

Table des matières

Introduction Générale	13
Chapitre I Glissements de terrains et changements climatiques.....	18
1. Effet des changement climatiques sur les aléas géohydrologiques.....	19
2. Approches pour évaluer les effets des changements climatiques sur les glissements	21
Chapitre II Description de la zone d'étude.....	25
1. Description générale de la région d'étude.....	26
1.1. Géologie du Haut Atlas.....	31
1.2. Géologie du Moyen Atlas	38
2. Tectonique et structuralisme de la zone d'étude.....	43
1.2. Les failles	44
2.2. Les plis.....	44
3. Couvert végétal de la région étudiée	44
1.3. Domaine forestier.....	45
2.3. Domaine agricole dans les montagnes	48
4. Mines et potentiel metallogénique de la zone	50
1.4. Anciennes mines de la région	52
2.4. Nouvelles et futures mines.....	53
5. Description des glissements de terrains dans le domaine d'étude	54
1.5. Positionnement du glissement de Tit N'Ziza Dir El Ksiba.....	54
2.5. Positionnement du glissement de Tabaroucht.....	56
Chapitre III Matériel et méthodologie de recherches	58
1. Méthodologie géotechnique	61
1.1. Indices d'instabilité.....	61
2.1. Indices géotechniques	63
2. Méthodologie hydrogéologie	66
3. Méthodologie minéralogique	67
Chapitre IV Résultats d'études hydrauliques	77
1. Processus hydrologiques et hydrogéologiques des glissements de terrain	78
1.1. Hydrogéologie du glissement de Tit N'Ziza Dir El Ksiba	78
2.1. Effets des précipitations sur les talus à risque de glissement G1	82
3.1. Étude pluviométrique du glissement G1	86

4.1.	Hydrogéologie du glissement de Tabaroucht G2.....	89
	Chapitre V Résultats d'étude géologique, géotechnique et minéralogique.....	92
1.	Etude géologique et géotechnique du glissement Tit N'ziza G1	93
1.1.	Calcul de la pente.....	93
2.1.	Sédimentologie-Lithologie.....	94
3.1.	Magnitude sismique	95
4.1.	Mécanique du sol	101
5.1.	Action anthropique.....	101
6.1.	Identification du risque	102
2.	Étude géologique et géotechnique du glissement Tabaroucht G2	109
1.2.	Origine du mouvement de terrain	112
2.2.	Étude géologique	113
	Conclusion générale	119
1.	Comportements mécaniques de la rupture	120
2.	Facteurs directs et indirects qui régissent la rupture	122
1.2.	Facteurs majeurs du glissement de Tit N'Ziza G1.....	122
1.3.	Facteurs majeurs du glissement de Tabaroucht G2	123
3.	Solutions pour la stabilité des versants	125
4.	Tendances et perspectives.....	126
5.	Répertoire de quelques glissements de terrain	127

Liste des Figures

Figure 1 :	Effets des changements climatiques sur l'environnement.	19
Figure 2 :	Organigramme et modèle des facteurs d'un glissement	20
Figure 3 :	Cartographie et localisation géographique des sites étudiés	26
Figure 4 :	Carte Géologique des principaux domaines structuraux du Maroc	30
Figure 5 :	Modèle schématique de l'orogénèse Atlasique.....	32
Figure 6 :	Vue panoramique de l'Atlas Ouaouizerht-Tabaroucht	33
Figure 7 :	Coupe géologique du chevauchement de l'Atlas Béni Mellal sur le Dir.....	35
Figure 8 :	Boutonniere paléozoïque du Haut Atlas Central des Ait Boulli	38
Figure 9 :	Dykes jurassiques dans la formation de Guettioua et le synclinal de Tagleft	36
Figure 10 :	Colline molassique éocène Atlasique du Dir El Ksiba	40
Figure 11 :	Géotraverse Aghbala-Zaouia Cheikh marnocalcaire à silex	40

Figure 12 : Colline molassique à grès rose et sable phosphaté éocène Dir El Ksiba	40
Figure 13 : Coupe géologique dans une colline molassique à karstes.....	40
Figure 14 : Modèle de la genèse des molasses pendant le tertiaire.	41
Figure 15 : Profil Géomorphologique des collines de L'atlas Dir El Ksiba	42
Figure 16 : Écailles calcaires Liasiques chevauchées sur les collines	42
Figure 17 : Structures tectoniques entre El Ksiba et Imichil (Plis-Failles)	44
Figure 18 : Formes structurales affectant les deux Atlas.....	45
Figure 19 : Forêts en dégradation genévrier thurifère l'Atlas de Zaouïa	46
Figure 20 : Quelques espèces endémiques de la région en voie de disparition.....	47
Figure 21 : Forêt envahie par la surexploitation des carrières à Matériaux	48
Figure 22 : Dégradation de la forêt par usage humain et par les cultures	49
Figure 23 : Types de minerais exploités dans la région (UMT. Alaoui 2005).....	52
Figure 24 : Mines cuivre : Ghazi Haut Atlas Central et Naour Moyen Atlas	53
Figure 25 : Profil géomorphologique simplifié d'une zone à indices de Plomb	54
Figure 26 : Carte géologique modifiée (Ministère de l'Énergie et des Mines)	55
Figure 27 : Profil géologique simplifié de la vallée à glissement de terrain G ₁	55
Figure 28 : Coupe géomorphologique simplifiée du talus à glissements	57
Figure 29 : Fonctionnement d'un tube inclinométrique	59
Figure 30 : Organigramme de la méthodologie de travail usagée	60
Figure 31 : Fissurations de tension au niveau de la piste en périodes arides	61
Figure 32 : Inclinaison d'arbres sur les miroirs Tit N'ziza et Tabaroucht	62
Figure 33 : Relation entre déformation[ϵ] et Contrainte [σ] au sein des sols	64
Figure 34 : Dispositifs pour les essais géotechniques (Laboratoire-LPEE)	65
Figure 35 : Détermination de la fraction argileuse par le Bleu de Méthylène	66
Figure 36 : Préparation des échantillons pour analyse géochimique	69
Figure 37 : Broyeur minéral et Tamis 250 μ m	70
Figure 38 : Schéma du montage d'un tube à diffraction aux rayons X	70
Figure 39 : Vue panoramique de la partie échantillonnée du glissement G1	71
Figure 40 : Résultats minéralogiques de la diffraction aux rayons X	72
Figure 41 : Lieu d'échantillonnage au niveau des miroirs du talus1/G1	73

