Characterization, Modeling and Mapping of the landslide affecting the centre-town of Azazga (Algeria)

Caractérisation, Cartographie et Modélisation du glissement de terrain du centre-ville d'Azazga (Algérie)

DJERBAL Lynda¹, MELBOUCI Bachir¹, ALIMARINA Nassima², BAHAR Ramdane²

¹Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (LGEA), Tizi-Ouzou, Algérie.

²Université Houari Boumediene de Bab El Zouar, Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement (LGEA), Tizi-Ouzou, Algérie.

Abstract. The morphology of the North Algerian basins characterized by precarious stability constitutes an important issue for the development and the economy of many cities in the region. The landslide affecting the city of Azazga represents one of the most active and dramatic land movements experienced by the region in recent years. The city affected by the movement is situated at about 20 Kms in the East of the Wilaya of Tizi - Ouzou (in northern Algeria); the instability is located in a slope, composed of flysch (Azazga flysch are compounds of two terms of marly clay with small sandstone beds), with an inclination of about 13 °. Several factors have acted to activate this instability. Furthermore, water factor and geological conditions of this region are the main parameters of the susceptibility of the site to landslides.

The Geographic Information Systems (GIS) are an effective alternative for the analysis of large-scale instabilities (such as Azazga landslides). GIS made for the site of Azazga allowed better management and interpretation of spatial data as well as good understanding of deformation mechanisms and the extent of this landslide. Geological profile has been defined for this slope using the results of spatial data analysis. Numerical modeling of this slope was then carried out, using the finite element software PLAXIS^{2D}, with taking in consideration the effect of the water level. Those studies show the important influence of the position of water table on the activity of the landslide and the safety factor.

Keywords: Landslide; Causes; GIS; Deformation mechanisms; Numerical modeling

Résumé. La morphologie du Nord Algérien, caractérisée par des versants à stabilité précaire, constitue un important enjeu pour le développement et l'économie de plusieurs villes de cette région. Le glissement de terrain de la ville d'Azazga représente l'un des cas de glissements actifs et spectaculaires qu'a connu la région au cours de ces dernières années. La ville affectée par le mouvement est située à environ 20 Kms à l'Est de la Wilaya de Tizi-Ouzou (au Nord de l'Algérie) ; l'instabilité est localisée dans un versant composé de flysch (les flysch d'Azazga sont composés de deux termes argileux marneux à petits bancs de grès) d'une inclinaison d'environ 13°. Plusieurs facteurs ont agi pour activer cette instabilité. Par ailleurs, les conditions hydriques et géologiques de la région restent les paramètres principaux de la prédisposition du site aux glissements de terrain.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) constituent une alternative efficace pour l'analyse des instabilités de grande ampleur (tel que le glissement d'Azazga). Le SIG réalisé pour le site d'Azazga a permis une meilleure gestion et interprétation des données spatiales disponibles ainsi qu'une bonne appréciation des mécanismes de déformation et de l'étendue du glissement de terrain. Un profil géologique a été défini pour ce versant en exploitant les résultats des analyses spatiales des données. Une modélisation numérique du versant a été ensuite réalisée à l'aide du logiciel d'éléments finis PLAXIS^{2D} avec la prise en compte de l'effet du niveau de la nappe sur la stabilité du site. Les études effectuées montrent l'importante influence des facteurs hydriques sur l'activité du mouvement et sur le coefficient de sécurité.

Mots Clés : Glissement ; Causes ; SIG ; Mécanismes de déformation ; Modélisation.

1 Introduction

La ville d'Azazga est située à environ 20 Kms à l'Est de Tizi-Ouzou (Fig.1) dans des terrains argileux et marneux (flysch d'Azazga). Elle est localisée à une altitude moyenne d'environ 450 m. Le centre-ville de cette région a connu plusieurs instabilités de terrain depuis 1952. Cependant, une période de calme a été observée pendant les années 1990 et allant jusqu'à 2002. La longue période neigeuse de février 2012 a engendré une intense réactivation du mouvement de terrain et l'apparition d'importants désordres au niveau de ce site fortement urbanisé. Le glissement de terrain affecte une pente naturelle de faible inclinaison (une inclinaison d'environ 10° à 15°). Les enjeux de ce mouvement de terrain sont très lourds du fait qu'il met en danger plusieurs ouvrages et infrastructures importants (tels que l'hôpital de cette région).

