UTILISATION DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE NUMÉRIQUE ET DU MNT POUR L'ANALYSE DE LA COULÉE DE DÉBRIS DU JBEL AKROUD (MAROC NORD-OCCIDENTAL)

Mohamed MASTERE[123], Brigitte VAN VLIET LANOË[12]
Majid MANSOUR[4], Lahsen AÏT BRAHIM[3]

[1]Université Européenne de Bretagne, Bretagne. France. Mastere@univ-brest.fr
[2]CNRS, UMR 6538 Domaines Océaniques, Université de Brest, Institut Universitaire Européen de la Mer, Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France.
[3]Université Mohamed V Agdal, Faculté des Sciences de Rabat, Départements des Sciences de la Terre, Avenue Ibn Batouta BP:1014, Rabat-Agdal, Maroc.
[4]Institut National d'Aménagement et d'Urbanisme Avenue Allal Fassi. Rabat-Instituts. Rabat, Maroc.

Soumis le 18 novembre 2009 ; accepté le 21 novembre 2011 - © *Revue Télédétection*, 2011, vol. 10, n[os] 2-3, p. 147-156

Résumé

Les développements récents en matière de traitement d'images, de photogrammétrie numérique et les technologies SIG, constituent des outils de plus en plus accessibles et performants pour l'étude des mouvements gravitaires de terrain et leur évolution spatio-temporelle. Ils permettent d'avoir des vues synoptiques et répétitives de ces phénomènes à différents pas de temps. Cependant, plusieurs techniques de la télédétection spatiale, peuvent être appliquées pour le suivi de versants instables. Parmi elles, la photogrammétrie numérique qui permet la reconstitution de la topographie et l'orthorectification de clichés avec une résolution spatiale métriques. Nous avons développé et appliqué cette méthode de construction automatique des MNTs, a l'aide de la restitution des paramètres des caméras de prise de vues, pour l'étude spatio-temporelle de la coulée de débris du Jbel Akroud (Rif central, Maroc), afin de suivre son évolution sur trente ans.

Mots clefs : Photogrammétrie numérique, MNT, Ortho-rectification, coulée de débris, Rif, Maroc.

THE JBEL AKROUD DEBRIS FLOW ANALYSIS USING DIGITAL PHOTOGRAMMETRY AND DEM (NORTH – WESTERN MOROCCO)

Abstract

Recent developments in the image processing, in digital photogrammetry and GIS technology, offer increasingly accessible and effective tools for the knowledge of landslides and their evolution in time and space. They offer the possibility to have synoptic views that can be repeated at different time intervals of these phenomena. However, several techniques of remote sensing can be applied to monitor unstable slopes. Among them, digital photogrammetry that allows the reconstruction of the topography and the orthorectification of aerial photographs, bot with metric resolution. We developed and applied this method of DEMs calculation, using new techniques of image correlation and restitution of camera parameters of aerial photographs to monitor spatiotemporal evolution of the Jbel Akroud debris flow (central Rif, Morocco) over thirty years.

Key words : Digital photogrammetry, DEM, Ortho-rectification, debris flow, Rif orogeny, Morocco.

1. INTRODUCTION

Les coulées de débris sont des mouvements gravitaires généralement initiées par une venue inhabituelle d'eau, selon différentes circonstances. Il s'agit, le plus souvent, de précipitations intenses ou d'une fonte de la neige très rapide, ou exceptionnellement de fonte de glaciers ou le débordement de lacs (Innes, 1983 ; Hutchinson, 1988 ; Selby, 1993). Il s'agit de mouvements très rapides, et très soudains de grande ampleur qui se déclenchent en présence d'un stock de matériaux meubles mobilisables dans la zone de concentration des eaux (Selby, 1993). C'est le cas pour le versant sud ouest du JbelAkroud. D'un point de vue morphologique, les coulées de débris sont caractérisées par l'existence d'escarpements amont, en zone de départ des matériaux, et une zone aval de dépôt ou d'accumulation. Parmi tous les types de mouvements de terrain répertoriés, classifiés et définis dans le nord du Maroc (Mansour, 1998 ; Mansour *et al.*,

2005 ; Sossey Alaoui, 2005 ; Mastere, 2008 ; Mastere *et al.*, 2009, Mastere, 2011), la coulée de débris du Jbel Akroud constitue un cas exceptionnel par sa complexité . Cette coulée est responsable de préjudice pour le village d'Amtrass, à chaque reprise de mouvement. Son activité remonte au moins jusqu'à la fin du 19^{e} siècle.

La caractérisation géométrique et cinématique, d'un mouvement de terrain à différentes échelles, est une étape indispensable à la compréhension de la dynamique et des mécanismes de contrôle d'un tel phénomène. La télédétection spatiale s'avère être un outil particulièrement bien adapté pour cette caractérisation puisqu'elle permet d'obtenir une vision globale de l'édifice, à différentes échelles spatiales (du centimètre à la dizaine de mètres) et temporelles (quelques heures à plusieurs années), en s'affranchissant du travail de terrain. Comme les données de l'interférométrie Radar sont lourdes à mettre en oeuvre, notre méthodologie a été basée principalement sur le traitement et l'analyse des photographies aériennes validés par les données de terrain et la mémoire des habitants du village. L'utilisation des photos aériennes au Maroc est aisée, puisqu'elles existent depuis plus de 50 ans et présentent une résolution spatiale adaptée à notre sujet. Cependant, pour réaliser des études qualitatives et quantitatives à partir des photos aériennes, il est indispensable de corriger les distorsions géométriques des différentes images par une ortho-rectification. Plusieurs méthodes d'orthorectification existent depuis les années 1890 (Baltsavias, 1995), mais ce n'est qu'à partir des années 1960 que des projections optiques sont utilisées dans les procédures d'orthorectification. Les méthodes de photogrammétrie permettant de la génération automatique et numérique des images orthorectifiées apparaissent lors des années 1980 et 1990 (Goepfert, 1984 ; Powers *et al.*, 1996 ; Casson *et al.*, 2003).

