

ANALYSE BASÉE SUR SIG ET TÉLÉDÉTECTION DE L'INVENTAIRE, DES CAUSES ET MÉCANISMES DES MOUVEMENTS DES VERSANTS DANS LA VILLE D'AZAZGA (NORD ALGÉRIEN)

Hamid BOURENANE*

RÉSUMÉ

Le tissu urbain de la ville d'Azazga est menacé périodiquement par des mouvements de pentes de divers types, constituant un frein récurrent pour le développement de cette région. La présente recherche soutient l'identification, l'analyse et la cartographie de l'inventaire et des causes des mouvements de terrain, ainsi que la compréhension de leurs mécanismes et de leur évolution. L'étude est menée sur la base de : (i) l'analyse des photos aériennes et des images satellitaires à haute résolution Alsat 2A, complétée par des investigations de terrain et (ii) l'exploitation des campagnes de reconnaissances géologiques, géotechniques et hydrogéologiques réalisées dans le site de l'étude. La carte d'inventaire des mouvements de terrain établie montre que leur périmètre couvre une superficie de 281,6 ha, constituant ainsi 31% de l'assiette urbaine. Ces mouvements gravitaires observés relèvent de trois types de facteurs interactifs: (i) les facteurs de prédisposition liés à la prédominance des formations argilo-marneuses et sableuses, très plastiques, décomprimées et altérées en surface, possédant de faibles caractéristiques de résistance mécanique sur une pente moyenne à raide de 10 à 20°, à la présence d'aquifères peu profonds dans les dépôts d'éboulis quaternaires avec un réseau hydrographique dense, et à une tectonique traduisant des déformations avec un réseau de failles et fractures qui facilite les infiltrations d'eau et leur altération; (ii) le facteur de déclenchement lié aux précipitations hivernales concentrées, de forte intensité et (iii) le facteur d'aggravation liée à l'activité anthropique par accentuation des pentes de stabilité précaire et surcharge en remblais. Ces mouvements sont contrôlés et favorisés par : (i) le pendage des flyschs conforme à la pente; (ii) le pendage des plans de schistosité conforme à la pente; (iii) le contact des éboulis avec le substratum flysch et (iv) la déstabilisation de la pente par le sapement basal des torrents des oueds Iazoughen, Boulina et Aboud. Les aboutissements de cette étude constituent un outil de décision pour les aménageurs du territoire, en prenant en compte cet aléa dans les plans directeurs d'aménagement.

Mots-clés - Mouvements de terrain - Causes - Mécanismes - Cartographie - SIG - Azazga - Algérie.

* Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique (CGS), 1 Rue Kaddour Rahim, Hussein Dey, Alger. E-mail: b.hamid725@gmail.com

LANDSLIDES IN AZAZGA CITY (NORTHERN ALGERIA): GIS BASED ANALYSIS AND REMOTE SENSING OF THE INVENTORY, CAUSES AND MECHANISMS

ABSTRACT

The urban fabric of Azazga city is periodically threatened by slope movements of various types, which constitute a recurrent handicap for the development and urban planning of that region. The present research supports the identification and analysis of land movements causes as well as the understanding of their mechanisms and evolution. The study is based on: (i) the analysis of Alsat 2A high-resolution satellite images and aerial photographs, supplemented by field observations; (ii) the exploitation of geological, geotechnical and hydrogeological campaigns investigations including boreholes equipped with piezometers and inclinometers, water points and laboratory tests. The landslide inventory map shows that the unstable urban perimeter covers a total area of approximately 281,6 hectares which represent about 31% of the total urban area. These observed gravitational movements are the result of three types of interactive factors: (i) susceptibility factors, related on one hand to the predominance of clayey-marly units and the internal structure of the flysch deposits, which are very plastic, decompressed and altered at the surface with low mechanical resistance characteristics; and on the other hand to the presence of shallow aquifers in the quaternary scree deposits with 10-20° steep slope, a dense hydrographic network and recent tectonics that reflect the continuity of the deformation in current times; (ii) the triggering factor related to the high intensity rainfall, particularly the cumulative peak rainfall; (iii) aggravation factors related to human activity through morphological modification of the stability conditions. These landslides are controlled by: (i) the dip of the flysch conforming to the slope; (ii) the dip of the schistosity and diaclases planes conforming to the slope; (iii) the contact scree-flysch bedrock and (iv) the destabilization of the slope by the basal undercutting of the torrents of the Iazoughen, Boulina and Aboud rivers. The results of this study constitute a decision-making tool for the planners allowing them to consider this hazard in their development master plans.

Keywords - Landslides - Causes - Mechanisms - Mapping - GIS - Azazga - Algeria.

I- INTRODUCTION

En Algérie du Nord, les mouvements de terrain comptent parmi les aléas naturels les plus fréquents et les plus dommageables, constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement économique et social de nombreuses villes (Guemache *et al.*, 2011; Djerbal et Melbouci 2012; Hadji *et al.*, 2013, 2014a, 2016, 2017a, 2017b; Bougdal *et al.*, 2013; Bourenane *et al.*, 2014, 2016; Laribi *et al.*, 2014; Guirous *et al.*, 2014; Achour *et al.*, 2017; Mouici *et al.*, 2017; Djerbal *et al.*, 2017; Bourenane, 2017; Dahoua *et al.*, 2017; Hallal

et al., 2017 ; El Mekki *et al.*, 2017; Manchar *et al.*, 2018; Mahdadi *et al.*, 2018; Karim *et al.*, 2019 ; Bourenane et Bouhadad, 2021).

Azazga, située dans le massif montagneux de la Grande Kabylie au nord-est de la wilaya de Tizi-Ouzou, est l'une des villes les plus exposées depuis plusieurs décennies à des mouvements de terrain progressifs. Ces mouvements causent des dégâts importants aux constructions dans plusieurs sites, et, aujourd'hui, ils menacent sérieusement d'autres quartiers à stabilité précaire (Mekati, 1992; Djerbal *et al.*, 2014; Bourenane *et al.*, 2021).

Il s'agit de mouvements de versants très actifs et très préoccupants par leur localisation en milieu urbain à forte densité de population, par leur grande extension sur plusieurs hectares et par l'ampleur des dommages sur les habitations et les infrastructures publiques. Ils se déclenchent essentiellement pendant la période pluvieuse (octobre à avril), suite aux fortes précipitations et sont alors d'autant plus fréquents que les chutes de pluies sont fortes et prolongées (1952, 1955, 1973, 1974, 1984, 2003, 2004, 2012, 2014 et 2018) (fig.1). Les eaux d'infiltration agissent sur les propriétés physiques et mécaniques des sols fins en les rendant plastiques à saturation (Hadji *et al.*, 2014b).

Des mouvements de terrain plus récents, survenus en hiver 2012, 2014 et 2018 suite aux fortes précipitations, ont causé des dom-

mages importants à plusieurs ouvrages et infrastructures publiques, tels que le nouveau centre culturel, le lycée technique d'Azazga, les constructions individuelles, les affaissements des routes nationales RN12 et RN71, etc. (fig. 1). Actuellement, la fréquence et l'impact de l'aléa sont encore aggravés par la croissance rapide de la démographie, l'urbanisation accélérée, mal maîtrisée et non planifiée dans les zones instables, et les fortes précipitations. Ces mouvements progressifs prennent en termes de risque une ampleur de plus en plus grande, en relation avec le développement de l'urbanisation. Ils constituent ainsi une contrainte majeure pour le développement et l'aménagement urbain et un frein pour le développement de la région. Devant l'importance des dommages de plus en plus importants et les enjeux socio-économiques, les autorités sont alertées, d'une part, sur la

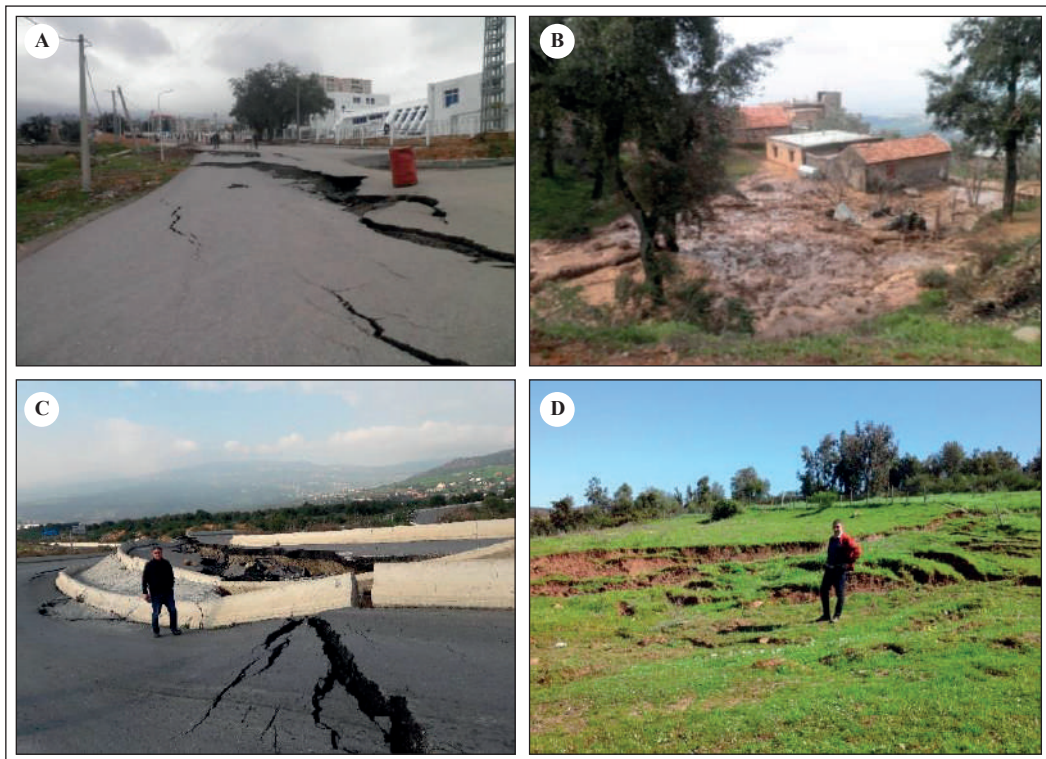


Fig. 1- Exemples de quelques mouvements gravitaires et les dommages induits suite aux fortes précipitations de l'hiver 2012 (A et B), 2014 (C) et 2018 (D) dans la ville d'Azazga.

Examples of landslides and the damage induced by heavy precipitations of winters in 2012 (A and B), 2014 (C) and 2018 (D) in Azazga city.

méconnaissance de ces phénomènes, les facteurs de prédisposition et les conditions de déclenchement, ainsi que leur non prise en compte dans les projets d'aménagement et d'urbanisme et, d'autre part, sur l'urgence de leur identification notamment pour la caractérisation et la prévention. L'absence d'une politique efficace de prévention suite au manque d'un système réglementaire permettant de suivre l'évolution de ce type de phénomènes et sa réduction n'a fait qu'accentuer le risque. En dépit d'un risque avéré, très peu de travaux de recherche ont été effectués sur ces phénomènes complexes dans ce secteur (Mekati, 1992; Djerbal *et al.*, 2014; Bourenane *et al.*, 2021). Ainsi, l'inventaire des phénomènes n'est pas établi, les facteurs de prédisposition et les conditions de déclenchement sont encore mal connus et la cartographie conforme de l'aléa est inexistante.