Fig.1. Présentation de la zone instable d'Azazga.

2 Aperçu de l'historique du mouvement de terrain d'Azazga

Les instabilités de terrain de la région d'Azazga sont anciennes ; elles remontent au niveau de la ville à 1952. Cependant, on ne dispose d'aucune information concernant les conditions du déclenchement du glissement et les résultats des études réalisées à l'époque (entre 1952 et 1973). Les premiers signes d'instabilité reportés remontent à l'hiver 1973. Plusieurs phases d'activité du mouvement ont été observées :

- L'activation de février 1973 : Deux instabilités ont été observées au Nord de la ville d'Azazga. La première a été observée au Nord Ouest et la seconde au bord de l'ancien cimetière chrétien. Ces deux mouvements se développent suivant deux axes qui convergent vers le cours d'eau « IGHZER IAZOUDJEN ». L'une des causes probables de ces instabilités peut être due à l'érosion des pieds des versants par le cours d'eau.

- La réactivation du 08 avril 1974 : Les précipitations abondantes de l'hiver 1974 ont contribué considérablement à la réactivation et à l'amorce de plusieurs instabilités au niveau du Nord algérien (après une longue période de précipitations ayant causé plusieurs crues). Le bilan du glissement de la ville d'Azazga pendant cette période (hiver 1974) été très

lourd : 183 maisons détruites, 100 autres affectés par les mouvements (elles ont subi des désordres dans les éléments porteurs) et 690 sinistrés.

- La réactivation de mars 1985 : Les mouvements de terrain ont affecté plusieurs zones de la ville d'Azazga (Le centre-ville, Ighil Bouzel, Agouni Guizen et Tizi Bouchen). Suite à ces instabilités 23 habitations ont subi d'importants désordres dans la maçonnerie et la structure, des locaux et des édifices publics ont été fortement endommagés, la route nationale RN12 a été coupée à la circulation, etc.

- Les réactivations de 2003 et 2004 : Pendant les hivers 2002-2003 et 2003-2004, caractérisés par d'importantes précipitations, la ville d'Azazga a connu des réactivations des mouvements de terrain (leur intensité était faible comparée à celle des réactivations de 1974 et 1985). Suite aux désordres observés, une étude géotechnique des instabilités du centre-ville a été confiée au laboratoire LCTP.

- La réactivation du 11 mars 2012 : L'importante couverture neigeuse qui a caractérisé l'hiver 2012 a déclenché et réactivé plusieurs instabilités de terrain en Algérie. La réactivation de plusieurs glissements dans la région d'Azazga est l'un des cas les plus remarquables vu que les instabilités ont affecté des zones fortement urbanisées et engendré des dommages à plusieurs ouvrages d'intérêt public dont le lycée technique d'Azazga, le nouveau bureau de poste, le nouveau centre culturel, etc. Plusieurs ouvrages ont subi des désordres d'importance variable (allant de faibles fissures à la déstabilisation totale des ouvrages), trois routes dont le CW71 ont été coupées à la circulation, la RN 12 a occasionné plusieurs dommages,...

3 Les causes du glissement de terrain d'Azazga

Plusieurs facteurs ont agi conjointement pour déclencher et réactiver les glissements de la région d'Azazga. Il s'agit des facteurs classiques déjà caractérisés par plusieurs auteurs (*tels que : Slosson et al., 1992 ; Azimi et al., 1996 ; Durville et al., 2003*). Ces facteurs peuvent être classés en deux grandes catégories (*Campy et Macaire, 1998*) : facteurs actifs et facteurs passifs.

