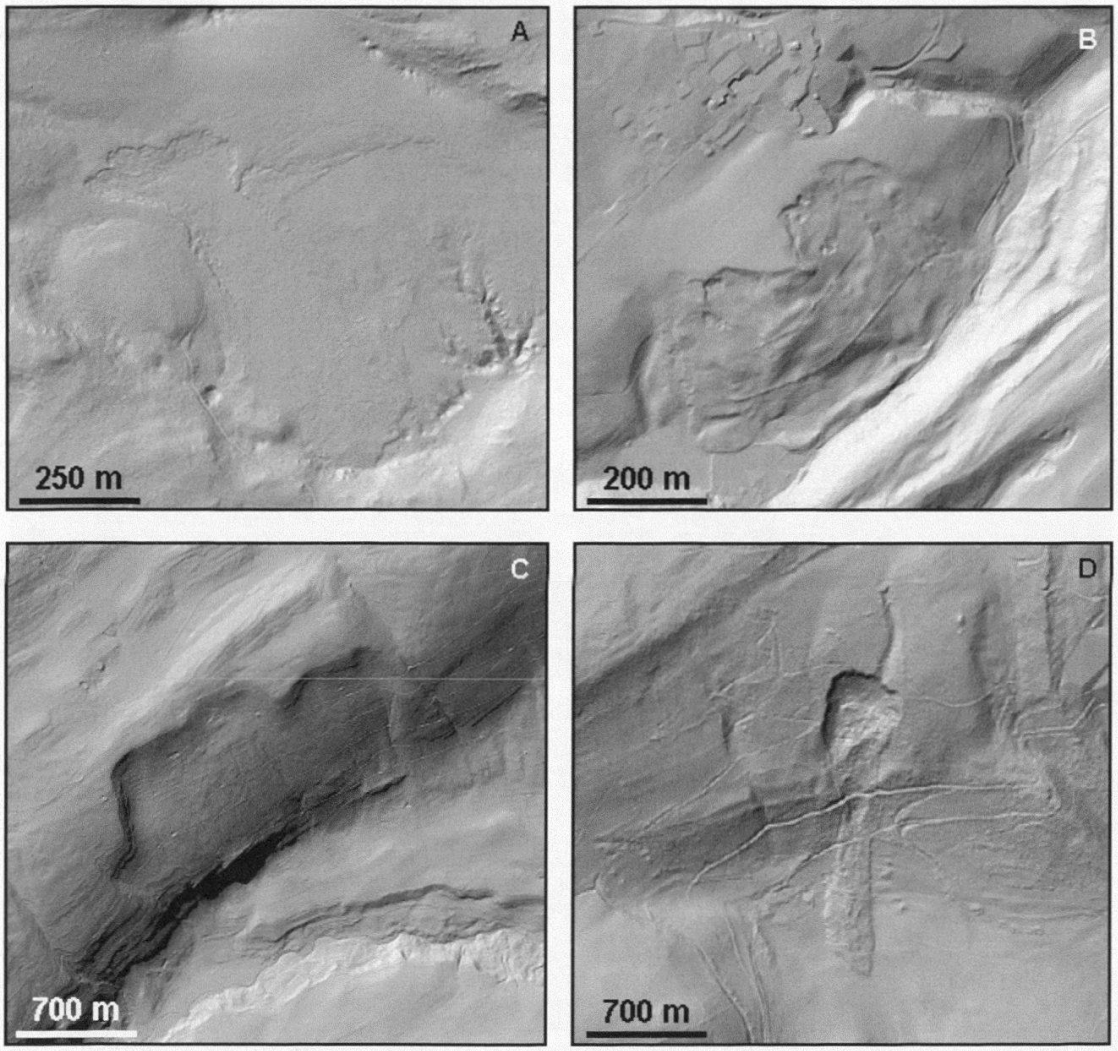

Figure 7.–Exemples de différents types de glissements de terrain et de figures d'érosion (les coordonnées correspondent au centre de chaque image): A) Figure d'érosion fluviatile soulignée par un léger relief fermé s'étant formé grâce à un emposieu servant d'exutoire pour le matériel érodé, comme le souligne les cours d'eau (525'610/188'310); B) zone de glissement de terrain (527'560/190'540); C) Niche d'arrachement d'un glissement ancien 534'500/187'200); D) Instabilité de type coulée de débris (541'740/200'240). (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Vaud* et *MNT-MO, © 2005 SIT Neuchâtel)*.

Une fois le contour d'un glissement de terrain établi à partir d'un MNT laser, son volume peut être défini en supposant que sa surface de rupture passe par les limites du glissement et que cette surface est de courbure constante. Ce calcul se fait à l'aide d'un algorithme de lissage de la topographie. Suivant les dimensions du glissement, une telle estimation peut nécessiter la diminution de la résolution du MNT pour optimiser le temps de calcul (DERRON *et al.* 2005).

Les analyses cinématiques de glissements rocheux (fig. 9) permettent de tester si un tel glissement est possible dans une direction donnée. Elles sont affinées par l'utilisation d'un MNT laser de haute résolution (JANERAS *et al.* 2004, DERRON *et al.* 2005).