Dans cette recherche, nous utilisons une approche hautement recommandée pour les zones à grande échelle. Celle-ci est basée sur la cartographie de l'inventaire des glissements de terrain à l'aide de la technologie de télédétection combinée à des investigations de terrain approfondies, afin d'analyser les caractéristiques de déformation, les facteurs de contrôle et les mécanismes de rupture du grand glissement de terrain induit par un événement pluvieux dans la ville d'Azazga (Nord de l'Algérie). Ces approches prometteuses ont été récemment appliquées dans plusieurs études (Guzzetti *et al.*, 2004; Chen *et al.*, 2006; Booth *et al.*, 2009; Mondini *et al.*, 2011; Guzzetti *et al.*, 2012; Prokešová *et al.*, 2014; Borgomeo *et al.*, 2014; Crosta *et al.*, 2014; Bhambri *et al.*, 2016).

L'objectif de notre travail est, d'une part, de cartographier le phénomène et, d'autre part, d'améliorer les connaissances scientifiques liées aux causes, aux mécanismes et à l'évolution de l'aléa des mouvements de terrain afin de présenter des solutions techniques aidant à

la décision et étant un appui aux collectivités locales et territoriales qui accompagnent les différents projets d'aménagement dans cette ville et sa périphérie.

II- MÉTHODOLOGIE

Pour atteindre les objectifs du travail, la méthodologie repose sur l'analyse des données de reconnaissance géomorphologique, géologique, géotechnique et hydrogéologique fondées sur un SIG (Système d'Information Géographique). Elle comprend six étapes principales :

- compilation et réalisation d'une base de données des campagnes d'investigations géotechniques, géophysiques et hydrogéologiques issues d'études antérieures (appelée *Azazga_Data_Base* et *Géo_Map*) sous un SIG (MapInfo, Surfer, ArcGIS et Ms Access) (Van Westen *et al.*, 2006; Guzzetti *et al.*, 2012) ;
- cartographie de l'inventaire des mouvements de terrain (glissements de terrain *stricto sensu*, coulées et éboulements) et des principaux facteurs de susceptibilité et de déclenchement pour l'occurrence spatiale des phénomènes à l'échelle de 1/10 000 par l'utilisation de la télédétection et les SIG ;
- analyse de données des campagnes de reconnaissance hydrogéologique, géotechnique et géophysique, effectuées par les laboratoires nationaux des Travaux Publics (LCTP, 1998-2014), de l'Habitat et de la Construction (LNHC, 2003-2008) et le bureau d'étude géotechnique AICHE-GEO-SOL (2013, 2016) dans le cadre des projets d'étude géotechnique des plans d'occupation des sols (POS). Les campagnes comprennent 206 sondages carottés, de profondeur variant de 10 à 35 m (avec 08 sondages équipés en Down-Hole et 29 équipés en piézomètres) et une vingtaine d'essais de laboratoire ;

- analyse de données de précipitations, couvrant une période de 63 ans (de 1950 à 2013) et provenant de 05 stations météorologiques, à savoir : Azazga école, Yakourene, Tala Gassi, Aghribs et Freha, de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) (ces stations sont en arrêt de fonctionnement depuis 2013) ;
- analyse de données des campagnes piézométriques du mois d'avril 2014, 2015 et 2017 pour la période des hautes eaux, réalisées par le CGS à partir de l'inventaire de 359 points d'eau existants (10 sources, 347 puits et 02 forages paysans) dans toute la zone urbaine d'Azazga (CGS, 2014 et 2019);
- des travaux de terrain réalisés entre juillet 2014 et octobre 2019 dans le cadre de l'étude de microzonage sismique de la ville d'Azazga (CGS, 2019).

III- PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

III.1- Cadre géographique

La ville d'Azazga, chef-lieu de commune portant le même nom, est située à 37 km au nord-est de la wilaya de Tizi-Ouzou, à 137 km à l'est d'Alger et à 20 km de la mer Méditerranée (fig. 2). Au niveau local, la zone d'étude concerne le site urbain de la ville d'Azazga, délimité par son Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme PDAU (fig. 2), couvrant une superficie totale d'environ 9 km². C'est un secteur qui a pour coordonnées correspondantes au quadrillage kilométrique UTM, fuseau 31-WGS 84: X variant entre 619 620 et 624 350 m, Y variant entre 4 065 390 et 4 069 450 m.

III.2- Cadre géomorphologique, géologique et climatique

Géomorphologiquement, la région d'Azazga se rattache aux massifs de la Grande Ka-

bylie qui est située dans l'Atlas tellien montagneux. Elle regroupe trois (03) domaines morphologiques (fig. 2) : (i) les reliefs montagneux très accidentés du massif d'El Abed, d'orientation N-S, se développant à l'est d'Azazga et dont les altitudes peuvent dépasser les 700 m; (ii) les piémonts orientés E-O et caractérisés par une topographie moins accidentée et mamelonnés là où les dénivellations varient de 200 à 400 m; et enfin (iii) la plaine du Sébaou à l'extrémité ouest d'Azazga, caractérisée par une topographie subhorizontale avec des altitudes de 50 à 150 m. La ville d'Azazga est située au pied du versant montagneux du Djebel Abed et à la faveur d'un plateau de pente maximale de 10°, délimité au nord et au sud par deux versants présentant des ruptures de pentes élevées, dépassant les 15° (fig. 3). Le versant est découpé par un réseau hydrographique dense, représenté essentiellement par les deux principaux cours d'eau: Ighzer Iazoughen au nord et Boulina au sud, à écoulement permanent, auxquels sont associés des affluents à écoulement temporaire.

Du point de vue géologique, la région d'Azazga appartient au domaine des flyschs nord-kabyles, faisant partie de l'orogène alpin-périméditerranéen. Ce domaine, constituant un ensemble homogène, domine le bassin néogène de Tizi-Ouzou à l'ouest. Il est limité au sud par le socle cristallophyllien de la Grande Kabylie et la chaîne calcaire du Djurdjura. Cette région est caractérisée par quatre (04) unités géologiques distinctes (fig. 3) : (i) **le flysch créacé**, formant une série épaisse d'argiles gris-bleu à petits bancs de grès et marnes en plaquettes. C'est un faciès très plissé, donnant naissance à un débit en plaquettes; (ii) **le flysch numidien**, formé par les argiles rouges et vertes surmontées par les grès massifs, formant ainsi les principaux reliefs du Djebel El Abed à l'est de la crête de Djemâa-Bouchen au sud-ouest, des corniches du flanc sud de Tizi-Bouchen et de Tizi N'Fliki à l'extrémité sud de la ville; (iii) **le Miocène post-nappes**, représenté par une série argilo-marneuse grise du Carténien, af-

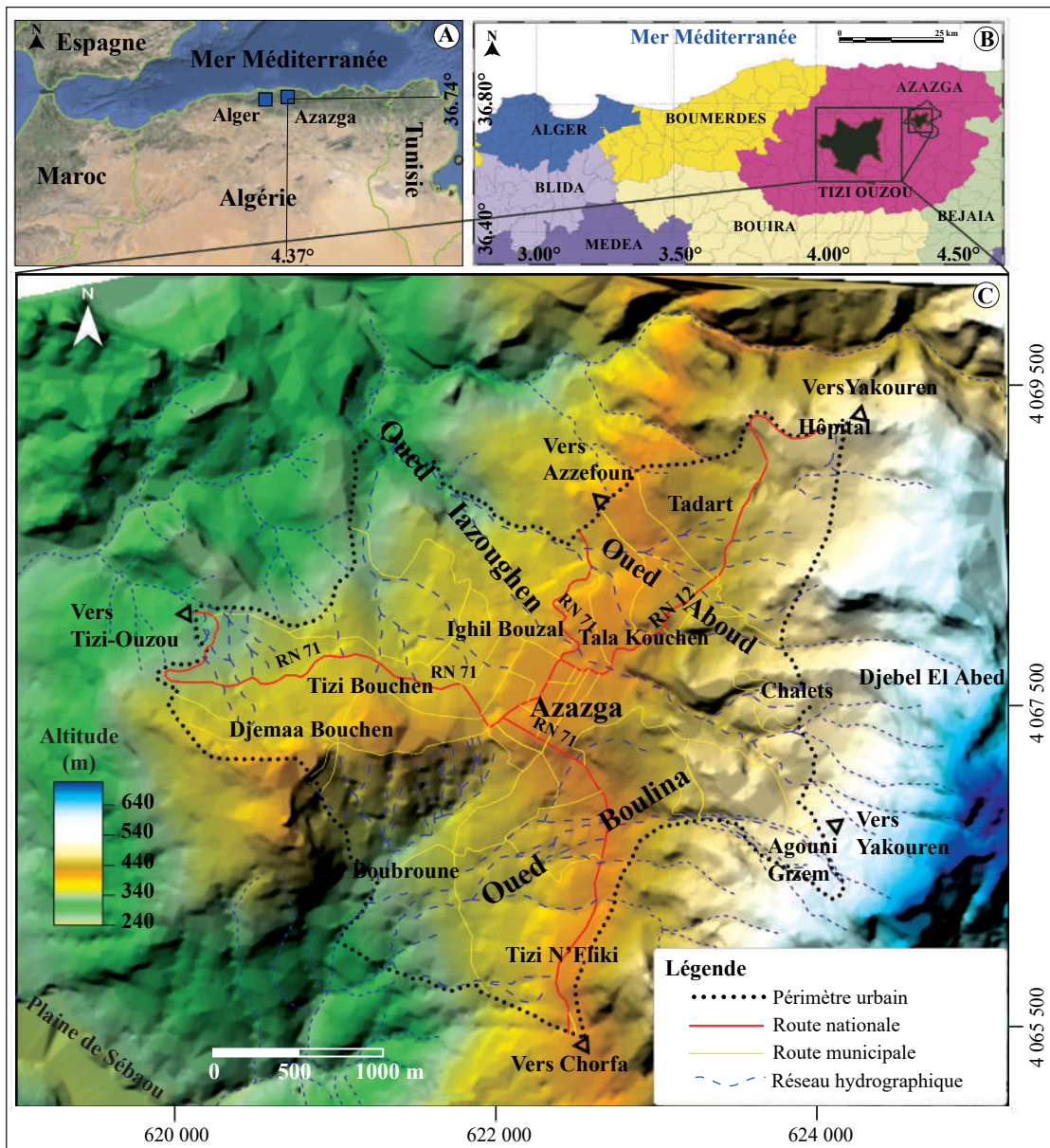


Fig. 2- Cadre géographique de la zone d'étude dans : A) le Nord de l'Algérie ;
 B) la limite administrative du périmètre urbain d'Azazga ;
 C) un modèle numérique de terrain (MNT).

**Geographical setting of the study area within: A) North Algeria;
 B) administrative limit of the urban perimeter of Azazga ;
 C) a digital elevation model (DEM).**

fleurant principalement au nord-ouest d'Azazga où le Miocène repose en discordance sur les grès numidiens, et (iv) les **éboulis quaternaires**, recouvrant le Numidien à l'est, et le flysch créacé au nord et au sud. Ils sont constitués de blocs de grès, provenant de la

fragmentation de la crête du Djebel El Abed, enrobés dans une matrice argileuse à argilo-sableuse.