Toutefois, ces méthodes nécessitent la participation et le contrôle de l'analyste menant l'étude. Néanmoins, il est le plus souvent impossible de contrôler et estimer l'exactitude et la résolution de tous les points des images orthorectifiées (Blachut et Van Wijk, 1976 ; Ducher, 1991). En effet, ces méthodes basées sur des programmes automatiques ne donnent pas possibilité de contrôler la chaine du traitement numérique des images. Par ailleurs, la plupart des logiciels commerciaux du calcul des MNT et l'orthorectification d'images sont généralement inadaptés à la précision et la résolution requises pour l'étude des mouvements de terrain à grande échelle et sont souvent trop chers pour une utilisation académique. L'ensemble des données a été spatialisé dans un SIG (ArcGis 9.3), démarche qui permet l'intercomparaison de données réparties sur différentes années et donc de suivre l'évolution du phénomène analysé au cours du temps. Ce texte présente le potentiel de la photogrammétrie numérique dans le cadre de l'étude de la coulée de débris du Jbel Akroud.

2. LE SITE D'ÉTUDE : LA COULÉE DE DÉBRIS DU JBEL AKROUD

La coulée de débris du Jbel Akroud, est située au Nord-Ouest du Maroc (Rif central) dans la région de Chefchaouen, et surplombe le village d'Amtrass (Figure 1).

Ce mouvement gravitaire sur versant, est facilement reconnaissable sur les données spatiales qu'elles soient satellitaires (haute et faible résolution) ou aéroportées. Il est présent aussi sur les cartes géologiques et géomorphologiques de la région Rifaine. Comparé à celui de Chrafate qui lui fait face au Sud, il s'agit ici d'un versant relativement assez long (environ 1,8 km) et large (Figure 2) caractérisée par une pente moyenne de l'ordre de 40° mais prend naissance au niveau d'une falaise à 75° dans les calcaires sommitaux, d'où d'importants détachements de blocs se produisent périodiquement. Ces derniers constituent de grands éboulements, juste au pied des formations calcaires, accumulés sur un petit replat tectonique calqué sur le passage du couloir de la faille de transfert de Jebha – Chrafate dans le sens d'El Hatimi, 1982 et Olivier, 1981-1982. Ce replat est considéré comme une loupe de glissement par Mansour (1998).

La série stratigraphique de ce versant est constituée du bas en haut par les marnes de base d'âge Eocène terminal – Oligocène basal, suivies d'une épaisse série de grès friables à intercalations gréso-conglomératiques de l'Oligocène supérieur – Miocène inférieur ; la série est coiffée par la succession de la Dorsale calcaire du Lias inférieur à moyen, constituée de dolomies, calcaires à silex et des calcaires massifs blancs macrodiaclasés (Figure 2). Le fait que le sommet du versant soit occupé par des formations plus anciennes (Lias) que celles de la base (Eo – Oligo – Miocène) s'explique par la présence d'un front de chevauchement subhorizontal, mettant en contact les Dorsale calcaire externe avec les terrains des nappes de flyschs. La fracturation est caractérisée par une grande densité, et s'organise autour de 2 grandes familles de directions NE-SO et NO-SE (Figure 3) (Mastere *et al.*, 2009), caractéristiques des fronts de chevauchement (fracturation normale et conjugée). Ces différentes familles de fractures sont favorables à la dislocation du massif et au déclenchement de mouvements de grande ampleur. Les dolomies et calcaires sont gélifractés (Mansour, 1998), en raison de la fracturation importante ce qui alimente les pieds de parois en petits éboulis à matrice limono-sableuse (Mastere, 2011).

La coulée d'Akroud se présente en apparence comme une coulée de blocs surdimensionnée. Cette coulée débute à l'altitude de 1720m; son matériel est composé essentiellement de blocs calcaires et de dolomies emballés dans une matrice sablo-graveleuse alors que le versant est composé de grès, marnes et conglomérats. Ce mélange contraste par sa blancheur avec le reste du paysage et avec les blocs anciennement écroulés. Elle présente à la partie médiane et aval des bourrelets latéraux bien visibles sur les photos qui attestent des caractéristiques boueuses comme une vraie coulée de débris. Il est apparemment canalisé par les petits escarpements d'un ancien ravin ou Khandek au niveau duquel coule

une résurgence karstique, Cette morphologie en gouttière permis à la coulée de s'étendre sur tout le versant jusqu'à arriver au niveau de l'oued Amtrass (Figure 2 et 4) à l'altitude 760m où il est possible d'évacuer l'eau en excès pour arrêter le processus de mobilisation (Figure 4).