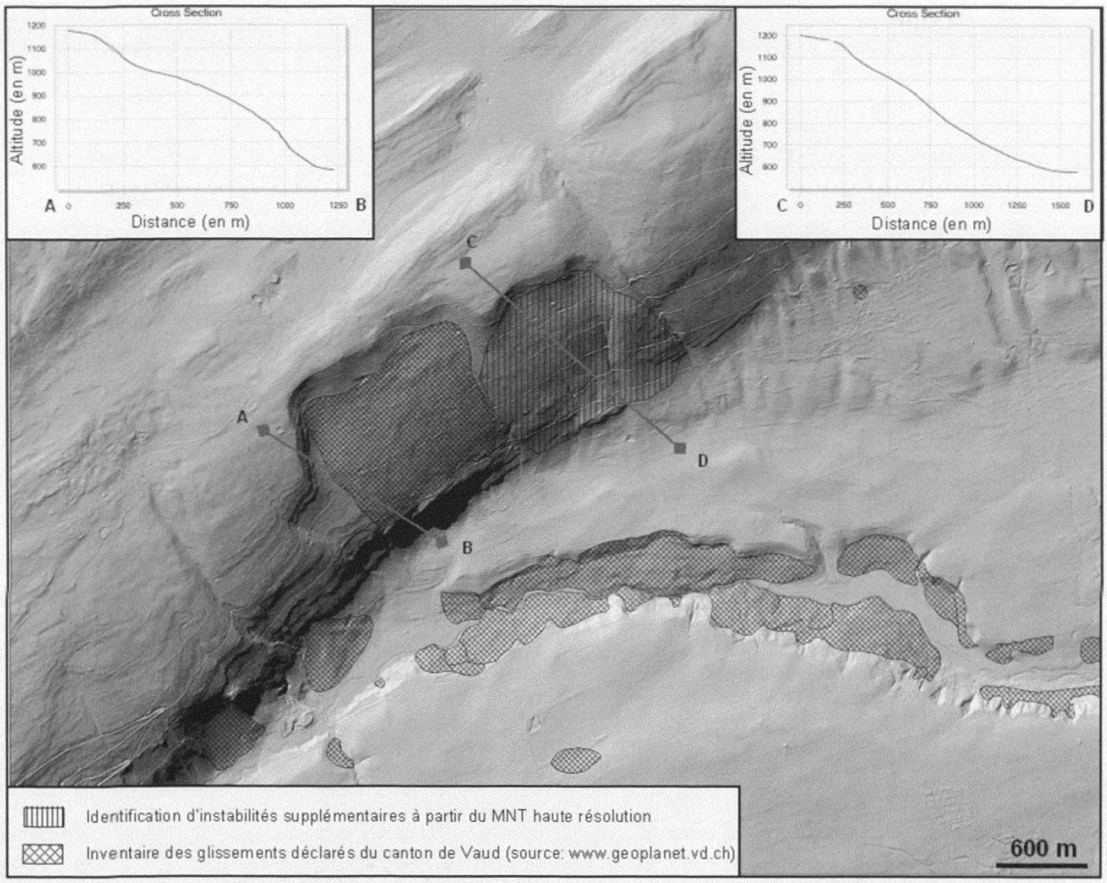

Figure 8.–Exemple d'identification facilitée de limites de glissement de terrain (voir figure 7C). Outil d'aide à la reconnaissance dans le cas d'inventaire de glissements de terrain (coordonnées: 534'910/186'550) (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Vaud)*.

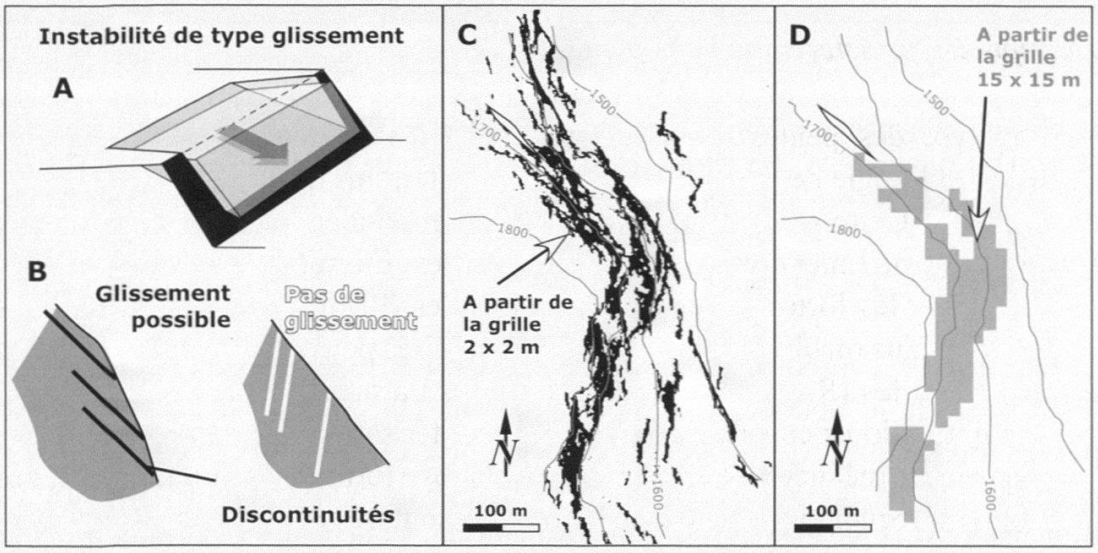

Figure 9.–Analyse cinématique de la potentialité de glissement rocheux selon 3 jeux de discontinuités 080°/65°, 020°/70° et 260°/30°. (A) Schéma du type d'instabilité recherché. (B) Illustration des conditions recherchées pour le glissement. (C) Carte des zones de glissement pour le MNT de résolution 2 m et (D) pour la résolution 15 m (modifié d'après Janeras *et al.* 2004). Noter la différence de définition: les zones de glissement potentiel basées sur le MNT 2 m sont plus restreintes en surface mais se répartissent sur un territoire plus étendus.