Du point de vue tectonique, les glissements de terrain sont localisés dans la zone

de flyschs, domaine allochtone, caractérisé par les nappes de charriage ayant subi un déplacement pendant ou après leur sédimentation, au cours du cycle alpin, et déposées dans une zone orogénique tectonisée. Cette tectonique s'est manifestée par (Gerard, 1979) (fig. 3): (i) un contact anormal majeur de direction N-S, séparant l'unité de flysch d'Azazga de l'unité numidienne; (ii) un système de failles dans deux directions principales NE-SO et NO-SE, découpant les grès numidiens en panneaux; et (iii) le chevauchement des grès sur les argiles du Crétacé à l'ouest.

La région d'Azazga est soumise à un climat méditerranéen humide, caractérisé par l'alternance d'une saison sèche et chaude, entre juin et septembre, et d'une saison humide et relativement froide, entre novembre et mars. Elle reçoit chaque année

des précipitations à une moyenne d'environ 970 mm, étant réparties de la façon suivante: 700 mm entre novembre et mars, 112 mm entre avril et mai et 106 mm entre septembre et octobre, le reste tombant pendant l'été. Les précipitations se caractérisent par une forte variabilité spatio-temporelle, traduisant parfois des pluies exceptionnelles avec des crues torrentielles. Elles constituent, par ailleurs, le facteur déclenchant des mouvements de terrain.

IV- ANALYSE DES MOUVEMENTS GRAVITAIRES DANS LA VILLE D'AZAZGA

La démarche d'étude des mouvements gravitaires dans la ville d'Azazga présente trois étapes principales : (i) l'analyse et la réalisation d'une base de données spatiale sous SIG; (ii) la cartographie de l'inven-

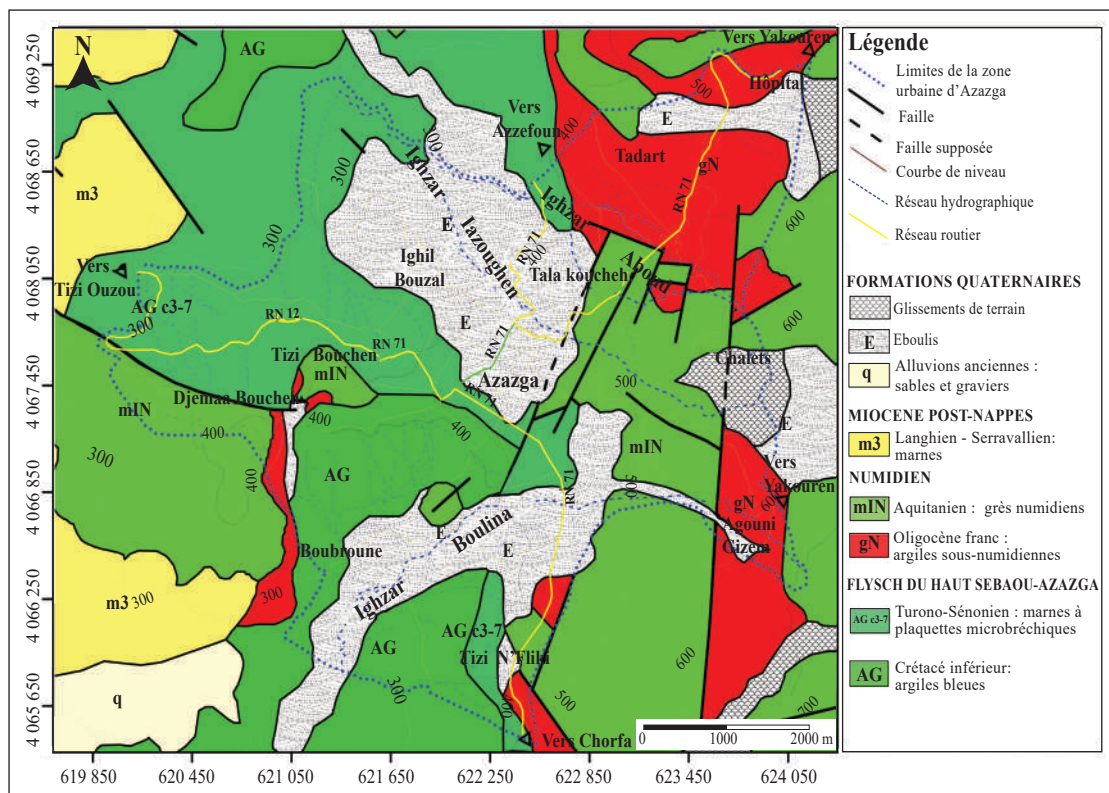


Fig. 3- Extrait de la carte géologique d'Azazga-Azazga au 1/50 000 (ORGM, 1996).
Excerpt from the geological map of Azazga-Azazga at 1/50 000 scale (ORGM, 1996).

taire des mouvements de terrain de la ville d'Azazga et ses environs; et (iii) l'analyse des causes et des mécanismes des mouvements gravitaires.

IV.1- Collecte de données et réalisation de bases de données spatiales sous SIG

Les données nécessaires pour l'étude des mouvements de terrain affectant particulièrement la ville d'Azazga peuvent être regroupées en deux classes (tabl. I): (i) les mouvements de versants associés et (ii) les facteurs de susceptibilité et déclenchants. Ces données ont été collectées à partir de différentes sources et utilisées pour générer les couches thématiques (tabl. I). Elles ont été intégrées et spatialisées dans une base de données (appelée Azazga_Data_Base et Géo_Map) sous un SIG

en utilisant Ms Access, MapInfo 12, Surfer 13 et ArcGIS 9, permettant une meilleure acquisition, gestion, exploitation et analyse spatiale de données géoréférencées dans le même système de projection local de l'Algérie (UTM Nord-Sahara; WGS 1984; fuseau 31 Nord). Les couches thématiques ont été intégrées sous un maillage de 10 x 10 m. Le traitement statistique des données a été réalisé à l'aide du logiciel tableur Microsoft Excel.

IV.2- Carte d'inventaire des glissements de terrain

La carte d'inventaire présente la distribution spatiale et les caractéristiques des phénomènes (type de phénomène, âge, état d'activité, période de retour, activité et mécanismes, etc.). Elle est considérée comme la

Tableau I - Données spatiales utilisées pour l'étude des mouvements de terrain dans la ville d'Azazga.
Spatial data used for the landslides study in Azazga city.

Catégories de données	Variables	Source
Géomorphologie	Inventaire des mouvements de terrain	Analyse et interprétation de photographies aériennes prises en 1973, 1984, 2000 et 2008 à l'échelle, respectivement, de 1/20 000, 1/20 000, 1/10 000 et 1/4 000 des images satellitaires panchromatiques Alsat 2A à haute résolution (2,5 m) de l'année 2011 et d'images satellitaires de Google Earth prises entre 2003 et 2018 ; Analyse des documents historiques (rapports de glissements de terrain, articles de journaux et données recueillies lors d'entretiens avec la population) vérifiés et complétés par de vastes travaux de terrain (entre 2014 et 2019).
Relief	Gradient de pente	Modèle numérique de terrain (MNT) avec une résolution de 10 m, obtenu à partir de la digitalisation des cartes topographiques au 1/25 000.
	Aspect	
	Altitude	
Structure géologique	Lithologie	Digitalisation des cartes géologiques au 1/50 000 et analyse des sondages carottés, interprétation des images satellitaires Alsat 2A et des photos aériennes au 1/10 000 et 1/4 000 ainsi que des observations de terrain.
	Distance aux failles	
	Distance aux linéaments	
Hydrologie	Précipitation	Données des précipitations couvrant une période de 63 ans (1950 à 2013) provenant de 05 stations météorologiques à savoir : Azazga école, Yakouren, Tala Gassi, Aghribs et Freha de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH).
	Distance au réseau hydrographique	Analyse des documents disponibles, interprétation des images satellitaires Alsat 2A au 1/10 000 (résolution de 2,5 m), des images satellitaires de Google Earth, des photos aériennes au 1/10 000, des cartes topographiques au 1/25 000 et des observations de terrain.
Occupation du sol	Occupation du sol	
Anthropie	Distance au réseau routier	

source d'information de base, indispensable pour toute évaluation de la susceptibilité et de l'aléa des «mouvements de versant» (Van Westen *et al.*, 2006).

La carte d'inventaire détaillée des glissements de terrain dans la ville d'Azazga a été établie à l'échelle de 1/10 000 (fig. 4). Elle montre la répartition spatiale des types de glissements de terrain et leurs propriétés géométriques (surface, périmètre et profondeurs approximatives de la rupture), le mécanisme de rupture, les discontinuités et les fissures de tension, la lithologie concernée, le degré de développement, l'activité, l'angle moyen de la pente, la couverture terrestre, les caractéristiques géotechniques, etc. (fig. 4). Le périmètre du glissement de terrain couvre une surface d'environ 2816 km² (281,6 ha), ce qui représente 31% du périmètre total de la zone urbaine. Ces mouvements gravitaires

observés peuvent être groupés en quatre types (fig. 4) selon la classification de Cruden et Varnes (1996): (i) les glissements de terrain proprement dit ou *stricto sensu* (slide) avec des glissements translationnels (translational slide); (ii) les glissements rotationnels (rotational slide) et la solifluxion-fluage (creep) représentant une large majorité (27,95%), dont les deux tiers sont des glissements rotationnels; (iii) les coulées et écoulements visqueux (flow) présentant une surface de 2,05%; et (iv) les éboulements (rock-falls) moins étendus avec une superficie de 1%.

V- ANALYSE DES CAUSES DES MOUVEMENTS GRAVITAIRES

L'analyse de l'inventaire historique des mouvements de terrain et de leurs évolutions spatiale et temporelle montre l'action conjointe de deux catégories de facteurs d'instabilité.

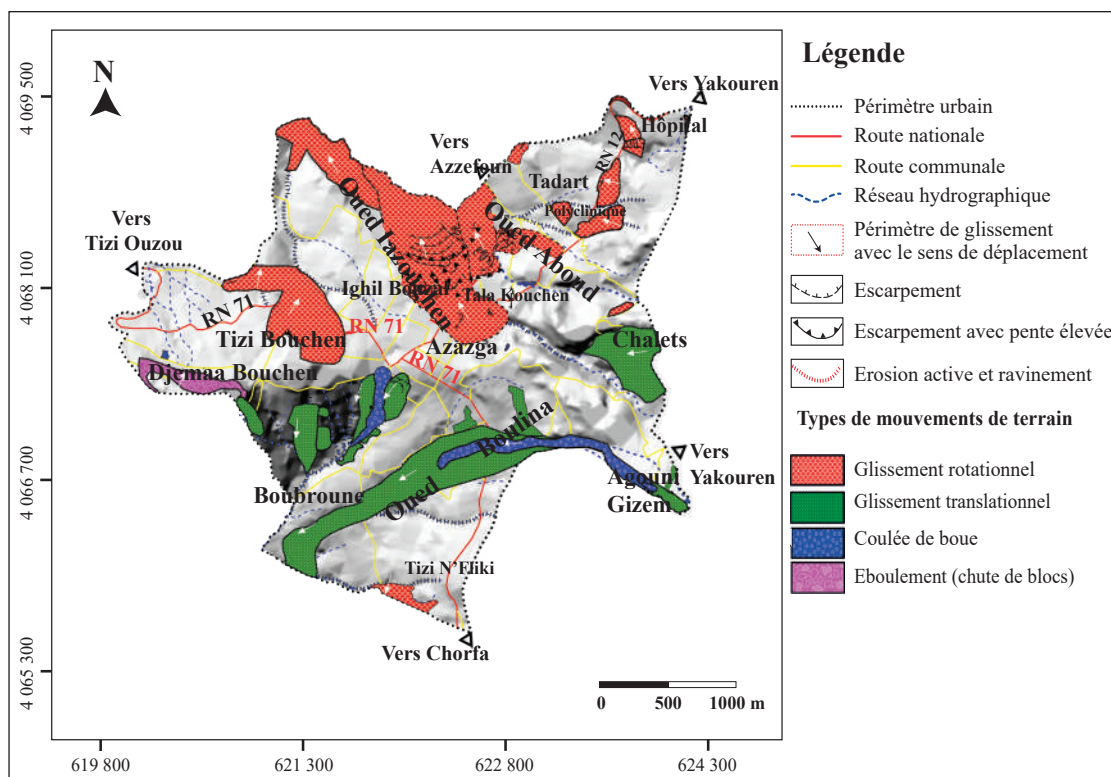


Fig. 4- Carte d'inventaire des mouvements de terrain de la ville d'Azazga.
Landslides inventory map of Azazga city.