Figure 42 : Vue panoramique de la partie échantionnée au niveau du talus G2	75
Figure 43 : Minéralogie en graphe du miroir M1 du talus G2	76
Figure 44 : Localisation et catographie des échantillons du glissement G2.....	70
Figure 45 : Situation des ouvrages hydrauliques à l’amont du Talus G1.....	79
Figure 46 : Caractéristiques hydrauliques des pièzomètres du site	81
Figure 47 : Relation hydrogéologique entre les sondages et le glissement.....	81
Figure 48 : Station météorologique d’El Ksiba et site à glissement à 1080m	82
Figure 49 : Modèle de répartition des eaux de pluies dans les sols.....	83
Figure 50 : Relation entre la température et la pluviométrie [2003]	83
Figure 51 : Diagrammes des précipitations à regimes différents [2005-2010]	85
Figure 52 : Précipitation moyenne avec emplacement des deux Talus.....	86
Figure 53 : Précipitation et cumul annuel de l’année 2018	86
Figure 54 : Impact net des Pluies 2018 sur les Structures de Faiblesse du Talus G1.....	88
Figure 55 : Impact net sur les structures de faiblesse du talus G1 [2009-2014].....	88
Figure 56 : Pièzométrie à l’amont et à l’aval du glissement en période sèche.....	88
Figure 57 : Niveau des eaux souterraines entre Juin 2016 et Juillet 2015.....	89
Figure 58 : Débits de la nappe au niveau de la source entre 2014 et 2016	91
Figure 59 : Profil schématique simplifié de la zone à glissement de terrain G2.....	91
Figure 60 : Modèle géométrique de calcul de la pente et de l’angle (α)	93
Figure 61 : Profil topographique et topogéologique du site G1	94
Figure 62 : Coupe topogéologique de la vallée à glissements G1.....	95
Figure 63 : Carte nationale de sismicite [Cherkaoui, 2008].....	96
Figure 64 : Environnement sismique et distance par à rapport au lieu de secousse.....	96
Figure 65 : Evolution du miroir M3 suite aux facteurs d’instabilite G ₁	98
Figure 66 : Comportement du talus selon la période ensoleillée et pluvieuse	99
Figure 67 : Failles affectant le site à calcaire marneux et argiles-silts	99
Figure 68 : Cinétique relative des miroirs des deux talus [2014-2017].....	100
Figure 69 : Cinétique relative au déplacement des deux talus [2014-2015]	100
Figure 70 : Impact direct des travaux de la piste sur l’instabilité.....	102
Figure 71 : Relation entre racines d’arbres et comportement des sols	103
Figure 72 : Situation de la zone du sèisme par à rapport au glissement G1	104

Figure 73 : Coupe et profil géomorphologique simplifié en 3D à risques	104
Figure 74 : Traces d'eau au niveau du talus durant toutes les périodes de l'année.....	104
Figure 75 : Profil géomorphologique des gradins des deux cols du G1.....	108
Figure 76 : Vue panoramique du versant à glissements de terrain G2.....	109
Figure 77 : Dégâts matériels liés au glissement	110
Figure 78 : Variation des plans de miroirs dans l'espace.....	111
Figure 79 : Vue aérienne du glissement Tabaroucht G2	111
Figure 80 : L'aquifère à la base du talus et une galerie de l'ancienne mine	112
Figure 81 : Types d'indices d'instabilité sur terrain.....	112
Figure 82 : Lithologie explorée par carottage minier (Mine Ghazi)	113
Figure 83 : Géologie de la zone d'étude carte Béni Mellal 1/1000000 1982.....	114
Figure 84 : Géologie et lithologie de la zone d'étude d'après des carottes minières	114
Figure 85 : Faciès et structures géologiques en relation avec la stabilité des deux talus ...	115
Figure 86 : Évolution du débit selon la pluviométrie régionale [2014-2018]	116
Figure 87 : Indices d'instabilité du versant par destruction totale du moulin	116
Figure 88 : Localisation des structures affectant le versant G1.....	121
Figure 89 : Carte de situation régionale, des glissements , et des mines.....	122
Figure 90 : Vue panoramique du glissement de la Costa Verde Lima-Pérou.....	128
Figure 91 : Cartographie et Situation des principaux glissements Dir El Ksiba.....	129
Figure 92 : Cartographie des principaux points à risque de glissement Tabaroucht.....	129

Liste des Tableaux

Tableau 1: Prélèvement des principales nappes et sources à l'amont du talus G1.....	66
Tableau 2 : Analyse minéralogique et localisation des points de prélèvement.....	71
Tableau 3 : Données minéralogiques du talus G2 Tabaroucht.....	75
Tableau 4 : Répartition des précipitations des 16 ans passés (Météorologie-Ksiba).....	84
Tableau 5 : Débits de la nappe entre 2014 et 2016.....	90
Tableau 6 : Valeurs sismiques enregistrées des deux glissements G1 et G2.....	97
Tableau 7 : Échelle cinématique d'un mouvement de terrain (Guide LCPC).....	100
Tableau 8 : Analyses et résultats de la mécanique du sol.....	101
Tableau 9 : Mésure des variations des plans de miroirs en intervalles de 20 mètres	110

REMERCIEMENTS

C'est avec un réel plaisir que je tiens à exprimer toute ma gratitude aux personnes qui, de près ou de loin, ont participé à l'élaboration de cette thèse. Avant tout, je suis particulièrement reconnaissant à Mr Najine Abdessamad promoteur de ce travail, pour ses conseils, pour sa grande disponibilité et pour son soutien de tous les jours.

Toute ma reconnaissance s'adresse aussi à Mme F.EZ Housni qui m'a agréé d'effectuer le Stage International à l'université de Guadalajara-Guzman et soutenu tout au long de mon séjour et fait profiter de sa grande expérience sur le traitement des données de terrain et leur exploitation en articles et posters. Merci également à Mr Victor Cabrera pour m'avoir accepté au sein du [CUSUR] au laboratoire du [CICAN].

Je tiens aussi à témoigner toute ma gratitude à Mr Humberto Toro qui m'a accueilli et m'a soutenu durant mon stage, grâce à eux j'ai pu disposer de nombreux conseils sur le traitement des données de terrains, merci pour le temps précieux qu'ils m'ont consacré. Je voudrais aussi remercier les rapporteurs pour avoir accepté de faire partie de mon jury et m'avoir suivi tout au long de mon travail.