Apport à la modélisation des mouvements de versant

Comme nous l'avons souligné précédemment les MNA laser peuvent faciliter la détection des instabilités de versant. La détection ou la prévision des périmètres de propagation des mouvements de pentes n'est pas aisée car la plupart du temps, les événements antérieurs servant à cette prévision sont trop peu nombreux et significatifs. C'est le cas surtout pour les chutes de blocs, les éboulements, les coulées de boues et dans une moindre mesure des glissements de terrain. La simulation et la modélisation permettent de s'affranchir de ce problème. De même, les sources des coulées de débris et de boues peuvent être évaluées par des modèles géomécaniques simples (Dietrich *et al.* 2001).

Exemple du logiciel SHALSTAB

La stabilité d'une tranche de terrain représentée par un MNT peut-être calculée en effectuant un calcul de stabilité pour chaque pixel en tenant compte de l'apport d'eau qui transite par ce pixel et s'infiltre. C'est ce principe qu'utilise le programme SHALSTAB (Dietrich *et al.* 2001) établi pour évaluer la stabilité des terrains susceptibles aux coulées boueuses. Cette approche mène à une cartographie de la susceptibilité aux glissements de surface et les résultats sont d'autant plus fins que le MNT possède une petite maille. Dans ce cas là, le MNT laser améliore grandement la délimitation des zones dangereuses, en limitant en particulier l'étendue des zones de faible stabilité (Dietrich *et al.* 2001, Savage *et al.* 2004).

Exemple de caractérisation des pentes

L'analyse des pentes d'un versant révèle les propriétés mécaniques, la cohésion et l'angle de frottement apparent des terrains qui le constitue (Locat *et al.* 2000). Cette analyse permet de mettre en évidence des populations de pentes qui contiennent la plupart des instabilités. En milieux rocheux, ce sont généralement les fortes pentes qui sont instables (Rouiller *et al.* 1998), mais pour les terrains meubles, les pentes intermédiaires peuvent être celles qui sont le plus sensibles (Rautela et Thakur 1999). La précision des MNA laser a permis d'améliorer considérablement la caractérisation des pentes. La figure 10 montre un méandre de la rivière du Doubs (formant la frontière franco-suisse) pour lequel les pentes dans les marnes sont très proches de 38° et celles dans les calcaires de 64°, ce qui démontre un comportement bien défini vis-à-vis de l'érosion.

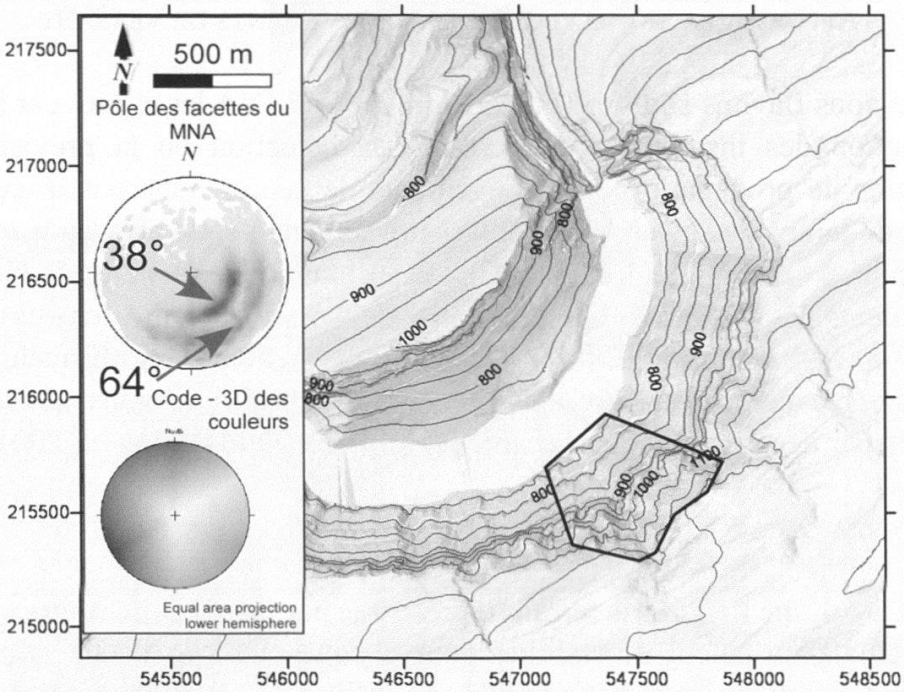

Figure 10.–Représentation des orientations selon un code de couleurs (ici grisé) qui indique l'orientation (voir JABOYEDOFF *et al.* 2004). Le stéréogramme des orientations issues du polygone indique que les barres rocheuses sont bien marquées, et la pente dans les marnes est très constante (coordonnées: 547'000/216'000) (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Neuchâtel*).