Ces facteurs de causalité possibles (fig. 5) ont été identifiés et analysés, et des couches thématiques ont été dérivées et préparées principalement à partir du tableau (tabl.I) : (i) des bases de données nationales disponibles (cartes géologiques, carte topographique nationale, MNT), données de précipitation, données d'études géotechniques ; (ii) des analyses d'images satellitaires panchromatiques à haute résolution Alsat 2A, photographies aériennes, et images satellitaires de Google Earth et (iii) des enquêtes de terrain.

Les couches thématiques générées dans le logiciel SIG ont été rééchantillonnées dans une grille de 10 x 10 m.

V.1- Les facteurs déclenchants

Le déclenchement des mouvements de terrain d'Azazga est lié essentiellement à l'action de l'eau et à l'activité humaine.

V.1.1- Les précipitations

Le facteur déclenchant se résume aux intensités de précipitations et leur cumul pré-événement. La région d'Azazga est l'une des régions les plus arrosées de l'Algérie, avec son climat méditerranéen qui l'expose à des épisodes météorologiques de caractère intense et variable. Ce climat contrasté, avec des précipitations hivernales concentrées sous forme d'averses, agit par ravinement, érosion régressive et infiltration sur les propriétés physiques et mécaniques des sols fins en les rendant plastiques à saturation et réduisant leurs propriétés de résistance mécanique.

L'analyse des précipitations annuelles relevées de la station d'Azazga école (ANRH, 2013) montre clairement la grande variabilité, l'irrégularité et la concentration des pluies interannuelles pendant une période donnée.

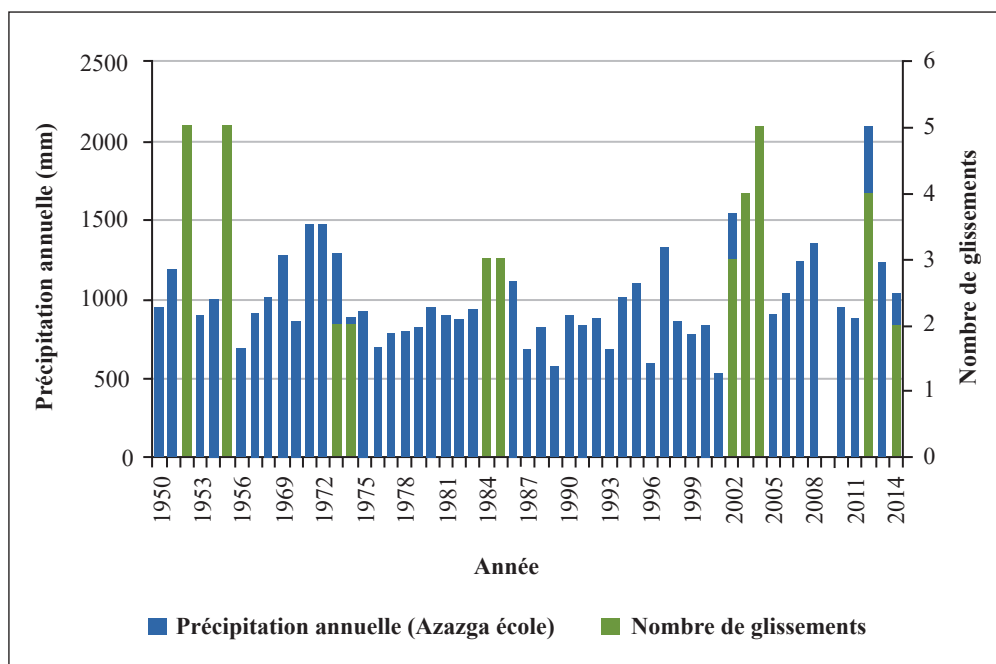


Fig. 5- Relation entre les mouvements de versant et les précipitations pour la période de 1950 à 2014 (données de l'ANRH, 2013, station Azazga école).

Relationship between slope movements and precipitation for the period from 1950 to 2014 (ANRH data, 2013, Azazga school station).

L'inventaire historique des glissements de terrain, effectué pour la période 1950-2019, montre que les principaux mouvements gravitaires enregistrés dans la ville d'Azazga sont liés aux fortes précipitations (fig. 5): 1952 (1190,8 mm); 1973 (1287,8 mm); 1974 (884 mm); 1984 (1236,1 mm); 1985 (930,7 mm); 2003 (999,6 mm); 2004 (917,6 mm); 2012 (2086,7 mm). Ils se déclenchaient essentiellement pendant la période pluvieuse (décembre à mars) et lorsque la pluviométrie moyenne de l'année dépasse les 900 mm (fig. 5). Une intensité et un cumul de précipitations élevées peuvent suffire au déclenchement de certains types de mouvements, bien que pour d'autres, ce sont les événements climatiques exceptionnels qui participent activement à leur déclenchement. Plus de 50% de ces précipitations tombent durant les mois de décembre, janvier, février et mars. Les pics des précipitations cumulées, sur ces quatre mois, ont atteint 876 mm en 1952 (73% du total annuel), 557 mm en 1955 (56% du total annuel), 841 mm en 1973 (65% du total annuel), 852 mm en 1984 (68% du total annuel), 544 mm en 2003 (54% du total annuel), 886 mm en 2004 (97% du total annuel) et 691 mm en 2012 (33% du total annuel). C'est au cours de cette période humide de l'année que la recharge des nappes superficielles s'effectue, en développant de fortes pressions interstitielles agissant sur la déstabilisation des versants.

Une carte de précipitations annuelles moyennes (fig. 6a) a été établie en utilisant l'interpolation par krigeage de la base de données des précipitations de 05 stations météorologiques, à savoir: Azazga école, Yakouren, Tala Gassi, Aghribs et Freha, situées à proximité de la zone d'étude. La moyenne des précipitations saisonnières de la période 1950-2013 est comprise entre 700 et 1400 mm. Le pourcentage de densité des glissements de terrain dans chaque classe de précipitation est indiqué sur la figure (fig. 7a).

Comme on peut le voir, la plus forte concentration de glissements de terrain s'est produite dans les deux classes de précipitations les plus élevées, allant de 1 535 à 1 635 mm (45,4%) et de 1 635 à 1 858 mm (39,4%), respectivement. Cela indique clairement qu'une grande quantité de précipitation a un impact considérable sur l'activité des glissements de terrain.

V.1.2- Les actions anthropiques

Les activités anthropiques (travaux d'aménagement et d'urbanisation rapide non planifiée), ignorant toute contrainte réelle de terrain, ont entraîné des modifications de la morphologie naturelle et une déstabilisation de versants. L'urbanisation rapide sur le versant sud, notamment après 1978 avec la construction d'H.L.M et la ZHUN de Tizi-Bouchen, et actuellement sur le versant nord de la ville, a entraîné une augmentation locale des pentes, suite aux travaux de terrassement, déblaiement de pieds de versants, modification du ruissellement de surface, chargement de remblai et ouverture des routes d'accès aux différents quartiers, déboisement et surcharges dans le milieu argileux et marneux (particulièrement sensible à l'érosion), provoquant un changement notable du drainage naturel et exposant les formations à la limite de la stabilité aux mouvements de versant.

Les talus argileux, taillés à la verticale en période hivernale, au niveau des sites d'Ighil Bouzal, Agouni Guizem, Tizi-Bouchen, les Chalets, Tadart le long de la RN12 et le long de la déviation de la même route (fig. 1c) sont les témoins de ces actions anthropiques. La faible stabilité des pentes naturelles fait que la plupart des talus de terrassement cèdent aussitôt après excavation, dans un mouvement plus rapide, suite à l'augmentation locale des pentes et la réduction de la butée de pied. Dans ce cadre, la distance