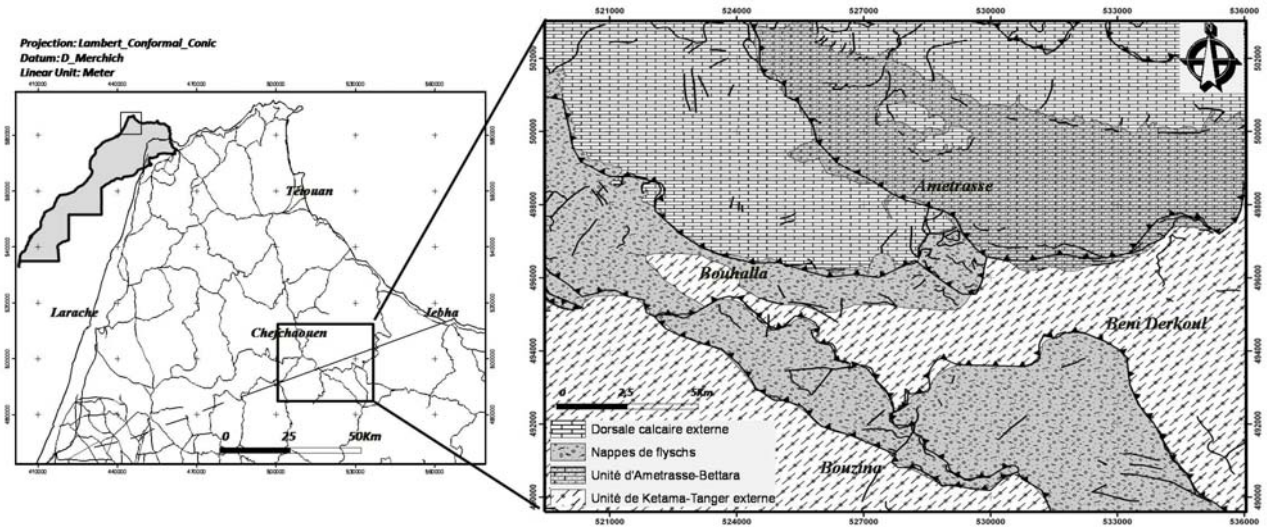


Figure1 : Situation de la zone d'étude
Location of study area

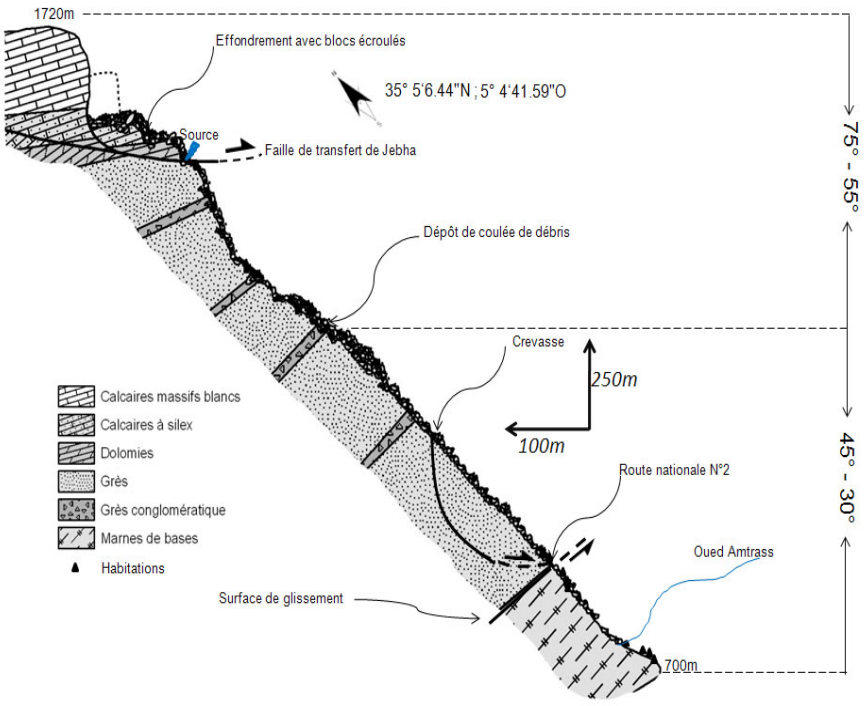


Figure 2 : Coupe schématique de la coulée de débris du Jbel Akroud, Chaouki, 1991.
Schematic section of the Jbel Akroud debris flow, completed after Chaouki, 1991.

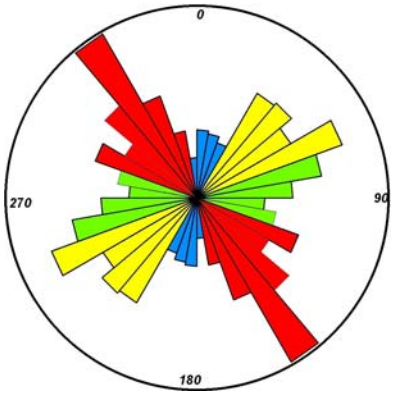


Figure 3 : Rosace issue de l'analyse statistique des directions des failles, en longueur cumulée.
Rosace obtained from statistical analysis of fault directions in total length.

Si l'on raisonne à l'échelle de la partie amont du versant, et si l'on tente de classifier ce ou cette succession de mouvements gravitaires, il s'agit, à première vue, d'un écroulement ou un éboulement en masse, puisque la taille des blocs dépasse largement les deux millions de m3 ; mais si l'on raisonne à l'échelle de l'ensemble du versant du Jbel Akroud, il conviendrait plutôt de qualifier ce mouvement de versant de coulée de débris plutôt que d'éboulement en masse, puisqu'il réunit les trois conditions de base pour la formation d'une coulée de débris à savoir (Selby, 1993) - la présence d'une pente relativement importante , - l'existence de matériaux facilement mobilisable - et finalement la présence potentielle de quantité importante d'eau (fonte de neige, résurgence). En outre, plusieurs clichés pris respectivement en 1961, 1975, 1976, 1995, et 2010 montrent d'autres phénomènes de petits glissements ou de légères reptations s'associent au mouvement principal sur le même versant, confortant un état plastique du matériel (boueux). Cette coulée qui peut être qualifiée de débris semble être régie essentiellement par l'action conjointe de la fracturation, de la résurgence d'eau et de la gélifraction (Mastere, 2011).



Figure 4 : La coulée de débris du Jbel Akroud dans son contexte géologicomorphologique (vue d'ensemble, Photo prise à l'entrée du village d'Amtrass). **ESA** : écaille sommitale de la nappe d'Akroud, **CA** : contact anormal entre, **FCS** : formations des calcaires sommitaux, et **SGC** : séries gréso-conglomératiques, **EP** : escarpement principal, **S** : source, **RGC** : ravinement dans les formations gréso-conglomératiques, **RIr** : replat intermédiaire, **VA** : village d'Amtrass, **RI** : replat inférieur, **OA** : oued Amtrass, **FC**: front de la coulée, **R** : route.
*The Jbel Akroud debris flow in its geological and morphological context (overview, picture taken in entrance of the Amtrass village. **ESA** : summital scale of the Akroud slick, **CA** anormal contact between: , **FCS** : summital limestone formations, and **SGC** : sandstone and conglomerate series , **EP** : main escarpment , **S** : source, **RGC** : gully in sandstone and conglomerate formations, **RIr** : intermediate shelf , **VA** : Amtrass, Village, **RI** : lower shelf , **OA** : Amtrass river, **FC**: front of the casting , **R** : road .*