Ma plus vive reconnaissance s'adresse également à Mr. Mustapha et Mr. Otman qui m'ont permis de disposer sans concession des données pluviométriques auprès de la station météorologique d'El Ksiba, durant toute la période de ma recherche doctorale. Je tiens aussi, à présenter ma gratitude à Amina. Wafik pour ses précieuses orientations et ses conseils. Pour leur grande disponibilité et leur dévouement incontestable, j'adresse mes plus vifs remerciements à Mr le Doyen, le Président, le Vice - Président et à Mr de l'université. Un tout grand merci également à mes ex – professeurs du Master Sp, que Mr K. Mehdi trouve ici l'expression de mes plus vifs remerciements pour m'avoir fait profiter de leur expérience dans la collecte des données sur le terrain.

J'exprime aussi ma gratitude à tout le personnel administratif de l'université pour leurs nombreux encouragements et leurs aides. Toute ma gratitude s'adresse aussi à l'ensemble des professeurs du département de géologie pour leurs conseils et leur soutien en matière de matériel, et plus particulièrement à Mr M. Baghdadi le responsable du Laboratoire Gestion et Valorisation des Ressources Naturelles.

En fin, je tiens à remercier tout particulièrement ma famille et mes amis qui m'ont soutenu tout au long de ce travail. Sans oublier le soutien des services techniques des deux communes territoriales et toutes celles et ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation du présent travail.

DÉDICACES

Louange à Dieu, le seul et unique créateur de cet Univert.....

À l'âme de mes chers parents, que Dieu Le Tout Puissant les Ait en Sa Sainte Miséricorde

À mes très chers proches.....

Témoignage d'affection et de grande reconnaissance, Que Dieu les garde.....

À toute ma famille, Mes très chers frères et sœurs, Mes Oncles et Tantes À tous ceux que j'aime.....

À tous ceux qui ont participé de loin ou de près à la réalisation de ce travail.....

À mon pays, Avec l'expression de tous mes sentiments de respect, Je dédie ce modeste travail.....

PRÉFACE

La géologie est la science qui étudie la Terre dans ses différentes parties directement accessibles à l'observation, s'efforçant de reconstituer leur histoire par l'étude de leur agencement. Elle traite avec d'autres sciences associées de la composition, de la structure, de l'histoire et de l'évolution des couches internes et externes du globe terrestre, et des processus qui la façonnent.

La géologie est une discipline importante parmi les sciences de la Terre. L'axe du temps géologique est étendu. Grâce à des méthodes de datation radiochronologiques appliquées aux études de diverses météorites, une détermination fiable de l'âge de la Terre indique un peu plus de 4,55 milliards d'années.

La géologie intervient, en même temps que la géophysique appliquée, dans la recherche et/ou l'exploitation des ressources naturelles notamment le pétrole, le charbon, les minerais, les pierres précieuses et semi-précieuses et l'eau.

Il existe, à côté de disciplines savantes très compartimentées, une géologie d'amateurs, animée par d'excellents auteurs scientifiques. Elle commence souvent par la connaissance assidue du terrain.

La paléontologie ou l'étude des fossiles en est une branche bien vivante, portée par la mode des dinosaures. Le respect de l'environnement et le besoin de connaissances en paléoenvironnement et écologie rétrospective suscitent aussi des mutations au sein de la géologie, avec apparition de disciplines nouvelles telles que la géologie environnementale et la géotechnique environnementale. *L'encyclopédie libre*

Cette science de la terre connaît ses prémices vers 1660 dans les pays du Nord avec les premiers travaux du géologue danois *Niels Stensen*, connu en français sous le nom de *Nicolas Sténon*, aussitôt suivis par l'Angleterre et les régions britanniques, puis plus tardivement en France vers 1700. En 1750, c'est une science établie en Europe occidentale.

Parmi les disciplines que nous avons usagées dans l'exploration et l'expertise des zones d'étude, on a fait recours, notamment, à la géologie structurale, l'hydrogéologie, la géochimie, la sédimentologie-stratigraphie des substrats, et la géotechnique, où la mécanique du sol reste l'outil pour avoir une idée sur l'état des sols en présence, notamment, d'un excès d'eau durant la période humide [Octobre - Mai].

AVANT-PROPOS

A l'issue de mon mémoire de thèse de doctorat national en Ressources Naturelles, Environnement, et Santé RNES, sur les glissements de terrains faces aux changements climatiques dans les montagnes de l'Atlas Béni Mellal-Khenifra, de nombreux sites ne sont pas étudiés. A travers cette étude basée sur la géomorphologie des zones à forts risques de mouvements de terrains, j'ai essayé d'axer mon travail sur deux secteurs espacés de plus de 55 km à vol d'oiseau, et présentent des différences de point de vue géologie, altitude, magnitude sismique, précipitations et couvert végétal, afin de comparer leurs facteurs déclenchant pour en tirer des recommandations et proposer des solutions adéquates.

En effet, les glissements de Tit N'Ziza et de Tabaroucht ont constitué l'exemple principal de ma recherche, ont toujours été comme un pionnier en matière d'usage des nouvelles méthodes de recherches basé sur les risques naturels faces aux changements climatiques. C'est à partir de ce constat que j'ai choisi de centrer ma thèse durant ces quatre années de formation doctorale en recherches scientifiques sur l'apport des nouvelles techniques dans l'évolution de l'application de la géotechnique et la mécanique du sol.

Faute de temps et de logistique pour explorer d'autres sites existant sur le territoire de cette région, j'ai opté de recentrer mon travail entre le Haut Atlas et le Moyen, soit disant la zone de transition dite « Atlas de Béni Mellal-El Ksiba ».

Ma volonté initiale était d'aborder l'usage des données géotechniques en relations avec les précipitations régionales et/ou locales pour identifier la problématique de ces glissements, et la rupture du sol en fonction de la dégradation de la flore notamment le chêne vert géant. Le recours aux études minéralogiques des substrats s'est avéré indispensable pour confirmer les résultats de la mécanique du sol.

A partir de là, j'ai décidé de resserrer mon analyse aux alentours de la géologie, la géotechnique, l'hydrogéologie, la pluviométrie et l'action anthropique.