3.1 Les facteurs passifs

Ils regroupent les facteurs de prédisposition du site à subir des instabilités de terrain. Ils sont liés principalement à la géologie, à la géomorphologie et à l'hydrologie du site.

3.1.1 Effet du cadre géologique et géomorphologique du site

Le versant d'Azazga est localisé dans des flysch composés de deux termes argileux marneux à petit bancs de grès (*LCTP, 2004*). Les campagnes de reconnaissance géologiques et géotechniques réalisées dans cette région ont révélé la présence de zones de remaniement situées à l'interface entre le substratum et les couches superficielles (fig. 2) (*LTPC, 1987 ; LCTP, 2004 ; LCTP, 2003*). Par ailleurs, les caractéristiques mécaniques des formations géologiques qui composent le versant sont très faibles en présence d'eau et favorisent l'apparition de mouvements de terrain actifs et étendus. Le glissement affecte un versant caractérisé par une pente de faible inclinaison (une inclinaison de 10° à 15°), composé d'un multicouche d'un pendage orienté dans le sens de la pente du versant (une morphologie qui favorise l'apparition de mouvements de terrain). Par ailleurs, la morphologie de ces sites a largement été remodelée par les aménagements (les terrassements, les jets de remblais,...) et les mouvements du terrain (*GUIROUS et al., 2013*).

Fig.2. La coupe A-A du versant du centre-ville d'Azazga (voir la localisation de la coupe sur la figure 4).

3.1.2 L'effet du cadre hydrologique du site

La région d'Azazga est caractérisée par une hydrologie complexe :

- La présence de plusieurs sources en aval du versant ;
- La présence d'une nappe très proche du niveau du terrain naturel (les essais montrent que le degré de saturation des sols proches de la surface est de l'ordre de 100%) ;
- La présence de plusieurs cours d'eau ;
- La présence de zones de stagnation d'eau (fig. 3).

Cette hydrologie a contribué considérablement à l'amorce et l'activité des glissements de terrain d'Azazga par son effet sur la géométrie du versant (suppressions de butées, érosion superficielle, ...) et sur le comportement mécanique du versant (érosion profonde du versant). L'érosion profonde du versant est due aux circulations d'eau à l'intérieur du versant qui causent le transport des particules fines (les eaux des sources sont souvent chargées de particules fines en période des fortes précipitations).

Fig.3. Zone de stagnation des eaux de pluies.

3.2 Les facteurs actifs

Ils regroupent les facteurs de déclenchement des glissements de terrain ; ils sont généralement liés à l'action conjuguée de l'eau et de l'homme. Ces facteurs sont très difficiles à évaluer sur le terrain, vu qu'ils varient au cours du temps, et influent considérablement sur la dynamique d'évolution du mouvement.

3.2.1 L'action du climat

Le climat de la région d'Azazga est caractérisé par de fortes précipitations qui s'étalent sur une période d'environ six mois ; ce contexte a nettement contribué à l'amorce et aux réactivations du glissement d'Azazga. Toutes les phases d'activité de ce glissement sont précédées par des événements climatiques particuliers (fortes pluies, neige,...).

L'Algérie a traversé une période de sécheresse durant les années 1990 et allant jusqu'à 2001. Par ailleurs, des déplacements lents ont été observés au niveau du site instable d'Azazga pendant cette période (état de stabilité apparente). Pendant les années 2000 d'importantes précipitations ont été observées ; ces dernières ont rechargé progressivement les nappes. L'importante couverture neigeuse de l'hiver 2011 (d'une épaisseur supérieure à 1 m) qui a été suivie par d'intenses pluies a complètement saturé le terrain et a conduit à la réactivation catastrophique des glissements d'Azazga.

3.2.2 Les actions anthropiques

L'homme joue un rôle important dans son environnement en modifiant les conditions de la stabilité naturelle. Les actions anthropiques ont agi négativement sur la stabilité précaire de la ville d'Azazga. Plusieurs actions négatives ont été relevées :

- L'effet de l'importante surcharge et des aménagements anarchiques réalisés au niveau de la zone instable ;
- Le manque de réseaux d'assainissement et de drainage dans le site affecté par le glissement et ses alentours ;
- L'effet de la déviation des cours d'eau naturels et du colmatage des sources ;
- L'effet du déboisement de plusieurs espaces verts et de l'abandon des activités agricoles.