3. MÉTHODOLOGIE

Jusqu'à ce jour peu de travaux ont mis à profit les avantages de la photogrammétrie numérique dans le domaine des risques géomorphologiques tels que des mouvements gravitaires. La tâche principale restant pour l'instant est le développement des techniques et des matériels. Plusieurs chercheurs ont défini, en utilisant la photogrammétrie numérique, les vecteurs de déplacements sur la base d'un certain nombre de repères naturels identifiés sur deux clichés aériens. Ceci a permis aussi d'établir des cartes de déformations superficielles et de mesurer le déplacement d'éléments remarquables de la surface topographique sur des sites instables (Miller *et al.*, 1985 ; Weber et Herrmann., 2000 ; Casson *et al.*, 2003 ; Casson *et al.*, 2005 ; Van Ash *et al.*, 2006 ; et Méric *et al.*, 2007 …). La méthodologie adoptée est basée sur la construction automatique des MNTs à partir des couples stéréoscopique, et l'orthorectification des photoaériennes permettant de projeter chaque image dans un même référentiel, afin de poursuivre l'activité spatiotemporelle d'un mouvement de terrain (Erratrice., 2001 ; Hapke, 2005).

Pour orthorectifier nos clichés, nous avons eu recours à la construction d'un MNT (Figure 7) à partir de couples stéréoscopiques d'images aériennes, dont le détail de la démarche est illustrée par les deux figures 5 et 6. La précision et la résolution du MNT doivent être les plus fines possibles, afin de pouvoir réaliser des suivis précis des mouvements de terrain. Dans notre cas et selon nos moyens, ces dernières sont d'une résolution métrique. La réalisation du MNT comprend généralement deux grandes étapes (Panton, 1978 ; Moffitt *et al.*, 1980 ; Casson *et al.*, 2003 ; et Casson *et al.*, 2005): la corrélation ou reconnaissance des points homologues sur les images du couple stéréoscopique puis la construction du MNT au sens strict grâce aux formules photogrammétriques. Deux types de problèmes peuvent être rencontrés lors de la construction d'un tel MNT : il est en effet indispensable de calculer avec une grande précision les paramètres d'acquisition (position et angles de caméras) des images et de corriger les distorsions liées à la topographie locale du secteur d'étude (Figure 6). Les différents traitements que nous avons réalisés, ont été faits à l'aide de trois logiciels dont l'utilisation et l'enchaînement sont illustrés ci-dessous (Figure 5).

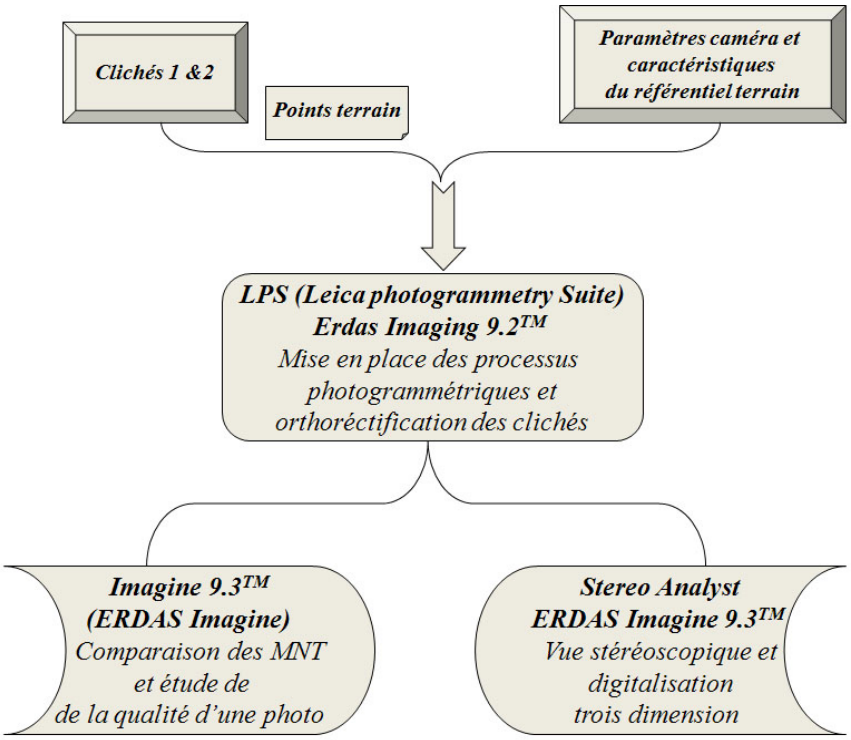


Figure 5 : Différents logiciels et étapes pour la construction des MNT et des orthoimages.
Various steps and software's for DEMs and orthoimages construction.

La résolution du MNT est métrique pour une précision moyenne inférieure à 3 m. En outre, l'intérêt de cette méthode est l'obtention d'une carte de précision du MNT, qui associe une précision de positionnement à chaque point. Les images aériennes sont alors projetées, grâce au MNT (le plus ancien), dans un même référentiel (repère) donné (Figure 7) et des mesures de déplacement d'une précision de quelques mètres sont réalisables. L'avantage majeur de cette technique d'orthorectification d'images aériennes est de permettre la comparaison de données de différentes années et donc poursuivre précisément l'évolution d'un mouvement de terrain au cours du temps.