Modélisation des chutes de blocs

Les possibilités de chutes de blocs doivent souvent être évaluées préventivement, là où aucun événement de ce type ne s'est encore produit. Par conséquent, il est souvent nécessaire de faire appel à la modélisation des chutes de blocs. Elle permet d'estimer les trajectoires et les énergies cinétiques, ce qui fournit une base pour établir un zonage du danger ou pour dimensionner des ouvrages de protection, tel que cela est préconisé en Suisse (LATELTIN *et al.* 1997). Les modèles utilisés impliquent la connaissance de plusieurs paramètres dont la morphologie du terrain pour simuler les rebonds, le roulement, le glissement des blocs.

Certaines méthodes ne nécessitant pas nécessairement des MNA haute résolution permettent de caractériser spatialement les chutes de blocs. Une de ces solutions est de considérer qu'une chute de blocs peut être assimilée à un objet qui glisse sur la topographie, ce qui représente la perte moyenne d'énergie par rebond, roulement, etc. Le coefficient de frottement utilisé est équivalent à ce que l'on appelle la tangente de l'angle de friction. Cette méthode permet de faire de premières évaluations des dangers. La hauteur maximale que peut atteindre un bloc en un lieu donné est définie par un cône dont le sommet est situé sur la source des chutes de blocs et dont la pente correspond à l'angle de frottement, généralement admis entre 33-35°. Au lieu d'utiliser toute la

falaise comme zone de source de blocs, on peut la restreindre au pied de la falaise (EVANS et HUNGR 1993, JABOYEDOFF et LABIOUSE 2003). Ceci revient à supposer qu'une grande partie de l'énergie cinétique est dissipée lors du premier rebond, l'angle de frottement étant dans ce cas de 27.5°. La simulation par la méthode des cônes est en général assez prudente et conservative car elle a tendance à fournir des zones de propagation de grandes dimensions (fig. 12).

On peut aussi simuler les chutes de blocs en se basant sur les équations de la cinétique du point matériel (DESCOEUDRES 1997). La simulation peut être améliorée en y ajoutant la physique des rebonds, les glissements, les roulements, ou encore la forme des blocs (DESCOEUDRES et ZIMMERMANN 1987, DUDT et HEINDENREICH 2001). La qualité du modèle numérique de terrain joue alors un rôle essentiel, notamment en ce qui concerne la rugosité du relief, cette dernière étant d'autant plus importante avec les modèles numériques de terrain haute résolution. AGLIARDI et CROSTA (2003) ont montré qu'en 3D, les simulations des trajectoires sont d'autant plus dispersées que le résolution du MNA utilisé est élevée (fig. 11).

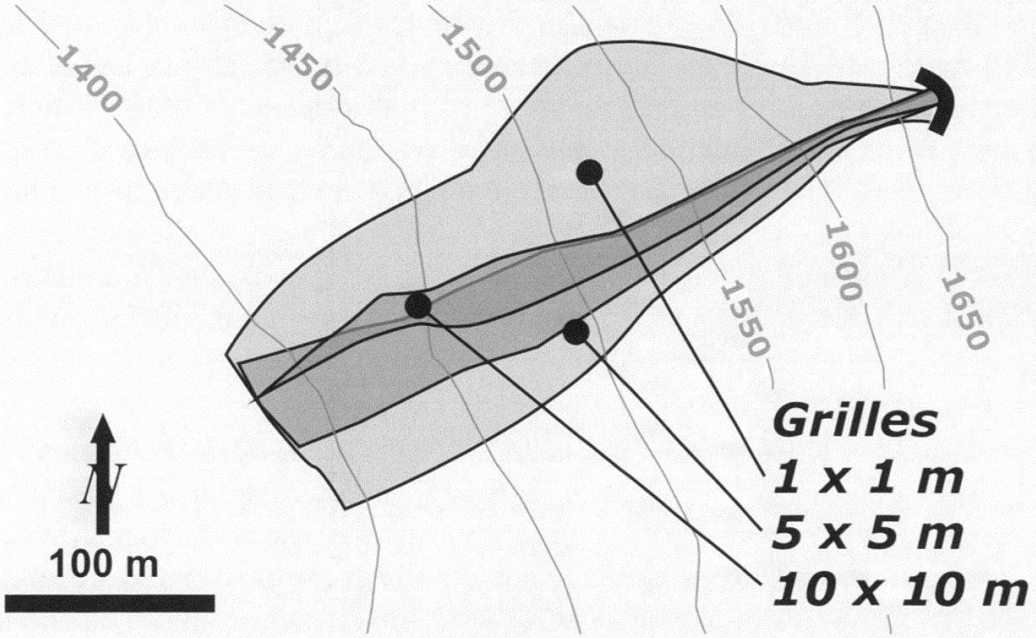

Figure 11.–Augmentation de la dispersion latérale des trajectoires selon la taille de la maille du MNT utilisé (modifié d'après AGLIARDI et CROSTA 2003). En grisé les différentes extensions de la zone de propagation en fonction de la maille du MNT.