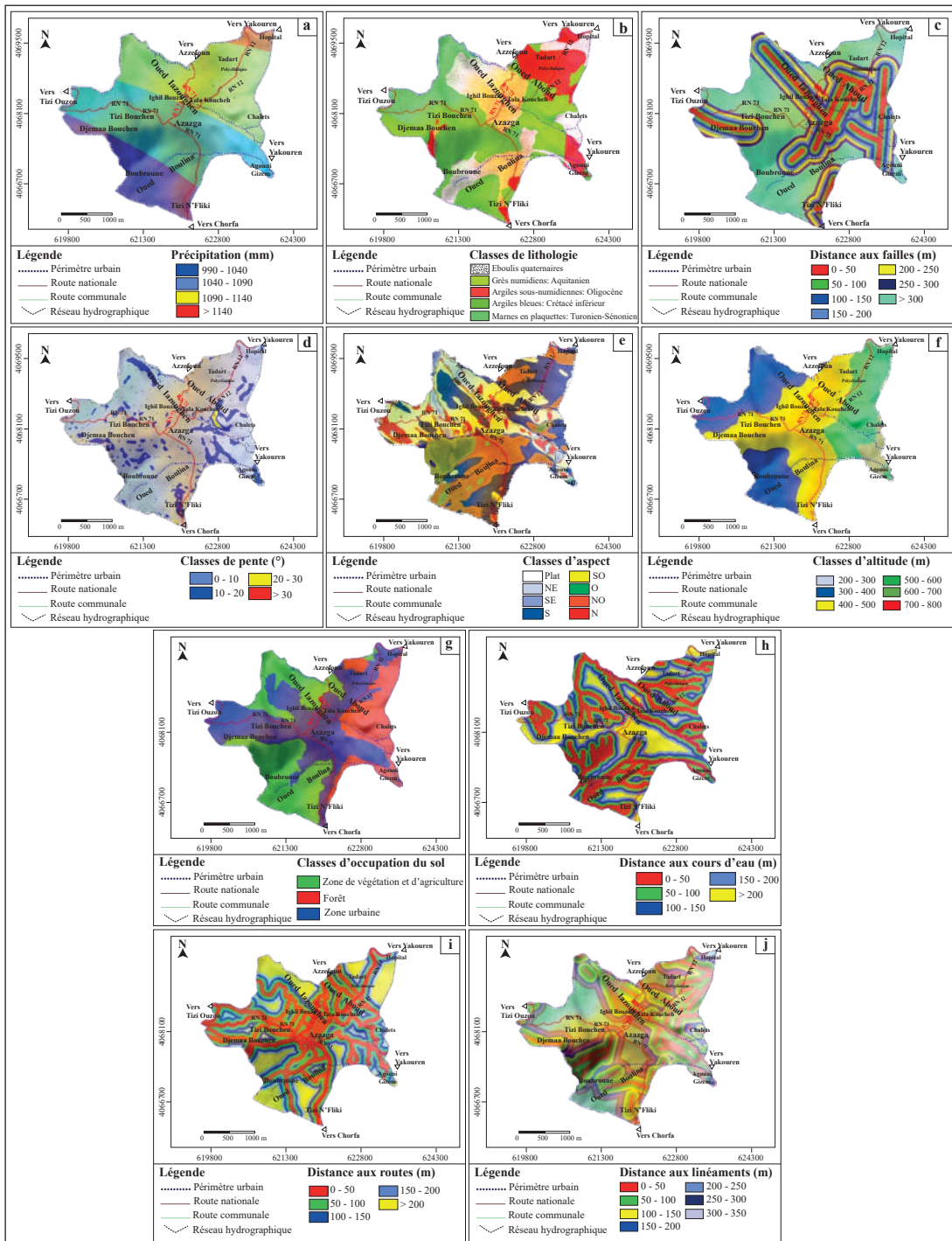


Fig. 6- Facteurs de susceptibilité aux glissements de terrain dans la zone d'étude: a) carte des précipitations; b) carte lithologique; c) carte de la distance aux failles; d) carte des pentes; e) carte d'aspect; f) carte d'altitude; g) carte d'occupation du sol; h) carte de la distance au réseau hydrographique; i) carte de la distance aux routes; j) carte de la distance aux linéaments.

Landslide-conditioning factors of the study area: a) precipitation map; b) lithological map; c) distance to faults map; d) slope angle map; e) aspect map; f) altitude map; g) land use type map; h) distance to rivers map; i) distance to roads map; j) distance to lineaments map.

ANALYSE BASÉE SUR SIG ET TÉLÉDÉTECTION DE L'INVENTAIRE, DES CAUSES ET MÉCANISMES DES MOUVEMENTS DES VERSANTS DANS LA VILLE D'AZAZGA (NORD ALGÉRIEN)

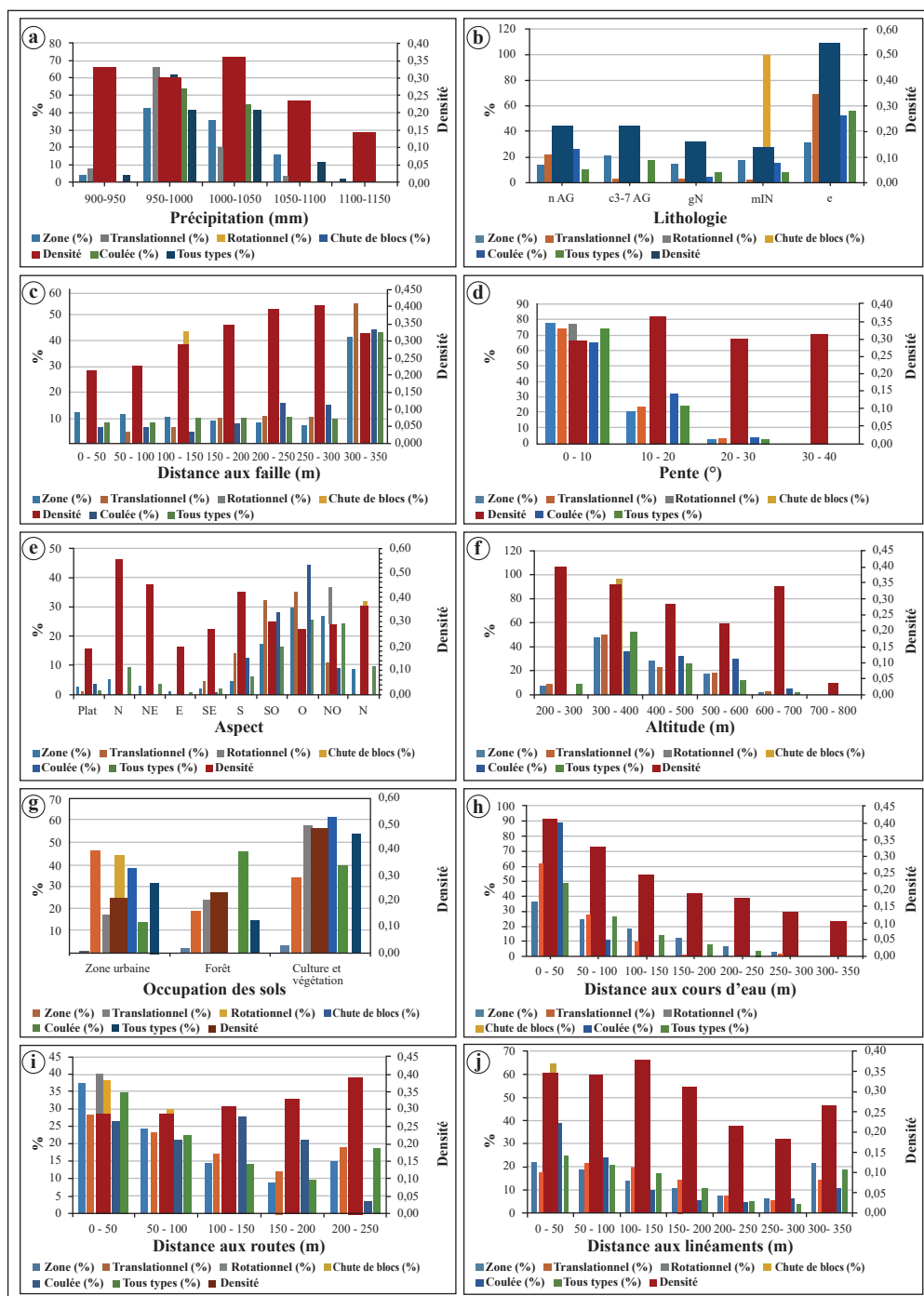


Fig. 7- Superficie et densité des glissements de terrain pour chaque classe de facteurs utilisés dans cette analyse (les valeurs sont rapportées pour chaque type de glissement de terrain et pour tous les types ensemble) : a) précipitations; b) lithologie; c) distance aux failles; d) angle de pente; e) aspect; f) altitude; g) occupation des sols; h) distance aux cours d'eau; i) distance aux routes ; j) distance aux linéaments.

Surface area and landslide density for each class of factors used in this analysis (values are reported for each landslide type and for all types together) : a) precipitation; b) lithology; c) distance to faults ; d) slope angle; e) aspect; f) altitude; g) land use; h) distance to rivers; i) distance to roads; j) distance to lineaments.

par rapport au réseau routier a été considérée comme l'un des facteurs anthropiques les plus importants, influençant les glissements de terrain, puisque les coupes-routes sont fréquemment la source d'instabilité. C'est pourquoi, il est important d'évaluer le réseau routier et les zones tampons (fig. 6i).

V.2- Les facteurs de susceptibilité

V.2.1- La lithologie

L'occurrence des glissements de terrain est liée au contexte et à la structure géologique favorables. La lithologie peut être classée en cinq catégories, comme le montre la figure (fig. 6b). Le pourcentage de densité des glissements de terrain dans chaque catégorie de lithologie est indiqué sur la figure (fig. 7b). La densité des glissements de terrain est la plus élevée dans les deux unités lithologiques suivantes: les argiles sableuses des éboulis du Quaternaire et les argiles marneuses du flysch crétacé.

Les flyschs crétacés sont fortement marqués par des formes d'instabilité et d'érosion, rendues faciles par la fragilité des sols, l'importance des pentes et l'agressivité des pluies. En effet, les argiles et les marnes sont des formations mal consolidées, friables et sensibles au ruissellement concentré et au ravinement. Ils présentent un caractère plastique à saturation, remanié et altéré en surface. Leur changement rapide d'état ou de consistance (passage d'un état solide à un état plastique) favorise cette susceptibilité aux «mouvements de versants». Ce comportement hydrologique, géomécanique et rhéologique témoigne de leur grande sensibilité à l'eau. Cela est confirmé par nos observations de terrain qui montrent des argiles altérées en surface, soumises à des cycles de retrait-gonflement et parcourues par un réseau de fentes de retrait, largement ouvertes en raison de la variation saisonnière de la teneur en eau.

Les argiles sous-numidiennes présentent également un caractère décomprimé, plastique et altéré en surface et sont alors très sensibles à l'eau. Elles sont parcourues par un réseau de fentes de retrait, largement ouvertes, favorisant l'infiltration des eaux de fissures. Ces argiles sont en conséquence sujettes au phénomène de retrait-gonflement lié aux variations saisonnières de la teneur en eau, et donc extrêmement propices aux phénomènes gravitaires.

Les éboulis quaternaires sont également très sensibles à l'érosion et sont le siège de nombreuses instabilités. Ils subissent, néanmoins, en période pluvieuse, de fréquentes instabilités, par suite de l'érosion différentielle et du ravinement de leur matrice par sapement des berges, dus aux crues des oueds Boulina, Iazoughen et Aboud. Les infiltrations des eaux de surface dans ces terrains, par l'existence de niveaux sableux locaux plus perméables, permettent également la saturation progressive et la décompression de la formation et la génération de surpressions interstitielles entraînant une perte de leur résistance.

V.2.2- La distance au réseau de failles

Les structures tectoniques, telles que les failles, sont généralement associées à de vastes zones fracturées et à des anomalies de reliefs abruptes qui présentent des conditions favorables aux glissements de terrain. C'est pourquoi, les principales discontinuités structurales produites par les failles et les fractures ont été incluses comme paramètre dans cette étude.

Dans la ville d'Azazga, l'activité tectonique semble limiter et/ou contrôler une grande partie des mouvements de masse et conditionner le type de mouvement. Cette tectonique s'est manifestée par un réseau de failles dans deux directions principales NE-SO et NO-SE, des chevauchements de grès sur les argiles du

Crétacé, des contacts anormaux entre le sous-bassement autochtone et les nappes charriées et/ou des failles. Les discontinuités entre les formations quaternaires et le substratum crétacé constituent des plans d'écoulement préférentiels favorisant les surfaces de rupture. Enfin, les contacts anormaux constituent des plans de discontinuité hydrologiques majeurs entre des formations perméables (grès et flysch) et des formations imperméables (marnes) ou les zones privilégiées pour l'infiltration des eaux. La proximité (tampons) à ces structures augmente la probabilité d'occurrence de glissements de terrain (Pradhan et Lee, 2010).

L'analyse de l'influence du réseau de failles (zones tampons ou proximité) montre (fig. 6c) que la densité des glissements de terrain est plus élevée dans un rayon de 200 m, loin des failles, puis elle diminue rapidement avec la diminution de la distance par rapport au réseau de failles. L'analyse montre que plus de 70% des glissements de terrain se produisent à plus de 200 m des failles. Par conséquent, une fonction de distance a été appliquée pour créer des zones tampons, à une distance de 50 m autour de la faille/fracture et des catégories de structures tampons ont été définies (fig. 6c). La densité des glissements de terrain pour chaque catégorie est indiquée dans la figure 7c.