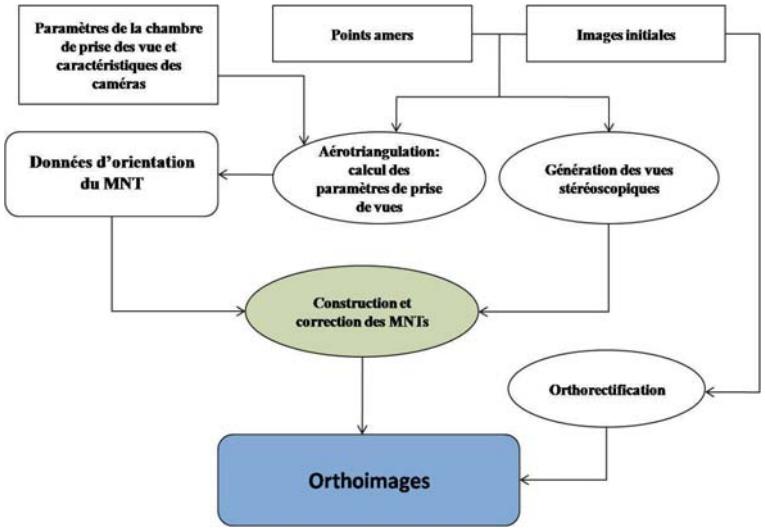


Figure 6 : Étapes pour la réalisation des orthoimages à l'aide des traitements photogrammétriques.
Steps to achieving the orthorectified images using photogrammetric treatments.

Traitement de l'ensemble des données

Nous avons sélectionné quatre couples stéréoscopiques de photographies aériennes pour les années 1965, 1978, 1988, et 1995, de notre base de données. Ces images ont été acquises au-dessus du Jbel Akroud (Figure 4). Ces dernières couvrent une période de 30 ans avec une résolution temporelle allant de 7 à 13 ans. Les images analogiques sont numérisées afin d'obtenir une résolution spatiale d'environ 1m (Tableau 1).

Tableau1 : Caractéristiques des photographies aériennes utilisées.
Characteristics of used aerial photographs.

Année	Chambre de prise de vue	Dimensions des clichés	Échelle	Résolution au sol
1965	Gylor à plaques 23A	19 *19 cm	1/25 000ème	1 mètre
1978	Wild RC10 15UAg	23*23 cm	1/30 000ème	0.99 mètre
1988	Wild RC10 21 NAg11	23*23 cm	1/17 000ème	0.55 mètre
1995	Zeiss RMK Top 15	23*23 cm	1/30 000ème	0.99 mètre

Pour chaque année, un MNT et une image orthorectifiée sont générés (Figure 7A & B). Puis différents MNT et différentes images orthorectifées, sont comparés afin de suivre l'évolution de la coulée de débris du Jbel Akroud. Le tableau 1 résume les principales informations relatives aux photographies numérisées.

Construction du MNT

La topographie peut être déduite à partir de deux photographies aériennes (couple stéréoscopique) acquises pour la même zone. Chaque point de la première image doit être reconnu sur la seconde par des techniques de corrélation (Wood, 1983 ; Erratrice, 2001 ; et Henry *et al.*, 2002). Ensuite, il faut déterminer la valeur de la parallaxe et en déduire l'élévation du point. La qualité finale du MNT est donc directement fonction des performances du corrélateur. Les erreurs sont particulièrement fréquentes dans les zones à radiométrie faiblement contrastée comme les zones d'ombre ou les terrains enneigés (Hannah, 1989 ; Weber et Herrmann, 2001). L'aérotriangulation constitue une étape fondamentale pour la qualité ultérieure des modèles numériques de terrain. Elle représente le processus de calcul des paramètres de prise de vue, à savoir : l'orientation et la position de la chambre de prise de vue dans l'espace, à partir des données objet et image des points de calage. Des équations reliant ces deux types de cordonnées peuvent être automatiquement éta-

blie, à l'aide du module "LPS digital photogrammetry package from the image processing software ***Erdas Imaging*** 9.2^{TM},,

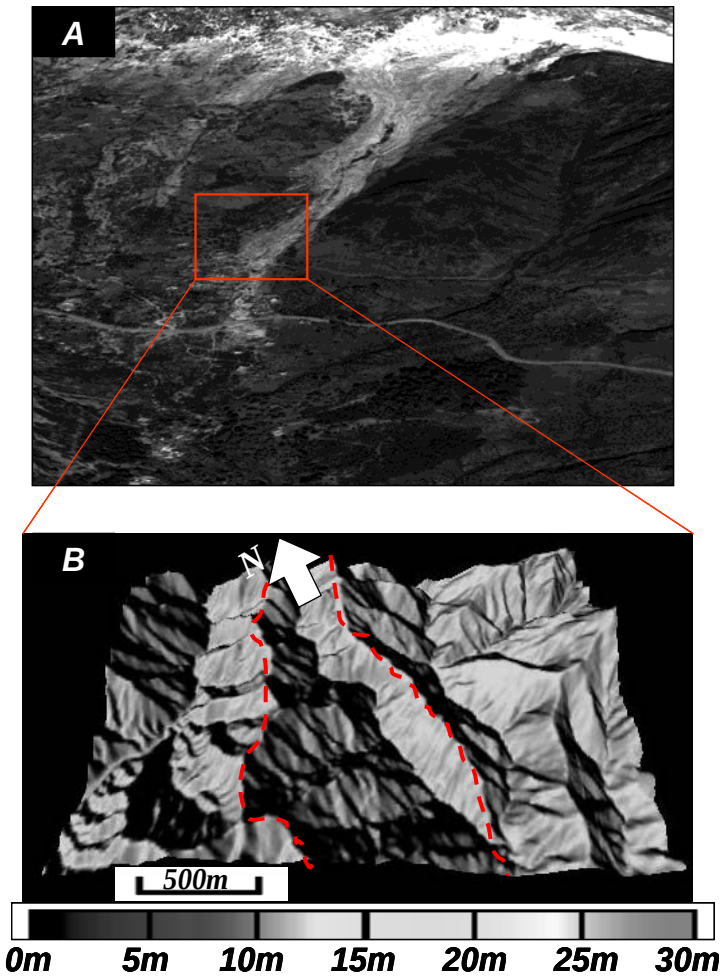


Figure 7 : A : Image orthorectifiée de la coulée de débris du Jbel Akroud accompagnée d'une partie de la carte de précision du MNT B.
A: the Jbel Akroud debris flow orthorectified image with a portion of a DEM accuracy map B.