Exemple de simulation de trajectoires de blocs

Pour illustrer notre propos nous avons réalisé, grâce au logiciel RocFall, (www.rocscience.com), des simulations en 2 dimensions basées à la fois sur le MNT25 suisse et le nouveau MNT laser 1 m. Il ne s'agit pas ici d'établir

un zonage des dangers, mais simplement de comparer l'effet de la dimension de la maille sur les résultats de la simulation. Le site choisi est le lieu dit des «Rapilles de Baulmes» qui est un éboulis actif dans la région d'Yverdon, au pied de la chaîne du Jura (fig. 1). Cet éboulis est alimenté par une petite falaise de calcaire d'âge Jurassique moyen. L'instabilité génératrice de l'éboulis est constituée d'un glissement de long des couches et par une fracturation intense.

Ce système présente deux types d'activité, l'une de type éboulis constitués de blocs de petite taille (blocs de quelques kilos à quelques dizaines de kilos) et l'autre de type chutes de blocs de l'ordre d'un mètre de diamètre.

Nous avons ajusté les paramètres de la simulation en définissant les rebonds, le glissement ou/et le roulement à partir du MNT laser 1 m (la résolution de la coupe utilisée a dû être réduite à 2 m, car le logiciel possède une instabilité numérique si les points qui définissent la topographie sont trop rapprochés). Il est apparu clairement que conformément aux observations de terrains, il fallait imposer un mouvement de roulement aux blocs de grande dimension, et un mouvement de glissement aux blocs constituant les éboulis (fig. 12).

Pour les petits blocs, les points d'arrêt simulés sont comparables pour la modélisation basée sur le MNT laser 1 m et sur le MNT25 (25 m). Les blocs s'arrêtant dans la pente et au pied de la pente, conformément à l'observation. Par contre, les énergies cinétiques maximales obtenues sont presque dix fois inférieures pour le MNT laser 1m. Cette réduction d'énergie à des valeurs plus réalistes est due à une meilleure prise en compte de la rugosité réelle du terrain. On observe la même différence pour les énergies des gros blocs. Par ailleurs, les simulations effectuées à partir du MNT laser 1m indiquent des points d'arrêt proches de l'observation, alors que les blocs ne s'arrêteraient pas avant la limite de notre coupe dans la simulation MNT25.

Dans la région du Creux du Van (canton de Neuchâtel) nous avons montré que si l'on ajoute de la variabilité au MNA25 on peut obtenir des résultats comparables à ceux obtenus à partir du MNA laser de haute résolution. Fort de cette constatation, nous avons comparé aux abords de Baulmes les MNT laser 1 m et le MNT25. Dans ce secteur, le MNT laser 1 m est en moyenne 0.8 m plus haut que le MNA25 et l'écart type de la distribution des différences d'altitude est de 3.12 m (fig. 13). Le résultat ne change pas beaucoup si l'on ajoute cette variabilité à l'altitude des points du profil utilisé pour la simulation.

La simulation par la méthode des cônes à partir de la zone source correspond mieux aux éboulis eux-mêmes, alors que la méthode qui prend le pied de falaise semble plus adéquate pour simuler des gros blocs qui roulent.

Visiblement, comme Agliardi et Crosta (2003) l'ont montré, les énergies cinétiques simulées sont généralement plus faibles lorsque le MNT est plus fin. Néanmoins, dans d'autres cas l'énergie peut aussi augmenter en fonction du type de relief: c'est ce que nous avons obtenu sur le site du Creux du Van.