4 Cartographie du site instable

Plusieurs études géotechniques ont été réalisées au niveau du site instable d'Azazga. Par ailleurs, ces dernières présentent toutes le défaut d'être ponctuelle et non représentative de l'étendue réelle du mouvement de terrain (elles ciblent des ouvrages bien définis). Afin de mieux gérer les données disponibles, il est nécessaire de les introduire dans un système d'information géographique (SIG). Les SIG sont des moyens d'aide à la décision ; ils permettent une bonne gestion et analyse des aléas naturels et des risques technologiques (*Fischer M.M. et al. 1993 ; Laaribi A. 2000 ; Serre D. 2005*). La

propriété d'analyse spatiale des données offre une meilleure appréciation du comportement du glissement et des conditions géomorphologiques et hydrologiques du site. Les objectifs principaux de la cartographie réalisée pour le versant d'Azazga sont :

- Étudier le glissement dans son contexte géologique, hydrologique et géomorphologique ;
- Géo-référencier les informations spatiales disponibles ;
- Repérer et cartographier les signes du mouvement observés en mars 2012 ;
- Évaluer l'étendue de la surface instable ainsi que les mécanismes mis en œuvre.

La cartographie réalisée comporte deux volets principaux :

4.1 La cartographie du versant

Elle consiste à cartographier et à géo-référencier toutes les informations liées au site (les données géologiques, les données morphologiques, les données hydriques et les données géotechniques). Le SIG réalisé comporte :

- L'implantation et les résultats des sondages carottés ;
- L'implantation des cours d'eau principaux et secondaires ;
- L'implantation des sources d'eau ;
- Les courbes de niveau.

La cartographie réalisée (fig.4) a permis de mieux analyser le contexte hydrique du glissement et de détecter que ce dernier à une commande hydraulique.

Fig.4. Aperçu de la cartographie du centre-ville d'Azazga.

4.2 Cartographie du glissement

La cartographie du glissement de terrain d'Azazga consiste à géo-référencier toutes les données liées à l'activité et à la morphologie des déformations engendrées par le mouvement (tels que les affaissements de terrain). Le sens des arrachements principaux est également indiqué sur les cartes réalisées. Les signes du mouvement repérés sont soit observés sur le terrain lors de la réactivation du mouvement en 2012, soit repérés sur les images aériennes issues de Google Earth. L'analyse de ces signes a permis de définir l'étendue de la surface affectée par le mouvement de terrain au niveau du centre-

ville (qui est d'environ 90 ha) ainsi que les mécanismes mis en œuvre par le glissement (fig.5).

Le versant du centre-ville d'Azazga subit un mouvement global vers le Nord-Ouest. Les déplacements observés pendant la rupture de mars 2012 sont reportés sur la figure 5. Il s'agit d'affaissements et d'arrachements de terrain d'importante ampleur (d'ordre métrique dans certains endroits du site (voir les figures 5 et 6). Par ailleurs, les désordres observés sur les structures sont faibles, ce qui prouve que la surface de rupture est profonde et que le versant se déplace en bloc (à l'exception de quelques arrachements compartimentés).

Fig.5. Mécanisme de déformation du versant d'Azazga.

Fig.6. Aperçu des désordres observés en mars 2013.

5 La modélisation numérique du glissement d'Azazga

La méthode des éléments finis constitue un moyen efficace pour l'analyse des problèmes de la mécanique des sols (*J. S. Templeton, 2012*). Son utilisation en géotechnique remonte, d'après Clough et Wilson (1999), au début des années 1960. Cette technique est choisie pour l'analyse du comportement du versant du centre-ville d'Azazga en utilisant le code de calcul PLAXIS^{2D}

version 2011 conçu spatialement pour l'étude des problèmes de la géotechnique.