Données terrain et recalage des MNT

La comparaison des différents reliefs calculés implique un recalage fin des MNTs entre eux, aussi bien en altimétrie qu'en planimétrie. Les décalages observables s'expliquent essentiellement par la quantité et la qualité moyenne des points de calage utilisés dans la phase initiale d'aérotriangulation (Gruen et Murai, 2002). C'est pour cette raison qu'un recalage postérieur des quatre MNTs a été réalisé à partir des données d'une campagne de mesures par GPS (Global Positioning System). L'opération consiste à déterminer sur le terrain avec une précision planimétrique et altimétrique de quelques centimètres les coordonnées géodésiques d'une douzaine de points de contrôle supposés stable, nettement identifiables sur les différents clichés et bien répartie sur tout notre secteur d'étude. L'intégration des ces points dans les quatre grilles altimétriques a finalement permis d'obtenir une bonne superposition géométrique des MNTs. Par ailleurs, les différents MNTs ont été projetés dans un référentiel caractérisant la zone du Maroc Nord. Il s'agit du référentiel ''Lambert Conformal Conic Zone I'', du datum ''Merchich''.

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'analyse multi-temporelle des quatre MNTs et des clichés orthorectifiés correspondants, a permis d'obtenir plusieurs informations sur l'évolution géomorphologique de la coulée de débris du Jbel Akroud, en permettant notamment de situer les différentes périodes de réactivation de ce massif, et par conséquent les périodes de déclenchement des écroulements survenus sur ce versant entre 1965 et 1995. Les photographies aériennes de 1965 montrent un secteur qui a été affecté par plusieurs écroulements qui s'étaient déjà déclenchés. Cependant les accumulations de matériaux principalement gréseux-marneux n'allais pas en deçà de la côte 750m (Figure 8), alors que les blocs calcaires et dolomitiques à l'amont de la route, étaient largement représentés. Sur les photoaériennes de 1978 une nouvelle reprise du mouvement

est observée, déclenchée par l'hiver 1970 selon les habitants du village. Malheureusement, nous n'avons pas pu établir un lien entre le rôle des précipitations et le déclenchement de l'écroulement de cette période (station météorologique régionale hors service). Par contre nous serons tentés de faire le lien entre cet écroulement et le séisme de magnitude 7.3 sur l'échelle de Richter enregistrée le 28 Février 1969 à 400 km de la côte marocaine. Les écroulements successifs de paquets de la dorsale calcaire est accompagné à l'intérieur du ravin par des éboulements des séries marno-gréseuses de plus en plus disloqués à cause de fragilité mécanique (sables gravelo-argileux). Les blocs et gélifracts calcaires s'étallent sur la pente moins forte et viennent recouvrir une grande partie des matériaux marneux-gréseux déjà déstabilisés. D'autre part, la partie marneuse du versant se mobilise également suite à l'élargissement de la route (sappement) : une crevasse coudée est apparue au-dessus de la route (Figure 8). Néanmoins, en comparant les MNTs et les orthophotos de 1978 et 1988, une stabilité apparente du versant semble correspondre à l'état actuel du versant jusqu'en 1995. Les photoaériennes de 1995, montrent une nouvelle phase de réactivation de l'ensemble du versant de Jbel Akroud. Cette réactivation se traduit par le détachement d'un certain nombre de pans calcaires (Figure 8) accompagnés d'un hémi glissement rotationnel affectant les séries marneux-gréseuses de basse, ce qui a affecté la route. Depuis 1995 jusqu'aujourd'hui la coulée de débris du Jbel Akroud montre une stabilité qui sera probablement perturbée par la reprise des fortes précipitations observées au Maroc depuis 2007.