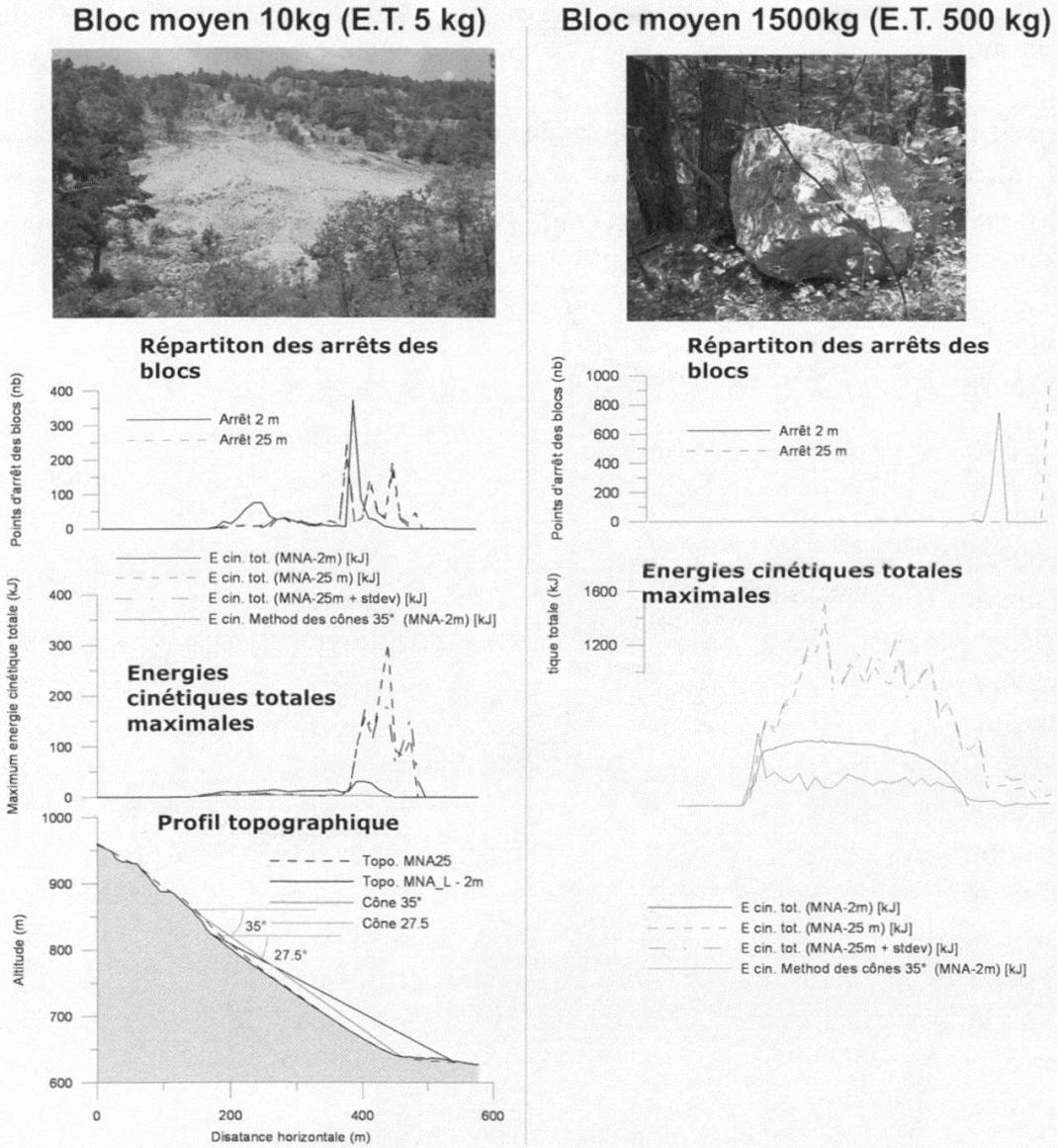

Figure 12.–Photographie du site et des blocs des Rapilles de Baulmes. En bas à gauche, coupe le long de la pente avec les angles de la méthode des cônes. A gauche, les simulations relatives aux blocs de petite taille et à droite, pour les gros blocs. Les graphiques des distributions des arrêts de bloc et des énergies sont tous effectués selon la coupe (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Vaud).*

La rugosité du terrain influence, en fonction des échelles (tailles de blocs vs rugosité de la topographie), les trajectoires en modifiant leur dissipation de l'énergie et leurs dispersions dans l'espace. Il est aussi intéressant de constater que le comportement des éboulis et de blocs est contrasté au niveau du processus, les gros blocs tendent à rouler alors que les petits semblent plutôt glisser. Ce qui implique que l'éboulis est plus proche du tas de sable (soit d'une propagation selon un cône de 35° de pente) et que les blocs respectent mieux l'angle de 27.5°.

Il est important de souligner que l'influence de la résolution du MNT est double: premièrement sur les résultats eux-mêmes, deuxièmement sur

la sensibilité de la simulation au processus physique modélisé. Un MNT de haute résolution nécessitera donc une meilleure connaissance des processus naturels générant l'objet modélisé et les principes utilisés dans les calculs. Une vérification des résultats par comparaison avec les observations de terrain doit permettre d'analyser de façon adéquate les résultats obtenus (LABIOUSE *et al.* 2001). Néanmoins, les MNA hautes résolutions fournissent des résultats qualitativement plus proches de la réalité.