5.1 Présentation du modèle

La coupe géotechnique utilisée pour la modélisation est présentée dans la figure 7. Elle comprend quatre couches de sol (tableau 1) et s'étend sur une longueur de 1300 m. L'altitude maximale est de 445 m et la minimale de 250 m (une pente moyenne de 15°). Le versant instable est modélisé en utilisant le logiciel PLAXIS^{2D} version 2011. L'hypothèse de la déformation plane et le critère de Mohr-Coulomb (modèle élastoplastique sans écrouissage) ont été choisis pour ce calcul. Le modèle nécessite la connaissance de cinq paramètres : le module de Young E , le Coefficient de Poisson ν , la cohésion C' , l'angle de frottement ϕ' et l'angle de dilatation ψ . Le maillage choisi est constitué par des éléments triangulaires à 15 nœuds avec 12 points d'intégration par éléments (2218 éléments). Les conditions aux limites utilisées sont comme suit (figure 7) : les lignes géométriques verticales pour lesquels l'abscisse (x) est égale à la plus petite ou à la plus grande des abscisses (x) du modèle sont bloquées horizontalement ($U_x = 0$) et les lignes géométriques pour lesquels la cote (y) est égale à la plus petite ordonnée (y) du modèle sont entièrement bloquées ($U_x = U_y = 0$). Deux positions principales sont choisies pour la nappe dans les calculs effectués (une nappe qui affleure le niveau du terrain naturel et une nappe qui se trouve à environ 20 m de profondeur).

Tableau 1 : récapitulatif des caractéristiques des formations du versant.

Paramètres Couche	γ_d [KN/m ³]	γ_{sat} [KN/m ³]	W_L [%]	I_p [%]	C' [KPa]	ϕ' [°]
Limons sableux	16	18,80	28,6	14,94	55	8
Argile remaniée	15,30	18	71	32	35	3
Marne compacte	18	18,40	51	26,17	165	14
Blocs de grès	23	23,16	/	/	1000	14

Fig.7. Profil du versant d'Azazga.

5.2 Résultats de la modélisation numérique

Les résultats de la modélisation montrent que le versant d'Azazga se trouve dans un état instable. Par ailleurs, le rabattement de la nappe jusqu'à une profondeur d'environ 20 m permet de faire passer le versant à un état de stabilité précaire (vu que le coefficient de sécurité reste proche de 1).

5.2.1. Pour le cas de nappe en surface

Les résultats de la modélisation obtenus pour le cas d'une nappe qui se trouve au niveau du terrain naturel (le niveau de la nappe observé pendant les périodes de fortes précipitations) montrent que le versant subit un processus de rupture global. Cependant, plusieurs zones d'arrachement sont observées au niveau des parties amont et aval (fig. 9). En effet, une morphologie semblable est observée pendant la rupture brusque du 11 mars 2011 (fig. 6). Le déplacement maximal observé est d'environ 3 m. le glissement de terrain mobilise la couche superficielle (composée de limons sableux) vers le Nord Ouest le long d'une surface de rupture plane (fig. 10, 11) qui se développe le long de l'interface entre le substratum et le recouvrement superficiel (zone très altérée de la marne). De plus, les résultats obtenus montrent que des déplacements faibles peuvent être observés après la réalisation du processus de rupture. Le versant se trouve alors dans un état de stabilité apparente (les mouvements sont d'ordres millimétriques à centimétriques et difficiles à détecter en surface).

Fig.8. Évolution du coefficient de sécurité (nappe en surface).

Fig.9. Les champs de déplacement totaux U_{tot} .

Fig.10. Répartition des plans de rupture.

Fig.13. Les champ de déplacement totaux U_{tot} .

Fig.11. Concentration des déformations de cisaillement.

Fig.14. La répartition des plans de rupture.