Mon choix s'est porté en premier lieu sur l'application des données géotechniques et celles de l'hydrogéologie pour avoir une idée sur le comportement de ces sols pendant les périodes pluvieuses et d'en déduire les périodes néfastes pour ces talus. L'analyse des structures de faiblesse telles les failles m'a permis de détecter les accidents dus aux changements climatiques. La magnitude sismique est une technique non envisagée dans l'expertise de ces glissements de terrains, mais reste un facteur précurseur indirect.

RÉSUMÉ

Ce travail de recherche est axé sur l'étude des instabilités gravitaires dans les deux zones Imhiwach-El Ksiba et Ouaouizerht-Tabaroucht de la Région Béni Mellal-Khenifra Maroc et sur le rôle des facteurs géologiques, hydrogéologiques, minéralogiques, et mécaniques dans le déclenchement des glissements de terrain.

Le premier est le glissement de Tit N'Ziza et le deuxième est celui de Tabaroucht. Le but de cette démarche scientifique est d'établir, à partir d'une étude de cas spécifique de glissement, une méthodologie utilisable et transposable en géologie pour des sites susceptibles de glisser et ayant un matériau ou une lithologie similaire, les mêmes facteurs de prédisposition et le même contexte géomorphologique et géologique, qui permet surtout d'identifier les causes directes et indirectes de ce risque dans un contexte de changement climatique. L'approche de l'étude est à la fois quantitative (calculs) et bien entendu qualitative par vérification sur le terrain et validation à partir de données historiques.

Au terme de ce travail, les différents facteurs géologiques, hydrogéologiques, minéralogiques, et mécaniques ont été définis pour chaque glissement de terrain afin de déterminer les facteurs déclenchant. Leurs études ont aussi permis d'améliorer la compréhension d'une instabilité gravitaire pour proposer possible solution au problème.

Pour ces deux zones à glissement de terrain, nous avons déterminé une série de caractéristiques mécaniques, structurales et hydrogéologiques, minéralogique qui permet d'avoir au final une bonne compréhension des mécanismes qui régissent la rupture des talus et des versants susceptibles aux géorisques naturels

La documentation des événements correspond à une liste d'événements observés, cette documentation comprend des données descriptives sur les processus déterminants, les dommages constatés, la zone affectée, les facteurs déclenchant (en particulier les conditions météorologiques), de même que d'autres données concernant le déroulement de l'événement.

Mots clés

Glissements de terrain, Géologie, Hydrogéologie, facteurs déclenchant, Changement Climatique, Maroc

ABSTRACT

This research work is focused on the study of gravity instabilities in the two zones Imhiwach-El Ksiba and Ouaouizerht-Tabaroucht of the Beni Mellal-Khenifra Region of Morocco and on the role of geological, hydrogeological and mechanical factors in triggering landslides.

Ground The first is the sliding of Tit NZisa and the second is that of Tabaroucht. The purpose of this scientific approach is to establish, based on a specific slip case study, a methodology that can be used and transposed to geology for sites that can slide and have a similar material or lithology, the same predisposing factors and the same geomorphological and geological context, which above all makes it possible to identify the direct and indirect causes of this risk in a context of climate change. The approach of the study is both quantitative (calculations) and of course qualitative by field verification and validation from historical data.

At the end of this work, the various geological, hydrogeological and mechanical factors were defined for each landslide in order to determine the triggering factors. Their studies have also improved the understanding of gravitational instability to propose possible solution to the problem.

For these two landslide zones, we have determined a series of mechanical, structural and hydrogeological characteristics, mineralogical which allows to finally having a good understanding of the mechanisms that govern the rupture of embankment slopes and slopes with natural georisk.

Event documentation is a list of observed events. This documentation includes descriptive data on the critical processes, the damage observed, the affected area, the triggering factors (especially weather conditions), as well as other data concerning the course of the event.

Keywords

Landslides, Geology, Hydrogeology, Mineralogy Declenchant Factors, Climate Change, natural Georisk Morocco

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les mouvements de terrain sont des déplacements (avec ou sans rupture) vers l'aval de masses rocheuses compactes ou désagrégées et/ou de terrain meuble (sols y compris) et d'eau, sous l'effet de la gravité (Benouis, 2010). Ils peuvent se produire sous forme de processus brutaux (chute de pierres et de blocs, éboulement et écroulement, glissement soudain, coulée boueuse, effondrement) ou lents et progressifs (fluage, glissement lent permanent).

Les processus à l'origine des mouvements de terrain sont très complexes et dépendent rarement d'une seule cause. La géologie, le relief et l'exposition sont des paramètres fondamentaux, plus au moins constants sur de longues périodes, ils déterminent la prédisposition générale du terrain aux phénomènes d'instabilité. Le processus qui mène à une telle instabilité commence en fait dès la formation de la roche, c'est-à-dire lorsque les propriétés chimiques et physiques de celle-ci sont bien établies.

Ces propriétés déterminent notamment son comportement face à l'altération et à l'érosion. Les mouvements de terrain résultent d'un changement de l'équilibre des forces dans le versant (rapport entre forces résistantes et forces motrices), à la suite de processus physiques et / ou chimiques qui, à leur tour, dépendent de différents facteurs.

Ainsi, les processus d'altération agissant à long terme (conduisant à une diminution des forces résistantes), de même que les fluctuations de la nappe phréatique, influencent la stabilité d'un versant de manière continue.

Par ailleurs, une pente peut aussi être déstabilisée rapidement, soit à la suite de l'érosion par une rivière au pied du versant, soit, mais plus rarement, suite à un tremblement de terre à secousses très fréquentes.

En général, l'eau joue un rôle déterminant pour les mouvements de terrain, elle produit des pressions hydrostatiques dans les pores (pressions interstitielles), les fissures et les failles, de même que des forces de percolation.

À l'état de glace, elle a en plus la capacité d'induire des mécanismes de rupture notables. Par ailleurs, elle peut provoquer le gonflement des minéraux argileux (pression de gonflement). La stabilité des pentes en équilibre critique peut être sensiblement réduite par ces divers effets. Le déclenchement d'un processus dangereux survient lorsque la valeur limite d'un des facteurs déterminants est atteinte ou dépassée. Les cycles de gel / dégel, les

précipitations éventuelles, de forte intensité ou de longue durée - éventuellement combinées à la fonte des neiges, conduisent souvent à des mouvements de terrain spontanés.

Il n'est pas rare que les mouvements de terrain soient favorisés par des influences anthropiques. Ainsi, la surcharge d'une pente par des bâtiments et des remblais, les excavations sans dispositifs de protection dans un versant lors de travaux de construction, la surélévation du niveau de l'eau souterraine, le dynamitage, l'exploitation inappropriée de matières premières ou l'affectation inadéquate du sol peuvent accroître le danger de mouvements de terrain.