V.2.3- La pente

Le gradient de la pente est un facteur de contrôle important dans la stabilité de celle-ci. La carte de gradient de la pente de la zone d'étude a été divisée en quatre catégories de pentes (fig. 6d). Le pourcentage de densité des glissements de terrain dans chaque catégorie de pente est indiqué sur la figure 7d. Cette dernière montre une bonne corrélation entre le nombre de mouvements gravitaires et la pente avec une densité élevée (60%) située dans la classe de pente (5-10°) suivie

par une densité avoisinant les 25% pour la classe de (10-20°) .

V.2.4- L'aspect

L'aspect peut être défini comme la direction de la pente descendante du taux maximal de changement d'élévation, de 0 à 360°. L'aspect d'une pente est également considéré comme un facteur important pouvant influencer indirectement la susceptibilité aux glissements de terrain, car il contrôle l'exposition à plusieurs conditions climatiques telles que l'exposition au soleil, l'intensité des précipitations et la rétention d'humidité ainsi que la couverture végétale. Dans la zone d'étude, la carte d'aspect a été classée en huit classes (fig. 6e). Le pourcentage de densité des glissements de terrain dans chaque classe d'aspect de pente est indiqué sur la figure 7e. Il est clair que, sur l'aspect Est, le pourcentage de glissement de terrain est relativement faible et qu'il augmente avec l'angle d'orientation atteignant le maximum sur l'aspect Nord, puis diminue. D'après les données de la zone d'étude, les pentes orientées Nord sont plus affectées par les précipitations.

V.2.5- L'altitude

L'altitude est également considérée comme un autre facteur important dans la stabilité des pentes. Habituellement, l'altitude est associée aux glissements de terrain en raison d'autres facteurs tels que la pente, l'érosion, les précipitations, les types de sol et l'occupation des sols. Il est utile de classer le relief local et les points de localisation des hauteurs maximales et minimales. Selon la carte d'élévation obtenue (fig. 6f), la zone d'étude montre six classes (fig. 7f). Le pourcentage de densité des glissements de terrain dans chaque classe d'altitude est indiqué sur la figure 7f. La densité est plus élevée dans la classe de 200-300 m et diminue ensuite avec l'augmentation de l'altitude.

V.2.6- L'occupation des sols

L'occupation des sols par le couvert végétal et le bâti peut influencer la susceptibilité aux mouvements de terrain. Le couvert végétal agit sur trois processus : le ruissellement, l'infiltration et l'érosion hydrique et par conséquent, l'instabilité. Dans la région d'Azazga, le couvert végétal n'est pas dense. Il est représenté par le maquis, de végétation très clairsemée et des cultures qui n'assurent pas une bonne protection de sol par suite de déboisement et extension de l'urbanisation. Les glissements de terrain se produisent dans des zones cultivées non couvertes de végétation ou irriguées en raison de l'absence des effets mentionnés précédemment. Dans la zone étudiée, trois classes de types d'utilisation des terres ont été identifiées, comme le montre la figure 6g. L'analyse de la relation entre les classes d'occupation du sol (fig. 7g) et les mouvements de terrain a montré que la forte densité des glissements de terrain est concentrée sur les deux zones : cultures et végétation (49%) et zones urbaines (32%). Cette forte densité de glissements de terrain peut s'expliquer par une très forte activité d'exploitation en culture à ciel ouvert (ou zones de culture intensive) ainsi que par l'augmentation du nombre de constructions inappropriées.

V.2.7- La distance au réseau hydrographique

L'érosion fluviale au pied des pentes est l'un des facteurs occasionnels les plus courants des glissements de terrain pouvant provoquer l'effondrement des berges en raison du sapement basal et la saturation des pentes, notamment dans les zones au relief morphologique intense et possédant un réseau de drainage dense et dans les vallées profondes. Ces cas sont principalement observés le long des cours d'eau d'Iazoughen et Boulina dans la ville d'Azazga. Des séquences pluviométriques exceptionnelles saisonnières, combi-

nées à des processus d'érosion, d'infiltration et de ravinement, entraînent l'augmentation de la teneur en eau et la saturation de la couche superficielle de terrain et favorisent le déclenchement des mouvements de terrain.

La distance par rapport aux rivières est donc considérée comme un facteur important dans la caractérisation des zones susceptibles. Une carte de la distance par rapport aux réseaux hydrographiques (fig. 6h) a été produite afin d'évaluer l'influence des réseaux de drainage sur les occurrences de glissements de terrain. La corrélation de la classe de distance respective avec les occurrences de glissements de terrain est illustrée par la figure 7h. Cette figure montre que les zones proches des rivières sont particulièrement exposées aux glissements de terrain.

L'analyse de la corrélation entre les occurrences des glissements de terrain et les réseaux hydrographiques (fig. 6h) indique clairement que les glissements de terrain sont plus fréquents à proximité des cours d'eau (fig. 7h). Elle montre que plus de 40% des glissements de terrain se produisent à moins de 50 m des cours d'eau. La fréquence des glissements de terrain diminue avec l'augmentation de la distance au réseau de drainage.

V.2.8- La distance aux réseaux routiers

La distance par rapport aux routes a été considérée comme l'un des facteurs anthropiques les plus importants qui influencent les glissements de terrain, car les coupes de routes, les excavations importantes, l'application de charges externes et l'enlèvement de la végétation sont parmi les actions les plus courantes qui ont eu lieu le long des pentes du réseau routier pendant leur construction et sont généralement les sites qui induisent l'instabilité (Ayalew et Yamagishi, 2005). Dans cette étude, une carte des distances par rapport aux routes (fig. 6i) a été établie en utilisant les cinq

catégories de tampons définis. La densité des glissements de terrain pour chaque classe de distance a été calculée, et le résultat montre qu'il n'y a pas d'influence des routes comme l'illustre la figure 7i. Près de 80% des glissements de terrain se sont produits dans l'intervalle de moins de 100 m de la fréquence des glissements de terrain.

V.2.9- La proximité aux linéaments

Les linéaments sont des zones de faiblesse caractérisées par des roches fortement fracturées et sujettes à l'instabilité. La proximité (tampons) de ces structures augmente la probabilité d'occurrence des glissements de terrain car l'érosion sélective et le mouvement de l'eau le long des plans de failles favorisent ces phénomènes (Pradhan et Lee, 2010; Pradhan et Youssef, 2010). À mesure que la distance de ces zones de faiblesse augmente, les zones susceptibles d'être touchées par un glissement de terrain diminuent également. La carte des linéaments (fig. 6j) est établie à partir des photographies aériennes en utilisant le contraste, la variation tonale et l'alignement linéaire, et est comparée avec l'imagerie satellitaire. Les linéaments prédominants sont de directions NE-SO et N-S. Une tendance montre que les endroits proches des linéaments ont augmenté la densité des glissements de terrain (fig. 7j).

V.2.10- Les caractéristiques géotechniques des unités de sol

La synthèse statistique des données géotechniques a permis de regrouper les formations géologiques de notre région d'étude en trois unités géotechniques relativement homogènes, dont leurs variations géotechniques reflètent bien la réalité géologique de dépôts:

A) Le flysch crétaqué (FC)

D'après l'analyse des résultats des essais physico-mécaniques, les flyschs crétaqués

peuvent être subdivisés en deux (02) unités géotechniques suivant leur degré d'altération qui commande étroitement leur comportement mécanique (tabl. II):

- **Les argiles gris verdâtre plastiques et décomprimées (AFCA) :** elles correspondent à la partie sommitale du substratum, altérée des flyschs. L'analyse granulométrique montre un sol fin, dont 81% (+ 50%) des passants sont de taille inférieure à 80 μm . Les caractéristiques physiques et mécaniques montrent un faciès faiblement à moyennement dense ($1,35 < \gamma_d < 1,79 \text{ t/m}^3$), saturé (degré de saturation moyen: 93%) et plastique, très sensible en présence de l'eau (les limites de liquidité W_l varient entre 50 et 81% et l'indice de plasticité I_p entre 17 et 50%). Les essais de cisaillement à la boîte de Casagrande donnent de faibles valeurs de cohésion (entre 0,15 et 0,9 bars) et d'angles de frottement (5 à 10°). Les essais œdométriques montrent des coefficients de compression (Cc) variant entre 10 et 25%, indiquant un sol assez à moyennement compressible et des coefficients de gonflement entre 4 et 5%, indiquant un sol gonflant.

- **Les argiles gris-bleu compactes (AFCC):** elles correspondent à la partie saine du substratum des flyschs crétaqués. L'analyse statistique des paramètres physiques montre un sol fin (avec des passants à 80 μm qui dépassent largement les 50%) et une densité moyenne à élevée, qui augmente fortement avec la profondeur (entre 1,38 et 2 t/m^3). Le degré de saturation atteint 100% dans les premiers mètres, puis le sol devient légèrement humide ($S_r = 54\%$) en profondeur. Le faciès est classé dans le domaine peu plastique avec des valeurs moyennes des limites d'Atterberg: $W_l = 49\%$ et $I_p = 23\%$. Les essais de cisaillement montrent des argiles profondes, non remaniées avec des valeurs de cohésion (C) entre 0,1 et 2,2 bars et des valeurs d'angle de frottement (ϕ) entre 6 et 28°. Les coefficients de compressibilité classent le sol comme

Tableau II - Synthèse statistique des caractéristiques géotechniques des formations géologiques de la ville d'Azazga.

Statistical synthesis of geotechnical characteristics of Azazga city's units.

Paramètres de sol Lithologie	Fc (%)	Sr (%)	γ_d (t/m ³)	Ip (%)	Wl (%)	Cuu (bars)	ϕ°	Vs (m/s)
	min-max moy	min-max moy	min-max moy	min-max moy	min-max moy	min-max moy	min-max moy	min-max moy
Flysch crétacé (FC)	1-20 6,6	91-100 95	1,07-1,54 1,34	15-21 18	30-41 35	9,8-60 44,12	6-28 11,95	240-500 370
Argiles sous numidiennes (ASN)	1-98 66	87-99 92	1,13-1,79 1,51	18-29 24	37-52 47,6	9,8-60 43	5-25 15,65	170-360 236
Éboulis quaternaires (E)	1-87 36	82-100 90	1,32-2 1,77	5-55 18,62	13-52 34,92	4-60 32	6-30 12,82	172-730 503

Fc : fractions fines; **Sr** : degré de saturation; **γ_d** : densité sèche; **Ip** : limite de plasticité; **Wl** : limite de liquidité; **Cuu** : cohésion non drainée; **ϕ°** : angle de frottement ; **Vs** : vitesses de cisaillement.

étant moyennement compressible (Cc entre 8 et 27%) et les coefficients de gonflement (entre 1 et 13%) indiquant un sol gonflant. La campagne d'essais Down-Hole montre des vitesses de cisaillement (Vs) entre 760 et 1011 m/s indiquant un sol rocheux.