5.2.2. Pour le cas d'une nappe à 20 m de profondeur

Une nappe se trouvant à environ 20 m du niveau du terrain naturel est utilisée afin de représenter l'état du versant du centre ville d'Azazga durant les années 1990 (période de sécheresse). Les résultats obtenus montrent que le versant se trouve dans un état de stabilité précaire (le coefficient de sécurité est d'environ 1.1 (fig. 12)). Les déplacements sont concentrés au niveau de la crête du glissement (Fig. 13, 14 et 15) (le déplacement maximal est d'environ 78 cm). Par ailleurs, les signes de mouvement en surface sont très faibles).

Fig.12. Évolution du coefficient de sécurité.

Fig.15. Concentration des déformations de cisaillement.

6 Conclusion

Le glissement de terrain d'Azazga résulte de la conjugaison de plusieurs facteurs qui sont d'origines différentes. Ces derniers peuvent être regroupés en deux grandes familles : les facteurs de prédisposition et les facteurs déclencheurs. Afin de palier au manque de données et à la complexité des causes du mouvement, un Système d'Information géographique a été mis au point. Il a permis une bonne appréciation des conditions hydriques et géomorphologiques du glissement ainsi que la détermination de la surface instable et des mécanismes du mouvement.

La modélisation numérique réalisée pour le glissement du centre-ville d'Azazga montre l'importante influence du facteur hydrique sur l'activité de ce glissement (à travers la modélisation du versant en prenant en considération deux niveaux de la nappe). Le rabattement de la nappe à une profondeur d'environ 20 m permet d'atteindre un état de stabilité très fragile (le coefficient de sécurité est proche de 1) ; une modification même minime des conditions géométriques (surcharge, terrassement,...) ou hydriques (colmatage des sources, déviation des cours d'eau,...) peut conduire à une rupture catastrophique du versant.

13. Templeton J.S., III (2012) – Finite element analysis in offshore geotechnics: a thirty-year retrospective – SIMULIA customer conference 2012.

Bibliographie

1. Azimi C. et Devarreaux P. (1996) – Quelques aspects de la prévision des mouvements de terrain – Revue française de Géotechnique, Vol. 76, p. 63-75.
2. Campy. M et Macaire. M (1989) – Géologie des formations superficielles – Masson. 424 P.
3. Clough, R. W. et Wilson E. L. (1999) – Early Finite Element Research at Berkeley – Fifth U.S. National Conference on Computational Mechanics, 1999.
4. Durville J.L., Berthelon J.P., Trinh Q.V. (2003) – Calcul de la stabilité des pentes: comparaison entre équilibre limite et éléments finis dans le cas de ruptures non circulaires – Revue Française de Géotechnique, vol. 104, p. 37-46.
5. Fischer M-M. et Nijkamp P. (1993) – Design and use of geographic information system and spatial models – In: Fischer M-M. and Nijkamp P., geographic information system, spatial modeling and policy evaluation, EDS.
6. Guirous L., Djerbal L., Alimrina N., Melbouci B. et Bahar R. (2013) – Caractérisation des glissements de terrain de la région de Tizi-Ouzou (Algérie) – 1st International Conference on Landslides Risk, Ain Drahem – Tabarka, Tunisia, 14, 15 and 16 March 2013.
7. Laaribi A. (2000) – SIG et analyse multicritères – Editions Hermès, Paris, France, 190 pages.
8. LCTP (2003) – Étude géotechnique des POS D1 et D2 de la ville d'Azazga – Dossier N° 31.03.0042.
9. LCTP (2004) – Étude géotechnique d'urbanisation POS A1 et A5 Azazga – Dossier N° 31.04.0049.
10. LTPC (1987) – étude géotechnique de la ville d'Azazga – dossier N° 27. 85.1012.
11. Serre D. (2005) – Evaluation de performance des digues de protection contre les inondations modélisation de critères de décision dans un système d'information géographique – thèse de doctorat de l'université de Marne-La-Vallée (France), 363 pages.
12. Slosson J.E., Keene A.C. et Johnson J.A. (1992) – Landslides mitigation – Reviews in Engineering geology, Vol. 9, 120 pages.