Les effets anthropiques peuvent aussi contribuer à une déstabilisation à long terme du versant, en relation avec d'autres activités comme le déboisement, l'entretien insuffisant des forêts, le surpâturage, l'exploitation intensive et la dénudation du sol, dans la majorité des cas, les glissements de terrain dépendent de deux causes principales : l'eau et la présence des fractions fines.

Les glissements de terrain peu profonds induits par les précipitations sont l'un des aléas naturels les plus courants et les plus dangereux, principalement en raison de leur fréquence temporelle élevée, entraînant chaque année des décès et des dommages économiques importants (Melchiorre et Frattini, 2012).

Au cours des dernières années, la préoccupation grandit parce que les effets du changement climatique pourraient exacerber l'impact des glissements de terrain. En raison de l'effet thermodynamique, une atmosphère de réchauffement se traduit par une teneur en humidité de l'air plus élevée, ce qui peut à son tour accroître la fréquence et l'intensité des fortes précipitations (Trenberth, 1999).

Les glissements de terrains dans l'Atlas Central du Maroc, affectent la plupart des versants géologiquement instables et surtout la piste aménagée entre deux villages Ouaouizerht et Tabaroucht.

Le but de cette démarche scientifique est d'établir, à partir d'une étude de cas spécifique de glissement, une méthodologie utilisable et transposable en géologie pour des sites susceptibles de glisser et ayant un matériau ou une lithologie similaire, les mêmes facteurs de prédisposition et le même contexte géomorphologique et géologique, qui permet surtout d'identifier les causes directes et indirectes de ce risque dans un contexte de changement climatique. Ce travail nécessite dans une analyse fine des facteurs de

prédisposition pour chacun des cas de glissements de terrain choisis. En final l'ensemble des indicateurs morpho-structuraux, géologiques, géomorphologiques et hydrogéologiques de ce travail devrait permettre de préciser les causes les plus probables des instabilités et dégager une méthode d'approche utile pour l'aménageur et les bureaux d'études.

Pour réaliser ce travail on a choisi deux sites glissés représentatifs : le premier c'est le glissement de Tit N'Ziza G1 et le deuxième est de Tabaroucht G2. L'approche de l'étude est à la fois quantitative (calculs) et bien entendu qualitative par vérification sur le terrain et validation à partir de données historiques.

Afin d'avoir une analyse fine des facteurs direct et indirect de prédisposition il est envisagé dans la suite de ce travail de thèse de structurer le raisonnement suivant en cinq chapitres. Dans le premier chapitre, on présente tout d'abord une synthèse de la relation entre le changement climatique et le glissement de terrain. Ensuite un bilan de quelques travaux scientifiques réalisés les dernières années sur le sujet.

Le but de ce chapitre c'est de contextualiser le sujet de la thèse. Dans le deuxième chapitre on réalise une description du secteur d'étude de point de vue géographique et géologique. Le troisième chapitre, on décrit la méthodologie de recherche utilisée dans ce travail. Dans les chapitres quatre et cinq, on trouve les résultats d'analyse hydrogéologique, géotechnique, géologique/tectonique et minéralogique des deux glissements en question.

Enfin, une conclusion générale sur la problématique de l'instabilité et le risque de deux glissements de terrain, ainsi que des recommandations en qualité de produit d'expertise sur le sujet ou des perspectives de stabilisation.

Les problèmes de stabilité de pentes se rencontrent fréquemment dans la construction des routes, des canaux, des digues et des barrages. En outre certaines pentes naturelles sont ou peuvent devenir instables. Une rupture d'un talus peut être catastrophique et provoquer des dégâts naturels considérables ainsi que des pertes de vies humaines.

L'estimation de la sécurité réelle vis-à-vis du risque de rupture est une question complexe surtout dans le domaine des données limitées ou peu connues. L'étude d'un talus comporte, en outre la reconnaissance du site et le choix des caractéristiques mécaniques des sols, un calcul de stabilité pour déterminer d'une part la courbe de rupture le long de laquelle le risque de glissement est le plus élevé, d'autres parts la valeur correspondante du coefficient de sécurité FS. Cependant une longue expérience a été acquise tant que les

méthodes de calcul que dans les techniques de construction, de telle sorte que les problèmes de stabilité de pentes peuvent maintenant être résolus avec une assez bonne fiabilité. *Génie Civil et Géotechniques 2012.*

Les zones où affleurent les basaltes présentent une certaine stabilité gravitaire, d'après la coupe géologique, le basalte en place constitue un pilier des terrains friables.

Les travaux d'équipement sont le facteur primordial des mouvements de terrain, donc l'action anthropique est majeure dans ces deux cas d'étude. Les travaux d'équipement doivent être précédés par des études préliminaires de chaque zone où les routes, barrages et ponts vont être réalisés. Une cartographie régionale des points noirs à risque d'éventuels glissements s'avère indispensable.

Les sondages carottés nous donnent, bien sur, une idée sur la variation verticale du substratum, par la suite peuvent nous aider à concevoir un log lithostratigraphique.

Les niveaux piézométriques mesurés en amont du talus, en cuvette à l'Est, montrent que la nappe peut jouer un rôle principal aussi dans l'apparition d'un aquifère au pied de la partie glissée. Les variations des hauteurs de la nappe au cours de l'année du fait de sa forte réactivité aux pluies et, en conséquence, des gradients hydrauliques à mi versant.

La connaissance d'autres paramètres de ce glissement, telle sa surface de rupture, nécessite l'engagement d'un matériel efficace pour la mesurer, c'est l'inclinomètre qui doit être enfoncé à l'aval du talus. En effectuant des mesures chaque mois ou chaque deux mois, après on peut calculer aussi sa vitesse absolue par situation des niveaux des déformations et déduire les dates à forts risques pour le futur.

La carte topographique est le document de base pour toute analyse de stabilité. Elle contient nombre d'informations pertinentes pour l'identification des dangers sous forme de symboles, de signes et d'autres éléments graphiques. Ainsi, par exemple, la morphologie des zones en glissement est souvent visible par le bombement des courbes de niveau; des symboles de blocs éboulés au pied d'une falaise peuvent laisser présager une production notable d'éboulis.