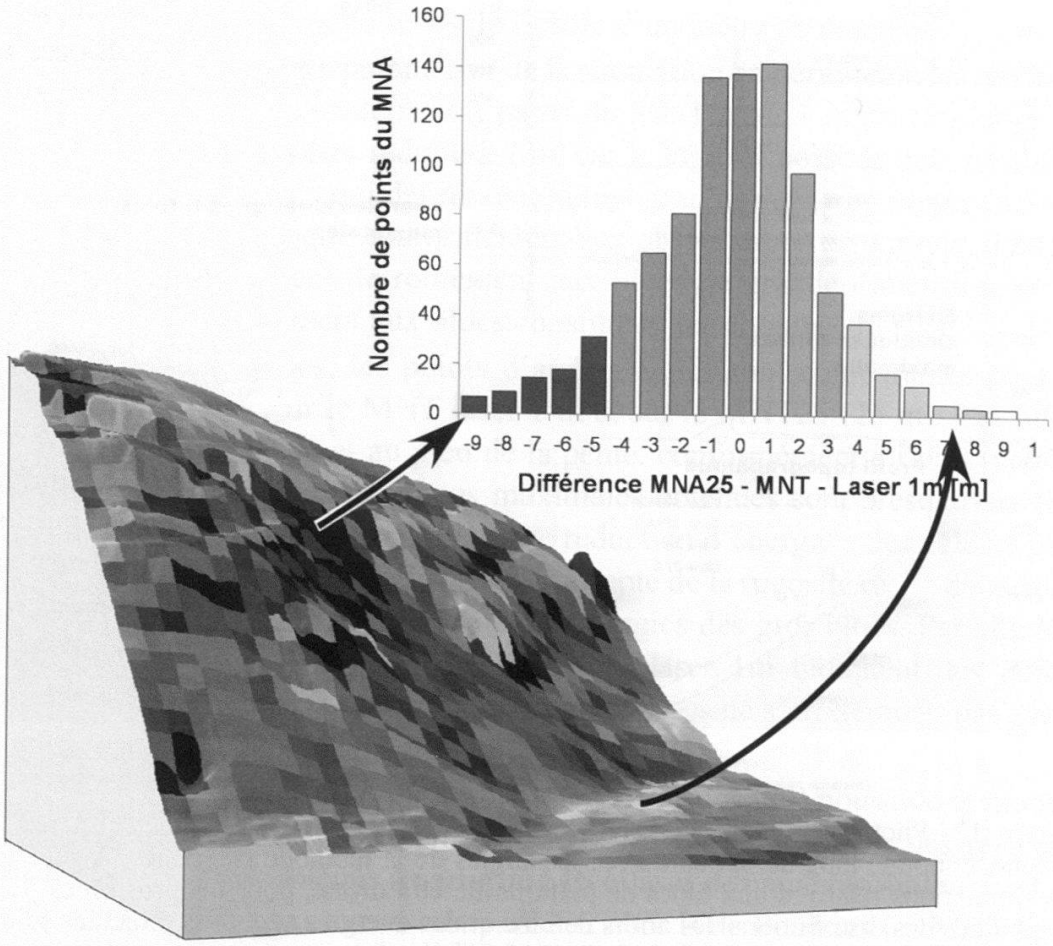

Figure 13.—Cartographie des différences entre le MNT25 et MNT laser 1m (site des Rapilles de Baulmes). La différence moyenne est de 0.8 m et l'écart type de 3.12 m. Le dégradé de couleur indique les écarts négatifs en gris foncé et positifs en gris clair (données sources: *MNT-MO, © 2005 SIT Vaud).*

COMMENTAIRES ET PERSPECTIVES

Les exemples illustrés dans cet article ne représentent qu'une petite partie du potentiel de ces nouvelles données dans le domaine des géosciences. Les avantages de ces modèles devraient permettre d'optimiser la préparation des

campagnes de terrain, de mieux cibler certaines hypothèses de terrain, et de faciliter toutes démarches cartographiques. Car l'analyse du DEM-Laser 1 m permet non seulement d'identifier et de caractériser de nombreuses structures et processus avant d'aller sur le terrain, mais aussi de déceler des traits morphologiques invisibles directement sur le terrain. De nombreuses disciplines tel que la géophysique, la géologie du quaternaire (cartographie des figures de dépôts et d'érosion glaciaire, etc.) ou encore l'archéologie pourraient profiter d'une telle définition du relief. Toutefois, la qualité des données (type d'acquisition, précision des points bruts, densité des points de mesures, etc.) doit être connue avec précision afin d'interpréter correctement les caractéristiques morphologiques révélées par le modèle. Il est d'ores et déjà possible d'obtenir des MNA avec une résolution inférieure à 30 cm si le vol s'effectue à basse altitude (DERRON *et al.* 2005, VALLET et SKALOUD 2004, www.helimap.ch).

Les modèles numériques de terrain haute résolution présentent également l'avantage de pouvoir représenter les structures géologiques en 3D permettant ainsi de positionner virtuellement le spécialiste avec des angles de vues inhabituels. Ce genre de représentation étant également un vecteur de communication intéressant lorsqu'il s'agit de valoriser le patrimoine géologique d'une région.

Dans les années qui viennent, l'évolution des technologies dans le domaine du LIDAR (gain en rapidité d'acquisition grâce aux laser portable, gain en précision, diminution constante des coûts d'acquisitions, etc.) permettra de mieux comprendre les mécanismes qui animent la surface de notre terre et de nombreuses applications dans le domaine des géosciences sont à prévoir.

REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement Jean-Luc Epard de l'Université de Lausanne et Jean-Paul Dudt de l'école polytechnique fédérale de Lausanne pour leurs corrections et commentaires, ainsi que Gilles Gachet (Lasig-EPFL), Marc-Henri Derron (Service géologique de Norvège) pour leurs discussions et conseils.

BIBLIOGRAPHIE

AGLIARDI F. and CROSTA G., 2003. High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls. *Int. J. Rock Mech. and Mining Sci. 40*: 455-471.

BURROUGH P.A. and MCDONNELL R.A., 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford. 333 p.

CARTER W., SHRESTHA R., TUELL G., BLOOMQUIST D. and SARTORI M., 2001. Airborne laser Swath Mapping Shines Lines on Earth's Topography. *Eos, vol. 82, 46*: 549-555.

CHIGIRA M., DUAN F., YAGI H. and FURUYA T., 2004. Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics. *Landslides 1*: 203-209.

DERRON M.-H., BLIKRA L.H. and JABOYEDOFF M., 2005. Norway High Resolution Digital Elevation Model Analysis for Landslide Hazard Assessment (Åkerneset, Norway). *In* SENNESET K., FLAATE K. and LARSEN J.A.: Landslide and avalanches, ICFL 2005: 101-106.