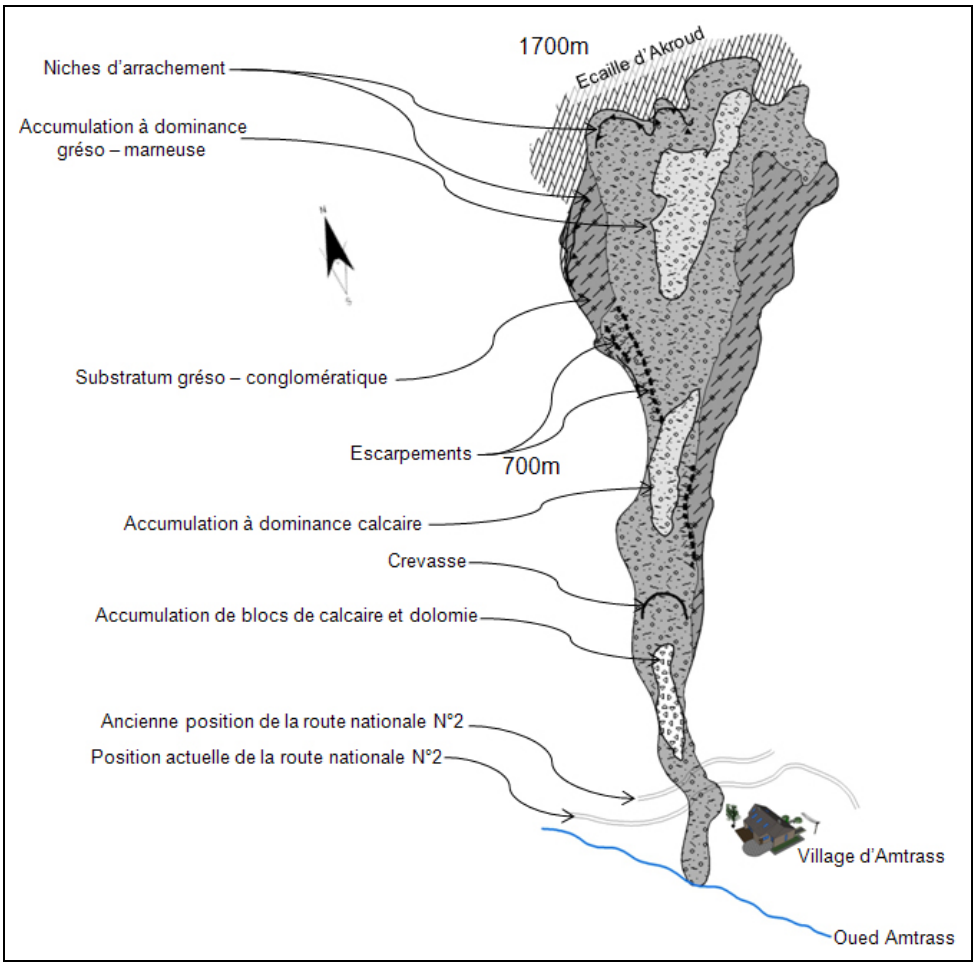


Figure 8 : Schéma montrant l'évolution du versant d'Akroud depuis 1965 jusqu'à Aujourd'hui.
Diagram showing the Akroud slope evolution since 1965 until now.

La méthodologie appliquée semble particulièrement efficace pour la surveillance des mouvements de terrain situés dans des contextes géodynamiquement instables. Ici, il s'agit du couloir de l'accident majeur de Jebha, dont l'activité contrôle la réactivation du Jbel Akroud affecté déjà par une forte densité de fracturation, ce qui augmente indirectement la susceptibilité pour le déclenchement de cette coulée de débris. Le potentiel de cette méthode est souligné ici, pour étudier l'évolution, ainsi que caractériser la géométrie d'un mouvement gravitaire. Sans nier la nécessité d'investigations géophysiques afin de comprendre d'avantage le comportement interne d'un mouvement de terrain, la photogrammétrie numérique ou toute autre techniques de la télédétection spatiale peut être une bonne alternative et une méthode complémentaire dans l'étude de mouvements gravitaires potentiels et leur dynamique d'occurence. En effet, le mécanisme interne de la coulée de débris du Jbel Akroud ne peut être que partiellement appréhendé par les données de surface. Notre étude a été réalisée en 2D avec des hypothèses dynamiques déduites à démontrer. Elle implique que la réactiva-

tion de l'intense fracturation récente (Mio-Plio-Quaternaire) de la zone peut constituer un facteur de prédisposition dominant pour le déclenchement des écroulements, hypothèse réaliste à l'échelle de la coulée de débris en elle-même. D'un point de vue méthodologique, la photogrammétrie numérique est assurément appelée à être un outil d'étude essentiel pour l'évaluation des risques géomorphologiques, vu qu'elle permet de définir avec une très haute résolution à travers des MNTs de plus en plus précis, le relief des terrains et son évolution dans le temps. Nous avons pu disposer pour le mouvement gravitaire complexe du Jbel Akroud, de photographies suffisamment anciennes, ce qui nous a permis de comprendre les différents processus qui s'y succèdent et s'y superposent. Qu'elle reste purement descriptive ou qu'elle prenne une dimension quantitative, nous pensons que la démarche exposée peut être élargie à de multiples autres problématiques de gestion et d'aménagement du territoire liées à l'évolution des paysages. C'est le cas de la protection civile dans les zones exposées aux risques géologiques, permettant un traitement rapide de l'information et une aide à la décision en cas de risque éminent.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre de l'action intégrée N° AI-192-08, entre l'Institut Universitaire Européen de la Mer (Brest, France), et la Faculté des sciences d'El Jadida, et en collaboration avec la Faculté des Sciences de Rabat. Il a été financé par une allocation de recherche EGIDE (partenariat Huber Curien Volubilis 17174P) d'une part et une bourse d'excellence du gouvernement marocain gérée par le CNRST. Les résultats de ce travail ont été présentés pour la première fois lors de l'AJS de l'AUF qui a pris en charge le financement total du premier auteur. Cependant, les auteurs souhaitent remercier les correcteurs anonymes pour leurs remarques justifiées et fort constructives qui ont permis d'améliorer la qualité de cet article.

Références bibliographiques

Blachut, T.J., Van Wijk, M.C. 1976- Results of the International Orthophoto Experiment 1972– 76. PERS 42 (12), 1483– 1498.

Baltsavias, E.P. 1995- Digital ortho-images—a powerful tool for the extraction of spatial- and geo-information. ISPRS J. Photogramm.Remote Sens. 51, 63– 77p.

Casson, B., Delacourt, C., Allemand, P.2005-Contribution of multi-temporal remote sensing images to characterize landslide slip surface – Application to the La Clapière landslide (France), Natural Hazards and Earth System Sciences, 5, 425-437p.

Casson, B., Delacourt, C., Allemand, Baratoux., P.D. 2003- Seventeen years of the ''La Clapiere'' landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs, Engineering Geology, 68, pp. 123–139p.

Ducher, G. 1991- Test on orthophoto and stereo-orthophoto accuracy. OEEPE Official Publication, vol. 25. Institute fuer Angewandte Geodaesie, Frankfurt. 227 p.

El Hatimi, N. 1982- Contribution à l'étude géologique et structurale de la région d'Assifane (RIF, MAROC). Doctorat, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat. 133p.

Erratrice, J.F. 2001- Glissement de la Clapière. Comparaison des MNTs de 1970 à 1997, Journées de mécanique des Sols et des Roches des LPC, Laboratoires des Ponts et Chaussées, Nancy, 2001.

Goepfert, W. 1984- Methods, accuracy requirements and applications of digital image rectifications. Proc. of 39th Photogrammetric Week. Institute of Photogrammetry, Univ. of Stuggart,179– 185p.

Gooch M, J., Chandler, J. H., et Stojic, M.1999- Accuracy assessment of digital elevation models generated using the ERDAS IMAGINE ORTHOMAX digital photogrammetric system. Photogrammetric Record, 16(93): 519–531 (April 1999).