Le levé topographique se fait à l'échelle locale directement sur la zone concernée par le glissement, nous permet de bien tracer le profil à travers le site et de bien décrire les différentes couches des sols ainsi que leurs caractéristiques physico - mécaniques pris en compte pour l'évaluation de la stabilité du site.

Deux remarques relatives aux conditions du sol s'imposent, les problèmes les plus critiques de stabilité des pentes se présentent d'ordinaire, en premier lieu, sur les sols à grains fins et particulièrement sur les argiles. Ceci résulte en partie de ce qu'il est difficile de les drainer et de ce que, sur ce genre de sol, les processus d'érosion par ruissellement et vagues amènent de nombreuses pentes au point de rupture.

Le second point concerne le comportement des sols à grain fin impliqués dans un déplacement des terres. En acquérant par moulage une autre forme, ils peuvent perdre une fraction notable de leur résistance.

On désigne l'importance de cette perte sous le nom de sensibilité. Les hautes sensibilités correspondent aux grandes pertes de résistance. Il se peut, que les débris d'un glissement de terrain sur sols à haute sensibilité ne séjournent pas au pied de la pente, mais se dispersent et s'en éloignent. Il ressort de ce qui précède que les sols à grain fin sensibles au changement de forme exigent une attention spéciale sous le rapport de la stabilité des pentes et des versants.

L'identification des dangers dus aux mouvements de terrain repose sur une documentation objective de diverses observations et mesures impliquant un danger donné.

Il faut s'assurer de prendre en compte les différentes observations sur le site ainsi que les relevés inclinométrique en essayant de bien les interpréter.

La carte géologique donne des renseignements utiles sur la lithologie, sur l'agencement structural (orientation et pendage des couches et des discontinuités) et sur la couverture quaternaire (moraine, éboulis ou glissement de terrain, par exemple).

Elle donne encore des indications sur les circulations d'eau souterraine en milieu poreux et fissuré. Sur la base de ces données cartographiques, on peut reconstituer la structure tridimensionnelle des unités géologiques et évaluer le contexte de formation de possibles mouvements de terrain.

Les différents phénomènes d'instabilité de pente, comme les glissements ou les éboulements généralisés sont représentés en général sur une carte géologique au 1:25000 par leur périmètre.

Il n'est pas fait mention de l'intensité ou de la fréquence de ces divers phénomènes. Ces informations permettent toutefois de localiser les zones sensibles aux mouvements de terrain, qui devront faire l'objet d'études plus poussées. (J.Boussageon).

Chapitre I

GLISSEMENTS DE TERRAIN ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES

1. EFFET DES CHANGEMENT CLIMATIQUES SUR LES ALÉAS GÉO-HYDROLOGIQUES

L'évaluation des effets du changement climatique sur l'environnement naturel interpelle la communauté scientifique et pose des problèmes de réflexion aux politiciens. Le réchauffement climatique actuellement est sans précédent (Diffenbaugh et Field, 2013, GIEC, 2014, Lo Presti et al. 2015) et ces effets sur les aléas géohydrologiques (inondations, glissements de terrain, sécheresses, etc.) restent difficiles à déterminer et à prédire. C'est pour cela qu'il est nécessaire de comprendre et de mesurer comment les variables climatiques et leur variabilité affectent les risques géohydrologiques, y compris les glissements de terrain. Fig1.

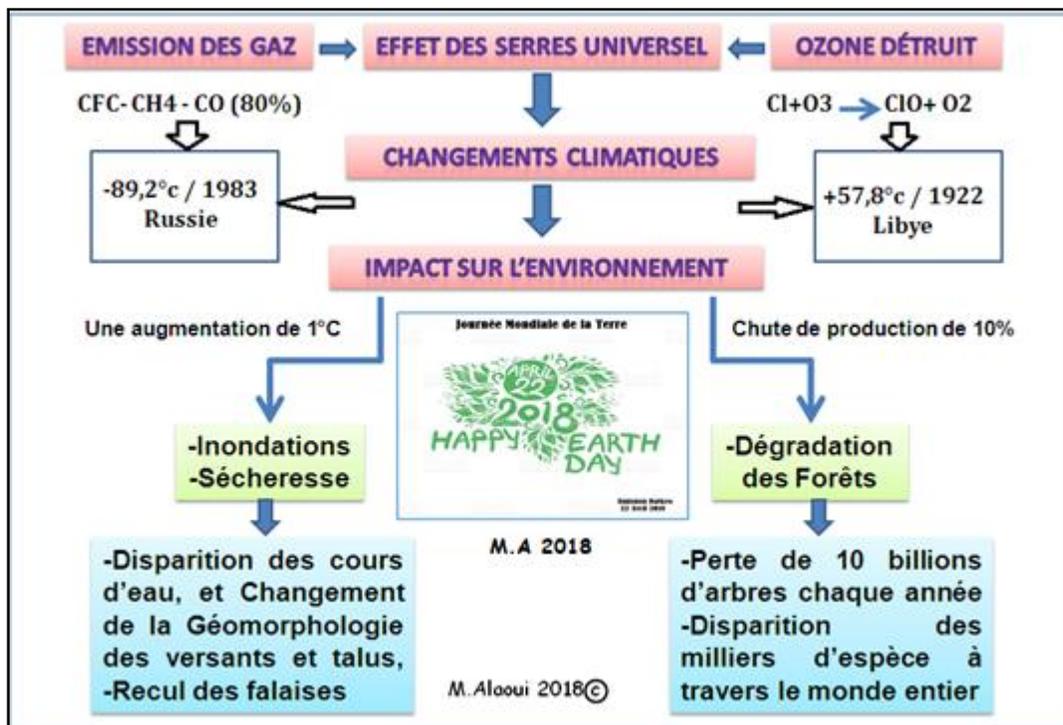


Figure 1: Effets des changements climatiques sur l'environnement

Un glissement de terrain est un type de processus de gaspillage de masse qui agit sur les pentes naturelles et artificielles. C'est le mouvement d'une masse de roche, de débris ou de terre en pente descendante, sous l'influence de la gravité (Cruden et Varnes, 1996, Hungry et al. 2013).

Les glissements de terrain impliquent couler, glisser, tomber, tomber ou s'étendre, et de nombreux glissements de terrain présentent une combinaison de différents types de mouvements, en même temps ou pendant la durée de vie du glissement de terrain. Les glissements de terrain sont présents sur tous les continents et jouent un rôle important dans l'évolution des paysages. Dans de nombreuses régions, elles représentent également une menace sérieuse pour la population (Petley, 2012).