B) Les argiles sous numidiennes (ASN)

D'après l'observation de terrain, les argiles sous numidiennes sont très altérées en surface et parcourues par un réseau de fentes de retrait largement ouvertes. La synthèse statistique des essais physico-mécaniques montre une granulométrie homogène avec prédominance argileuse qui présente une densité sèche moyenne de l'ordre de 1,65 t/m³, un degré de saturation (Sr) entre 54 et 100%, une plasticité moyenne à élevée (Wl = 28 à 67% et Ip = 15 à 46%), une cohésion qui augmente avec la profondeur (0,22 à 1,3 bars) et un angle de frottement interne compris entre 5 et 26°. Le sol est surconsolidé avec une pression de consolidation (Pc) entre 0,77 et 5,23 bars, moyennement compressible avec des coefficients de compressibilité entre 6 et 25% et un sol peu gonflant avec des coefficients de gonflement entre 1 et 15%. Les essais Down-

Hole dévoilent un sol ferme à rocheux avec des vitesses de cisaillement (Vs) entre 300 et 740 m/s.

C) Les éboulis quaternaires (E)

La synthèse statistique des paramètres géotechniques des éboulis quaternaires montre une variation des caractéristiques physico-mécaniques liée à l'hétérogénéité du sol, avec des écarts-types qui dépassent les 15% pour certains paramètres géotechniques. L'analyse granulométrique montre des argiles et des sables présentant 32 à 98% d'éléments passants à 0,08 mm. Les caractéristiques physiques montrent qu'on est en présence d'un sol détrempe (Sr = 98 %), de densité moyenne ($\gamma_d=1,68$ t/m³) et de plasticité faible à très élevée (Wl = 28 à 75% et Ip = 14 à 51%). Les essais de résistance au cisaillement non drainé montrent des cohésions très faibles à moyennes (Cuu entre 0,03 à 0,95 bars) et des angles de frottement ϕ° (UU) entre 1,8 et 32°, affirmant la présence de sables dans le sol. Les résultats des essais œdométriques montrent des argiles sableuses peu compressibles (Cc moyen = 18,44%) et peu gonflantes (Cg=6,38%). La campagne

géophysique de type Down-Hole montre des vitesses de cisaillement (V_s) moyennes de l'ordre de 390 m/s caractérisant un sol meuble.

Des formations argilo-marneuses et argilo-sableuses très sensibles à la variation de la teneur en eau, très plastiques, décomprimées et altérées en surface, prédominent. Ces formations prédominantes sont également connues par un phénomène de retrait (en période sèche) qui prépare l'infiltration des eaux (en période humide), permettant le développement de pressions interstitielles élevées dans les fissures et la réduction de la résistance au cisaillement.

VI- MÉCANISMES

Les mouvements de terrain qui affectent Azazga sont de nature et d'ampleur diverses et correspondent à des mécanismes de déformation très complexes, donnant une multitude de ruptures. L'identification de la forme et de la profondeur des surfaces de rupture étant possible en se basant sur l'étude des résultats des visites de terrain, des sondages carottés et des puits d'eau.

L'analyse des résultats d'investigation, par sondages carottés et puits menés dans une zone de glissements de terrain, a permis de caractériser le processus de déformation et la géométrie des glissements de terrain. Les résultats des observations, au niveau des sondages carottés, ont montré des surfaces de glissement entre 14 et 10,5 m de profondeur au niveau de la vallée du Boulina au sud de la ville (LCTP, 1998). Ces profondeurs sont situées dans les argiles sableuses très plastiques de la formation d'éboulis. Des sondages carottés indiquent également une surface de glissement à une profondeur de 9 m au centre-ville, située dans les sables argileux d'éboulis et une surface de glissement à une profondeur de 21 m, située dans

les grès numidiens au niveau des Chalets à l'est de la ville (LCTP, 1998). Des observations au niveau des puits paysans ont montré des déformations à des profondeurs entre 1 et 3 m au niveau de Djemaa Bouchen, à l'ouest de la ville dans les marnes crétacées, et des déformations à une profondeur de 3 m situées à l'interface, entre le substratum de flysch et les dépôts superficiels d'éboulis au niveau de Tizi N'fiki (sud de la ville) (CGS, 2019).

Les surfaces de rupture sont situées dans la zone saturée et altérée à l'interface entre le substratum de flysch argileux et la couverture d'éboulis. De plus, les surfaces de rupture sont situées sous le niveau de la nappe phréatique. En fonction de la structure hydrogéologique, la possibilité de plusieurs surfaces de rupture superposées ne peut être exclue.

Suivant les mécanismes les plus probables de leur déclenchement, ces mouvements sont favorisés et contrôlés par : (i) le pendage des flyschs crétacés conforme à la pente; (ii) le pendage des plans de schistosité des flyschs conforme à la pente de la surface de rupture parallèle aux plans de schistosité et aux diaclases; et (iii) une discontinuité géologique entre les formations superficielles (éboulis) et le substratum flysch. Ces mouvements actifs spectaculaires se localisent sur les interfluves et le long des oueds Aboud et Iazoughen: le salement de berge favorisant l'instabilité des flyschs (au pendage conforme à la pente) et/ou des éboulis sur le substratum. En outre, les contacts anormaux constituent des plans de discontinuité hydrologique majeurs entre les formations perméables (éboulis) et les formations imperméables (flyschs) qui provoquent la décompression des marnes, liée à l'infiltration d'eau dans la zone de contact entre les dépôts d'éboulis et les marnes sous-jacentes du flysch.

VII- CONCLUSION GÉNÉRALE

La ville d'Azazga est confrontée depuis des décennies à des mouvements de terrain progressifs qui affectent son tissu urbain, prenant en termes de risque, une ampleur de plus en plus grande, en relation avec le développement de l'urbanisation constituant ainsi une contrainte majeure pour le développement et l'aménagement urbain.

La carte d'inventaire des mouvements de terrain établie à partir de l'interprétation des photos aériennes et d'une image satellitaire à haute résolution Alsat 2A, et complétée par des observations de terrain, montre que le périmètre de mouvements de terrain couvre une superficie de 281,6 ha, représentant 31% de la superficie urbaine. Ces mouvements gravitaires observés relèvent de trois types de facteurs interactifs: (i) le facteur de déclenchement, lié aux précipitations hivernales concentrées, de forte intensité et particulièrement à un cumul de précipitations élevées; (ii) les facteurs de susceptibilité liés à la prédominance des formations argilo-marneuses de flyschs crétacés et argilo-sableuses d'éboulis quaternaires, très sensibles à l'eau (plastiques, décomprimées et altérées en surface et possédant de faibles caractéristiques de résistance mécanique). Ces formations renferment des aquifères sub-superficiels et par endroits superficiels. Une morphologie moutonnée et escarpée, une tectonique traduisant des discontinuités géologiques et des déformations avec un réseau de failles et fractures facilitant l'altération et notamment les infiltrations d'eau; et enfin (iii) les facteurs d'aggravation liée à l'activité anthropique par accentuation des pentes de stabilité précaire lors des travaux de terrassement, notamment en période pluviale et surcharge en remblai.

Les mesures de profondeurs des surfaces de glissements, obtenues à partir des sondages carottés et des puits, confirment l'instabilité de la

zone étudiée et mettent clairement en évidence des surfaces de rupture parfois profondes (11 à 28 m), localisées dans la zone de remaniement, située à l'interface entre le substratum de flysch et les éboulis quaternaires. Selon les mécanismes les plus probables de leur déclenchement, ces mouvements sont contrôlés et favorisés par : (i) le pendage des flyschs crétacés conforme à la pente; (ii) le pendage des plans de schistosité et diaclases des flyschs conformes à la pente; (iii) le contact éboulis-substratum flysch; et (iv) la déstabilisation de la pente par le sapement basal des oueds Iazoughen, Boulina et Aboud à écoulement torrentiel.

Afin de réduire les risques de glissements de terrain existants, les mesures recommandées sont: (i) rabattement de nappes par l'utilisation de deux techniques: les tranchées drainantes profondes ou bien les galeries combinées avec des forages drainants rayonnants; (ii) collecte, canalisation et drainage des eaux de ruissellement par installation de drains et de fossés bétonnés pour les déverser dans les oueds; (iii) contrôle avec entretien particulier des réseaux de canalisation des eaux potables ou usées afin d'éviter toutes les infiltrations d'eau dans le milieu; (iv) limite du développement urbain dans les zones sujettes aux glissements de terrain à l'aide d'une cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain; (v) contrôle au moyen de codes des activités humaines (c'est-à-dire l'excavation, la construction, le nivellement, le découpage des pentes, l'aménagement paysager, les activités d'irrigation, le défrichage de la végétation ou déboisement abusif, surcharges à l'amont du glissement, etc.); (vi) protection des développements existants par des mesures d'atténuation physique (modification de la géométrie des pentes, drainage, curage des drains existants, bermes de contrefort en contrebas servant de barrières de protection, réduction des infiltrations à la tête des glissements, dégorgeement du pied du versant et drainage des corps de glissements, protection des rives des oueds); et enfin (vii) un plan d'instrumentation (mesures

et surveillance) est nécessaire pour les grands glissements affectant la zone urbaine tels ceux de Ighil Bouzal, Tala Oukouchah, Zen, etc., par l'installation de nouveaux inclinomètres équipés de piézomètres de manière à surveiller l'efficacité des solutions adoptées (galeries ou tranchées drainantes). Il est recommandé par ailleurs de protéger les berges des oueds lazoughen et Aboud à la base du versant nord et l'oued Boulina à la base du versant sud. Cette protection est destinée à stopper l'érosion déstabilisatrice, sapant la partie aval des glissements.

REMERCIEMENTS

Cette recherche a été soutenue par le Centre National de Recherche Appliquée en Génie Sismique (CGS). L'auteur tient à remercier l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL) pour la fourniture de l'imagerie satellitaire Alsat 2A et l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) pour la fourniture des données pluviométriques. Des remerciements sont également adressés à la DUAC (Direction de l'Urbanisme, de l'Aménagement et de la Construction) de Tizi-Ouzou pour la fourniture de différentes données nécessaires pour cette recherche.

BIBLIOGRAPHIE

- ACHOUR, Y., BOUMEZBEUR, A., HADJI, R., COUABI, A., CAVALEIRO, V. AND BENDAOU, E.-A. 2017.** Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10 (194), pp. 3-16.
- AGENCE NATIONALE DES RESSOURCES HYDRIQUES (ANRH). 2013.** Données de précipitations moyennes mensuelles et annuelles de la station hydroclimatique « Azazga école » pour la période 1950-2013. *Rapport interne inédit*.
- AICHE-GEO-SOL (BUREAU D'ÉTUDES). 2013-2016.** Archives d'études de sols de la ville d'Azazga, période entre 2013-2016. *Rapports internes inédits*, pp. 40-120.
- ANIS, Z., WISSEM, G., RIHEB, H., BISWAJEET, P. AND ESSGHAIER, G.-M. 2019.** Effects of clay properties in the landslides genesis in flysch massif: Case study of Aïn Draham, North Western Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, pp. 146-152.
- AYALEW, L. AND YAMAGISHI, H. 2005.** The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology* (65), pp. 15-31.
- BHAMBRI, R., MEHTA, M., DOBHAL, DP., GUPTA, AK., PRATAP, B., KESARWANI, K. AND VERMA, A. 2016.** Devastation in the Kedarnath (Mandakini) Valley, Garhwal Himalaya, during 16-17 June 2013: a remote sensing and ground-based assessment. *Natural Hazards* (80), pp.1801-1822.
- BORGOMEIO, E., HEBDITCH, K., WHITTAKER, AC. AND LONERGAN, L. 2014.** Characterising the spatial distribution, frequency and geomorphic controls on landslide occurrence, Molise, Italy. *Geomorphology* 226 (1), pp. 148-161.
- BOOTH, AM., ROERING, JJ. AND PERRON, JT. 2009.** Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology* (109), pp.132-147.
- BOURENANE, H. 2017.** Analyse spatiale, évaluation et cartographie des risques naturels: Application à l'aménagement de la ville de Constantine (Nord-Est algérien). *Thèse de Doctorat, USTHB, Alger*, 300 p.