DESCOEUDRES F. and ZIMMERMANN Th., 1987. Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls. Proc. 6th Intern. Congr. of Rock Mechanics. Montréal, Canada: 337-342.

DESCOEUDRES F.,1997. Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. *Publ. de la Soc. Suisse de Méc. des Sols et des Roches 135*: 3-11.

DIETRICH W.E., BELLUGI D. and REAL DE ASUA R., 2001. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. *In* WIGMOSTA M..S. and BURGES S. J. (Eds). Land Use and Watersheds: Human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas, *Water Science and Application, A.G.U.*: 195-227.

DUDT J.P. and HEINDENREICH B., 2001. Treatment of uncertainty in a three-dimensional numerical simulation model for rock falls. *In* KÜHNE M., EINSTEIN H.H., KRAUTER E., KLAPPERICH H., and PÖTTER R., (Eds). Intern. Conf. on Landslides; impacts and countermeasures: 507 –514.

EVANS S.G. and HUNGR O., 1993. The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotech. J. 30*: 620-636.

GNERRE D., RIEDO M. et GACHET G., 2004. Exemples d'utilisation des modèles numériques d'altitude laser MNT-MO et MNS, INFO D+M, 1/2004.

HARDING D.J. and BERGHOFF, G.S., 2000. Fault scarp detection beneath dense vegetation cover : airborne lidar mapping of the Seattle fault zone, Bainbridge Island, Washington State. Proc. Amer. Soc. Photogramm. and remote Sensing. Annual Conf., Washington, D.C.: 1-11.

HAUGERUD R., HARDING D., JOHNSON S., HARLESS J. and WEAVER C., 2003. High-resolution Lidar Topography of the Puget Lowland, Washington. *GSA Today*: 4-10.

JABOYEDOFF M. and LABIOUSE V., 2003. Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics. Symposium Series - South African Institute of Mining and Metallurgy, vol. 1: 575-578.

JABOYEDOFF M., BAILLIFARD F., COUTURE R., LOCAT J. and LOCAT P., 2004. New insight of geomorphology and landslide prone area detection using DEM. *In* LACERDA W.A., EHRLICH M., FONTOURA A.B. and SAYO A., (Eds): Landslides Evaluation and stabilization. Balkema: 199-205.

JANERAS M., NAVARRO M., ARNO G., RUIZ A., WOLFGANG K., TALAYA J., BARBERA M. and LOPEZ F., 2004. Lidar applications to rock fall hazards assessment in Vall De Nuria: 4th ICA Mountain Cartography Workshop: 1-14.

LABIOUSE V., HEINDENREICH B., DEVAREUX P., VIKTOROVITCH M. et GUILLEMIN P., 2001. Etudes trajectographiques. *In* Programme Interreg IIc–«Falaises», Prévention des mouvements de versants et des instabilités de falaises. *In* CARERE K., RATTO S. et ZANOLINI F., (Ed.): Confrontation des méthodes d'études des éboulements rocheux dans l'arc alpin: 155-211.

LATELTIN O., 1997. Prise en compte des dangers dus aux mouvements de terrain dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. Recommandations, OFEE/OFAT/OFEFP. 42 p.

LOCAT J., LEROUEIL S. and PICARELLI L., 2000. Some considerations on the role of geological history on slope stability and the estimation of the minimum apparent cohesion of a rock mass. *In* BROMHEAD E., DIXON N. and IBSEN M.-L. (Eds.): Landslides in research, theory and practice. Proc. 8th Intern. Symp. on Landslides. Thomas Telford, Cardiff: 935-942.

MCKEAN J. and ROERING J., 2003. Ojective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology 57*: 331-351.

QUEIJA V.R., STOKER J. and KOSOVICH J.J., 2005. Recent U.S. Geological Survey Applications of Lidar. *Photogrammetric Eng. Rem. Sens.*, *January*: 5-9.

RAUTELA P. and THAKUR V.C., 1999. Landslide hazard zonation in Kaliganga and Madhyamahshwar valleys of Garhwal Himalaya: A GIS based approach. *Him. Geol. 20*: 31-44.

RIEDO M., GACHET G., GNERRE D., CALOZ R. et GOLAY F., 2002. Perspectives pour l'exploitation des modèles numériques d'altitude à très haute résolution. *Géomatique Suisse 6*:

ROUILLER J.-D., JABOYEDOFF M., MARRO C., PHLIPPOSSIAN F. and MAMIN M., 1998. Pentes instables dans le Pennique valaisan. Rapport final PNR31. VDF, Zürich: 239 p.

SAVAGE W.Z., GODT J.W. and BAUM R.L., 2004. Modeling time-dependant aeral slope stability. *In* LACERDA W.A., EHRLICH M. FONTOURA A.B. and SAYO A., (Eds): Landslides Evaluation and stabilization. Balkema: 23-36.

SCHULTZ W.H., 2004. Landslides mapped using LIDAR imagery, Seattle, Washington, U.S. Geol. Survey Open-File Report 2004-1396: 1-11.

VALLET J. and SKALOUD J., 2004. Development and Experiences with Fully-Digital Handheld Mapping System Operated From A Helicopter. The Intern. Archives of the Photogrammetry, remote Sensing and Spatial Information Sciences, Istanbul, Vol. XXXV, Part. B, Commission 5.

Manuscrit reçu le 20 juillet 2005