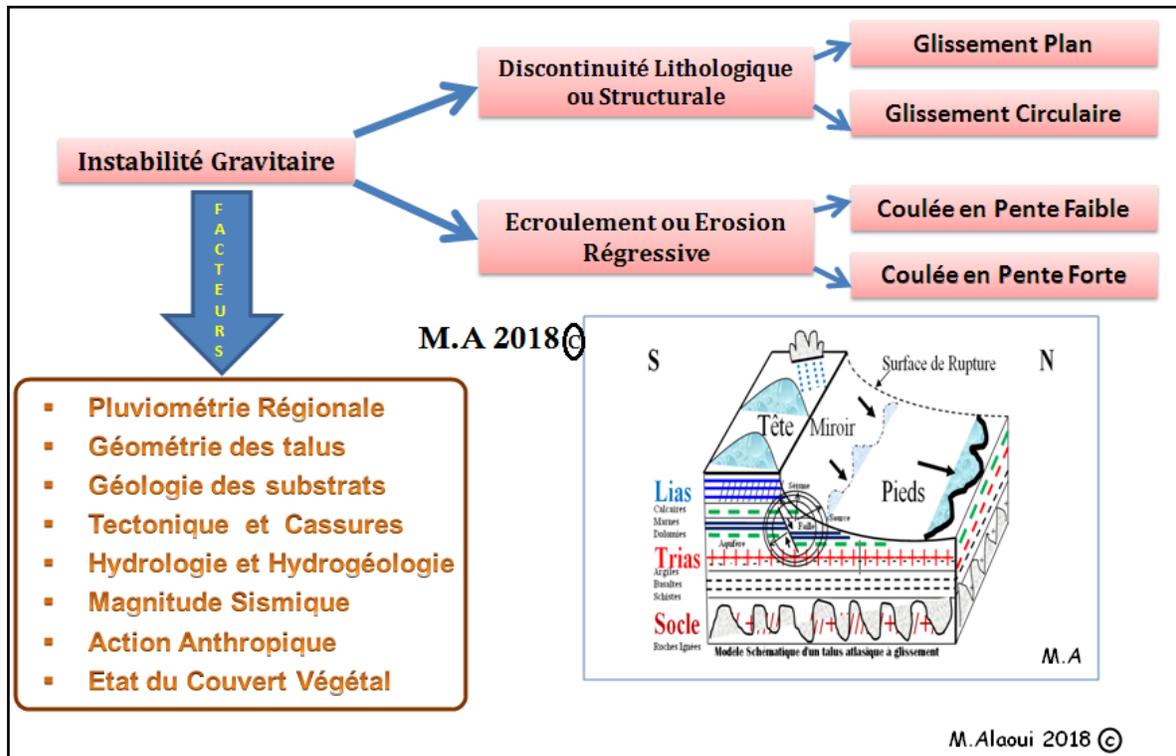


Figure 2 : Organigramme et modèle des facteurs d'un glissement de terrain

Le terme de glissement est relativement général relatif à la stabilité des pentes ("slopeinstabiliy"), mais il désigne essentiellement un processus de mouvement de versant ("Landslide"). La gravité fait subir continuellement des pressions sur les versants affectant ainsi toutes sortes de matériaux (sols et roches).

Les mouvements de masses (de type rotationnel ou transationnels) sont initiés à partir d'une surface dite de rupture créée sous l'action de contraintes tangentielles excédant la résistance au cisaillement des matériaux. La gravité d'une instabilité de terrain est très souvent imputée à la présence de l'eau dans les matériaux mobilisés. Ce facteur peut aussi bien agir dans le déclanchement comme dans le mode de propagation. Fig.2.

2. APPROCHES POUR ÉVALUER LES EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES GLISSEMENTS

On retrouve dans la littérature plusieurs définitions sur les « glissements de terrains » ou « Mouvement de masses » dont les plus utilisées sont les suivantes : Un glissement de terrain correspond à un : « déplacement d'une masse de terrains meuble ou rocheuse le long d'une surface de rupture par cisaillement qui correspond souvent à une discontinuité préexistante.

Le mouvement est engendré par l'action de la gravité, de forces extérieures (hydrauliques ou sismiques) ou d'une modification des conditions aux limites » (Ghenani, 2003). Un glissement de terrain est le mouvement du sol ou de la roche dirigée par la gravité ; ce mouvement s'effectue généralement lentement ou rapidement, mais non très lentement. Il peut être superficiel ou profond, mais les matériaux qui le composent doivent former une masse constituant une portion du flanc même. Le mouvement doit être dirigé vers le bas et l'extérieur avec une face libre.

Le terme de glissement de terrain est utilisé dans son sens large pour désigner des mouvements orientés vers le bas et l'extérieur de matériaux formant une pente (sol ou roche naturels). Il peut être dû à de grandes averses, à l'érosion du sol et à des secousses sismiques ; il peut aussi survenir dans certaines régions lors d'importantes chutes de neige.

Les glissements de terrain sont difficiles à évaluer en tant que phénomène isolé. Il semble donc approprié d'associer les glissements de terrain à d'autres dangers tels que les cyclones tropicaux, les tempêtes locales violentes et les inondations dues aux crues de rivière (Opérations connexes de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge, 2006).

Il existe deux types de glissement de terrain d'après l'Office fédéral de l'environnement suisse (OFEV).

Les glissements rotationnels : "Lors de glissements rotationnels, la masse se déplace vers l'aval le long d'une surface de rupture circulaire. Habituellement, les glissements de type rotationnel sont de faible volume et le déplacement des matériaux est limité. Ils se produisent principalement dans des terrains meubles homogènes surtout argileux et silteux."

Les glissements translationnels : "Lors de glissements translationnels, quelques horizons de terrain ou un ensemble des couches se déplacent selon une surface de

glissement plus ou moins plane. Les glissements transationnels s'étendent sur des surfaces de taille très variable, allant jusqu'à 30 km². L'épaisseur des masses glissées peut atteindre plusieurs dizaines de mètres."

Plus généralement, on considère trois types de mouvements de terrain : les mouvements lents et continus, les mouvements discontinus et rapides, ainsi que l'érosion littorale. (Larre, 2015). Sans oublier la migration des falaises ou le recul littoral.