- BOURENANE, H. AND BOUHADAD, Y. 2021.** Impact of land use changes on landslides occurrence in urban area: The case of the Constantine city (NE Algeria). *Geotechnical and Geological Engineering*, 39 (3), pp. 1-21.
- BOURENANE, H., BOUHADAD, Y., GUETTOUCHE, M.-S. AND BRAHAM, M. 2014.** GIS-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of Constantine (Northeast Algeria). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 74 (2), pp. 337-355.
- BOURENANE, H., GUETTOUCHE, M.-S., BOUHADAD, Y. AND BRAHAM, M. 2016.** Landslide hazard mapping in the Constantine city, Northeast Algeria using frequency ratio, weights factor, logistic regression, weights of evidence, and analytical hierarchy process methods. *Arabian Journal of Geoscience*, 9 (154), pp.1-24.
- BOURENANE, H., MEZIANI, A.-A. AND AIT BENAMAR, D. 2021.** Application of GIS-based statistical modeling for landslide susceptibility mapping in the city of Azazga, Northern Algeria. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, pp. 189-202.
- BOUGDAL, R., LARRIERE, A., PINCENT, B., PANET, M. ET BENTABET, A. 2013.** Les glissements de terrains du quartier Bélouizdad, Constantine, Algérie. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72, pp. 189-202.
- CROSTA, GB., DI PRISCO, C., FRATTINI, P., FRIGERIO, G., CASTELLANZA, R. AND AGLIARDI, F. 2014.** Chasing a complete understanding of the triggering mechanisms of a large rapidly evolving rockslide. *Landslides* (11), pp. 747-764.
- EL MEKKI, A., HADJI, R. AND CHEMSEDDINE, F. 2017.** Use of slope failures inventory and climatic data for landslide susceptibility, vulnerability, and risk mapping in Souk Ahras region. *Mining Science* (24), pp. 237-235.
- CENTRE DE RECHERCHE EN GÉNIE PARASISMIQUE (CGS). 2014.** Essais géotechniques complémentaires pour l'étude de microzonage sismique de la ville d'Azazga. *Rapport interne inédit*, 110 p.
- CENTRE DE RECHERCHE EN GÉNIE PARASISMIQUE (CGS). 2019.** Étude de microzonage sismique de la ville de Azazga (Etape A3: Carte géotechnique et hydrogéologique). *Rapport interne inédit*, 67 p.
- CHEN, R.-F., CHANG, KJ., ANGELIER, J., CHAN, Y.-C., DEFFONTAINES, B., LEE, C.-T. AND LIN, M.-L. 2006.** Topographical changes revealed by high-resolution airborne LiDAR data: the 1999 Tsaoiling landslide induced by the Chi-Chi earthquake. *Engineering Geology*, 88(3-4), pp. 160-172.
- CRUDEN, D.- M. AND VARNES, D.-J. 1996.** Landslide types and processes. In: Turner AK, Schuster RL (eds) *Landslides: investigation and mitigation*, TRB special report, 247. *National Academy Press, Washington*, pp. 36-75
- DAHOUA, L., SAVENKO, V.-Y. AND HADJI, R. 2017.** GIS-based technic for roadside-slope stability assessment: an bivariate approach for A1 East-west highway, North Algeria. *Mining Science* (24), pp. 81-91.
- DJERBAL, L. ET MELBOUCI, B. 2012.** Le glissement de terrain d'Aïn-El Hammam: causes et évolution. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(3), pp. 587-597.
- DJERBAL, L., ALIMRINA, N., MELBOUCI, B. AND BAHAR, R. 2014.** Mapping and management of landslide risk in the city of Azazga (Algeria). *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*, pp. 463-468.

- DJERBAL, L., KHOUDI, I., ALIMRINA, N., MELBOUCI, B. AND BAHARN, R. 2017.** Assessment and mapping of earthquake-induced landslides in Tizirt City, Algeria. *Natural Hazards*, 87 (3), pp. 1859-1879.
- GELARD, J.-P. 1979.** Géologie du Nord-Est de la Grande Kabylie (un segment des zones interne de l'orogène littoral maghrébin). *Thèse de Doctorat, Université de Dijon, France*, 335 p.
- HADJI, R., BOUMAZBEUR, A., LIMANI, Y., BAGHEM, M. AND CHOUABI, A. 2013.** Geologic, topographic and climatic controls in landslide hazard assessment using GIS modeling: A case study of Souk Ahras region, NE Algeria. *Quaternary International* (302), pp. 224-237.
- HADJI, R., LIMANI, Y. AND DEMDOUM, A. 2014a.** Using multivariate approach and GIS applications to predict slope instability hazard: case study of Machrouha municipality, NE Algeria. *ICT-DM*, 10 p.
- HADJI, R., LIMANI, Y., BOUMAZBEUR, A., DEMDOUM, A., ZIGHMI, K., ZAHRI, F. AND CHOUABI, A. 2014b.** Climate change and its influence on shrinkage-swelling clays susceptibility in a semi-arid zone: a case study of Souk Ahras municipality, NE-Algeria. *Desalination and Water Treatment*, 52 (10-12), pp. 2057-2072.
- HADJI, R., CHOUABI, A., GADRI, L., RAÏS, K., HAMED, Y. AND BOUMAZBEUR, A. 2016.** Application of linear indexing model and GIS techniques for the slope movement susceptibility modeling in Bous-selam upstream basin, Northeast Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 9 : 192, 18 p.
- HADJI, R., RAÏS, K., GADRI, L., CHOUABI, A. AND HAMED, Y. 2017a.** Slope failures characteristics and slope movement susceptibility assessment using GIS in a medium scale: a case study from Ouled Driss and Machrouha municipalities, Northeastern of Algeria. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 42, pp. 281-300.
- HADJI, R., ACHOUR, Y. AND HAMED, Y. 2017b.** Using GIS and RS for slope movement susceptibility mapping: comparing AHP, LI and LR methods for the Oued Mellah Basin, NE Algeria. In: A. Kallel, M. Ksibi, H. Ben Dhia and N. Khélifi. *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions*, pp. 1853-1856.
- HALLAL, N., DUBOIS, L., BOUGDAL, R. ET DJOUDER, F. 2017.** Instabilités gravitaires dans la région de Béjaïa (Algérie): Inventaire et appréciation de l'importance relative des différents paramètres conduisant au déclenchement, au maintien ou à l'activation des instabilités. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 77 (1-2), pp. 631-645.
- GUIROUS, L., DUBOIS, L. ET MELBOUCI, B. 2014.** Contribution à l'étude du mouvement de terrain de la ville de Tizirt (Algérie). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73, pp. 971-986.
- GUEMACHE, M.-A., CHATELAIN, J.-L., MACHANE, D., BENAHMED, S. AND DJADIA, L. 2011.** Failure of landslide stabilization measures: the Sidi Rached viaduct case (Constantine, Algeria). *Journal of African Earth Sciences*, 59 (4-5), pp. 349-358.
- GUZZETTI, F., CARDINALI, M., REICHENBACH, P., CIPOLLA, F., SEBASTIANI, C., GALLI, M. AND SALVATI, P. 2004.** Landslides triggered by the 23 November 2000 rainfall event in the Imperia Province, Western Liguria, Italy. *Engineering Geology*, 73 (2), pp. 229-245.

- GUZZETTI, F., MONDINI, A.-C., CARDINALI, M., FIORUCCI, F., SANTANGELO, M. AND CHANG, K. 2012.** Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth Sciences Revue*, 112 (1-2), pp. 42-66.
- KARIM, Z., HADJI, R. AND HAMED, Y. 2019.** GIS-based approaches for the landslide susceptibility prediction in Setif Region (NE Algeria). *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(1), pp. 359-374.
- LARIBI, A., WALSTRA, J., OUGRINE, M., SERIDI, A. AND DECHEMI, N. 2014.** Use of digital photogrammetry for the study of unstable slopes in urban areas: Case study of the El Biar landslide, Algiers. *Engineering Geology*, pp. 73–83.
- LABORATOIRE CENTRAL DES TRAVAUX PUBLIC (LCTP). 1998-2014.** Étude géotechnique des POS entre 1998 et 2014. *Rapports internes inédits*, pp. 30-90.
- LABORATOIRE DES TRAVAUX PUBLICS (LNHC). 2003-2008.** Études géotechniques des POS dans la ville d'Azazga, période (2003-2008). *Rapports internes inédits*, pp. 50-80.
- MAHDADI, F., BOUMEZBEUR, A., HADJI, R., KANUNGO, D.-P. AND ZAHRI, F. 2018.** GIS-based landslide susceptibility assessment using statistical models: a case study from Souk Ahras province, NE Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 11(17), pp.1-21.
- MANCHAR, N., BENABBAS, C., HADJI, R., BOUAICHA, F. AND GRECU, F. 2018.** Landslide susceptibility assessment in Constantine region, Algeria, by means of statistical models. *Studia Geotechnica et Mechanica*, 40(3), pp. 208-219.
- MEKATI, S. 1992.** Étude géomorphologique des glissements de terrain de la ville d'Azazga. *Thèse de Magister, USTHB, Alger*, 300 p.
- MONDINI, AC., GUZZETTI, F., REICHENBACH, P., ROSSI, M., CARDINALI, M. AND ARDIZZONE, F. 2011.** Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using satellite optical images. *Remote Sensing Environment* (115), pp. 1743-1757.
- MOUICI, R., BAALI, F., HADJI, R., BOUBAYA, D., AUDRA, P., FEHDI, C.-E., CAILHOL, D., JAILLET, S. AND ARFIB, B. 2017.** Geophysical, Geotechnical, and Speleologic assessment for karst-sinkhole collapse genesis in Cheria Plateau (NE Algeria). *Mining Science* (24), pp. 59-71.
- ORGM. 1996.** Carte géologique d'Azzefoun-Azazga au 1/50 000. *Publication du Service Géologique de l'Algérie*.
- PRADHAN, B. AND LEE, S. 2010.** Delineation of landslide hazard areas using frequency ratio, logistic regression and artificial neural network model at Penang Island, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, (60), pp. 1037-1054.
- PRADHAN, B. AND YOUSSEF, A. 2010.** Manifestation of remote sensing data and GIS on landslide hazard analysis using spatial-based statistical models. *Arabian Journal of Geosciences* (3), pp. 319-326.
- PROKESOVA, R., KARDOS, M., TÁBOŘÍK, P., MEDVEĎOVÁ, A., STACKE, V. AND CHUDÝ, F. 2014.** Kinematic behaviour of a large earthflow defined by surface displacement monitoring, DEM differencing, and ERT imaging. *Geomorphology*, 224, pp.86–101.
- VAN WESTEN, C.-J., VAN ASCH, TH., WJ. AND SOETERS, R. 2006.** Landslide hazard and risk zonation: why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 65, pp.167-184.