Gruen, A., and Murai, S.2002- High-resolution 3D modelling and visualization of Mount Everest, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 57, pp. 102– 113.

Hapke., C-J. 2005- Estimation of regional material yield from coastal landslides based on historical digital terrain modelling. Earth Surface Processes and Landforms 30, 679–697.

Hannah, M-J.1989- A system for stereo image matching. In: ASPRS journal of Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 55 (1989), Nr. 12, 1765–1770 p.

Henry, J.B., Malet, J.P., Maquaire, O., Grussenmeyer, P. 2002-The use of small-format and low-altitude aerial photos for the realization of high-resolution dems in mountainous areas: Application to the Super-Sauze earthflow (Alpes-De-Haute-Provence, France) Earth Surface Processes and Landforms, 27 (12), 1339-1350 pp.

Hutchinson, J.N. 1988- General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrology. Proceedings 5th International Symposium on Landslides, Lausanne, 1: 3-35p.

Innes, J-L. 1983- Lichenometric dating of debris-flow deposits in the Scottish Higlands. Earth Surface Processes and Landforms, 8: 579-588p.

Leica Photogrammetry Suite Project Manager User's Guide, 2005- Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC.

Mansour, M., et Ait Brahim, L.2005- Apport de la télédétection Radar et du MNT à l'analyse de la fracturation et la dynamique des versants dans la région de Bab Taza, Rif, Maroc. Télédétection, 2005, Vol. 5, n°1-2-3, p 95-103.

Mansour, M.1998- Geodynamic processes and cartography of ground mouvements in the area oh Chefchaouen (District of Bouhalla-Amtrass). Application to the stabilization of main road Nb :39. Western Rif, Morocco. Thèse nouveau doctorat .Université de Paris 07. 192 pages.

Mastere, M. 2011- La susceptibilité aux mouvements de terrain dans la province de Chefchaouen (Rif central, Maroc) : Analyse spatiale, modélisation probabiliste multi-échelle, & impact sur l'aménagement et l'urbanisme. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, 316pages.

Mastere, M., Ait Brahim, L.,Van Vliet Lanoe, B., Elfahchouch, N., Guelzim, E., Jirari, H., et Abdelouafi, A.2010- Utilization of Digital Photogrammetry in spatiotemporal knowledge of Landslides. GeoCanada 2010 – Working with the Earth. Alberta, Canada. (www.geocanada2010.ca/uploads/abstracts_new/view.php?item_id=180).

Mastere, M., Aït Brahim, L., Elfahchouch, N., Mansour, M., et Abdelouafi A. April 2009- GIS technology and probabilistic Approach for assessing the hazard related with ground movements: Impact on sustainable development and town planning in the Province of Chefchaouen. 5èmes Journées Internationales des Géosciences de l'Environnement, Fès Maroc.

Mastere, M., Aït Brahim, L., Elfahchouch, N., Mansour, M., et Abdelouafi A. 26/28 Mars 2009- Potentiel de la photogrammétrie numérique et du MNT pour l'étude des mouvements de terrain: Application à la coulée de pierres du Jbel Akroud (MOROCCO). 4ème Congrès Maghrébin de Géophysique Appliquée, Hammamet Tunisie

Mastere, M. 2008- intégration des données multisource dans un SIG pour la cartographie de l'aléa lié aux mouvements de terrain au niveau de l'accident de Jebha (province de Chefchaouen). Impact sur l'aménagement, et l'urbanisme. Mémoire de Master II recherche, Université Mohammed V, Rabat, 133 p.

Miller, C-L., and Laflamme., R-A.1985-The digital terrain model-theory and application, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 24(3), 433-443 pp.

Méric, O., Garambois, S., Malet, J-P., Cadet, H., Guéguen, P., and Jongmans. D.2007-Seismic noise-based methods for soft-rock landslide characterization. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2007, t. 178, no 2, 137-148 pp.

Moffitt, F., and Mikhail, E. 1980- Photogrammetry 3rd Edition.Chap. 7, Harper and Row New York, 1980.

Olivier, Ph. 1981-1982- L'accident de Jebha-Chrafate (Rif, Maroc),Rev. Géol. dynam. Géogr. phys., 23: 97-106.

Panton, D-J. 1978- A Flexible Approach to Digital Stereo Mapping. In: ASPRS journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 44 (1978), December,Nr. 12, 1499–1512p.

Powers, P.S., Chiarle, M., Savge, W.Z. 1996- A digital photogrammetric method for measuring horizontal surficial movements on the Slumgullion earthflow, Hindsale county, Colorado. Comput.Geosci. 22 (6), 651– 663p.

Selby, M-J.1993- Hillslope Materials and Processes. 2nd Edition, Oxford University Press, 451p.

Sossey Alaoui, F. 2005- Traitement et intégration des données satellitaires optiques et Radar dans un SIG en vue de l'obtention de carte de l'aléa lié aux instabilités de terrain dans la péninsule de Tanger (Rif septentrional, Maroc). Doctorat, Université Mohamed V, Faculté des Sciences, Rabat. 175p.

Van Asch, W.J.Th., Malet, J.P., Van Beek, L.P.H. 2006- Influence of landslide geometry and kinematic deformation to describe the liquefaction of landslides: Some theoretical considerations. Engineering Geology, 88 (1-2), pp. 59-69.

Weber, D., Herrmann, A.2001- Contribution of digital photogrammetry in spatio-temporal knowledge of unstable slopes: The examples of the Super-sauze landslide (Alpes-de-Haute-Provence, France) Bulletin de la Societe Geologique de France, 171 (6).

Weber, D., Herrmann, A. 2000- Reconstitution de l'évolution géomorphologique de versants instables par photogrammétrie numérique : l'exemple du glissement de terrain de Super-Sauze (Alpes-de-Haute-Provence, France). Bulletin de la Société Géologique de France 171: 637-648p.

Wood, G-A. 1983- Realities of automatic correlation problem. In: ASPRS journal of Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 49 (1983), Apr., 537–538 p.