Le cinquième rapport de synthèse du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Intergovernmental Panel on Climate Change, (GIEC), 2014], comme les quatre rapports précédents, n'a pas fourni un aperçu global des glissements de terrain.

Les glissements de terrain ont été pris en compte dans le rapport spécial du GIEC « Gérer les risques d'événements extrêmes et de catastrophes pour favoriser l'adaptation aux changements climatiques » (Seneviratne et al. 2012), où l'on peut lire : « Les changements de vagues de chaleur, / ou la dégradation du pergélisol affectera les instabilités de la pente en hautes montagnes, et la confiance moyenne que les changements liés à la température influenceront la stabilité du substratum rocheux. Il y a également une grande confiance que les fortes précipitations affecteront les glissements de terrain dans certaines régions dans le contexte du changement climatique ».

Des considérations sur les glissements de terrain locaux ou régionaux ont été fournies dans les rapports du groupe de travail II du GIEC publiés en 2007 (Parry et al. 2007) et 2014 (Field et al, 2014, Barros et al, 2014). De manière significative, le rapport de synthèse du GIEC (2014) a fourni des évaluations sur les risques d'inondation, et a conclu que le nombre de personnes exposées aux inondations devrait augmenter dans le monde entier. Cependant, il manque une évaluation mondiale similaire du risque de glissement de terrain sur la population.

Dans les dernières années, seuls quelques auteurs ont réalisé des études systématiques et critiques, de concepts, d'idées et de résultats d'analyses sur l'impact du changement climatique sur les glissements de terrain (Dikau et Schrott, 1999, Sidle et Ochiai, 2006, McInnes et al. 2010, Coe et Godt, 2012). Dans ce chapitre, on va essayer de citer quelques études pour comprendre l'importance de la relation entre le changement climatique et les glissements de terrain.

Dikau et Schrott (1999) résume les résultats d'un projet de 3 ans financé par la Commission Européenne dans le 5ème programme-cadre communautaire européen. TESLEC « *Temporal Stability and activity of Landslides in Europe with Respect to Climatic change* ». Le projet était axé sur trois objectifs principaux : (i) la définition des critères pour la reconnaissance des glissements de terrain, (ii) Reconstruction, distributions passées des glissements de terrain et leurs relations avec les variables climatiques, et (iii) l'élaboration d'un cadre combiné hydrologique et la modélisation de la stabilité des pentes pour évaluer l'effet de la variation climatique sur les glissements de terrain.

Ce projet a compté sur huit sites d'étude : Angleterre (1), France (1), Italie (2), Portugal (1), et en Espagne (3). Ces sites ont été étudiés dans la période 1850-2000.

Le résultat principal du projet était l'impossibilité d'établir une seule « loi universelle » et une méthode unique pour analyser la relation entre les glissements de terrain et le climat en Europe, en raison de la complexité du problème.

Sidle et Ochiai (2006), dans une étude d'évaluation des variables climatiques et des processus de changement, ayant une incidence sur les phénomènes de glissement de terrain. Ils ont évoqué les influences du changement climatique sur les glissements de terrain, et ont conclu que l'augmentation de la température moyenne de l'air et les changements dans les précipitations annuelles et saisonnières régionales sont les variations qui peuvent affecter les glissements de terrain.

Ils ont également examiné les effets des changements climatiques sur la végétation, le sol, l'utilisation des terres et la couverture terrestre, mais pour eux ce dernier est un processus plus complexe et son évaluation plus difficile.

McInnes et al. (2007) ont réalisé une analyse des Actes de la Conférence Internationale sur les Glissements de Terrain et les Changements climatiques, « International Conference on Landslide and Climate Change » obtenue à Ventnor, Royaume-Uni, en 2007. Ils ont eu comme résultats une analyse historique sur l'impact du changement climatique sur les glissements de terrain (autres risques naturels), les méthodes de modélisation des glissements de terrain, l'évaluation des risques de glissements de terrain et la gestion des risques naturels.

A son tour, Crozier (2010) a examiné les mécanismes qui peuvent affecter les glissements de terrain dans un contexte de changements climatiques, et plus généralement

les conditions de stabilité des pentes, évaluation de l'impact des changements climatiques sur les glissements de terrain et les pentes prédites d'ingénierie.

Ce travail a eu une importante conclusion, quelque soit l'approche utilisée, c'est très important l'étude des anciennes limites climatiques et glissements de terrain parce que, elles permettent d'évaluer l'impact des changements climatiques attendus sur la fréquence des glissements de terrain, et d'estimer les variations associées au risque.

Coe et Godt (2012) ont identifié quatorze approches différentes pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les glissements de terrain, et les ont regroupés en trois grandes catégories : (i) surveillance à long terme, (ii) les approches rétrospectives, et (iii) des approches prospectives.

Les résultats de ce travail montrent la difficulté à prédire les tempêtes extrêmes à court terme. Cas de la Colombie, avril 2017 dans la région Mocoa Putumayo au Sud du pays, avec plus de 254 morts et portés disparus. Felipe de Medina : Citoyen Colombien.

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque (GIEC, 2014), et le changement climatique peut affecter les glissements de terrain et la stabilité des pentes naturelles et artificielles (Seneviratne et al. 2012).

Le climat et les glissements de terrain opèrent à différentes échelles géographiques et temporelles, et il est difficile de concilier les différentes échelles, et cela reste incertain.

Le type, l'étendue, l'ampleur et la direction des changements climatiques dans les conditions de stabilité des pentes, ainsi que sur l'emplacement, l'abondance et la fréquence des glissements de terrain, ne sont pas complètement clairs.

Les effets du réchauffement climatique sur le risque de glissement de terrain, et en particulier le risque pour la population, restent également difficiles à quantifier. De toutes les activités humaines, l'agriculture reste le secteur le plus influencée par le climat et ses variations.

Or l'intensification et la fréquence des événements extrêmes dues au changement climatique auront de plus en plus des conséquences désastreuses sur la production agricole et les revenus des paysans (Sarr Benoit, Atta Sanoussi Kafando Luc. 2012)

Chapitre II

DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

1. PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Avant de commencer la démarche scientifique pour analyser les glissements de terrain et les causes de déclenchement des instabilités gravitaires. Il faut d'abord mettre en contexte géographiquement les deux glissements de terrain en question. Le secteur d'étude est situé dans la zone Imhiwach-El Ksiba Tit NZisa G₁ et Ouauizerht-Tagleft Tabaroucht G₂, Région Béni Mellal-Khenifra. Maroc.

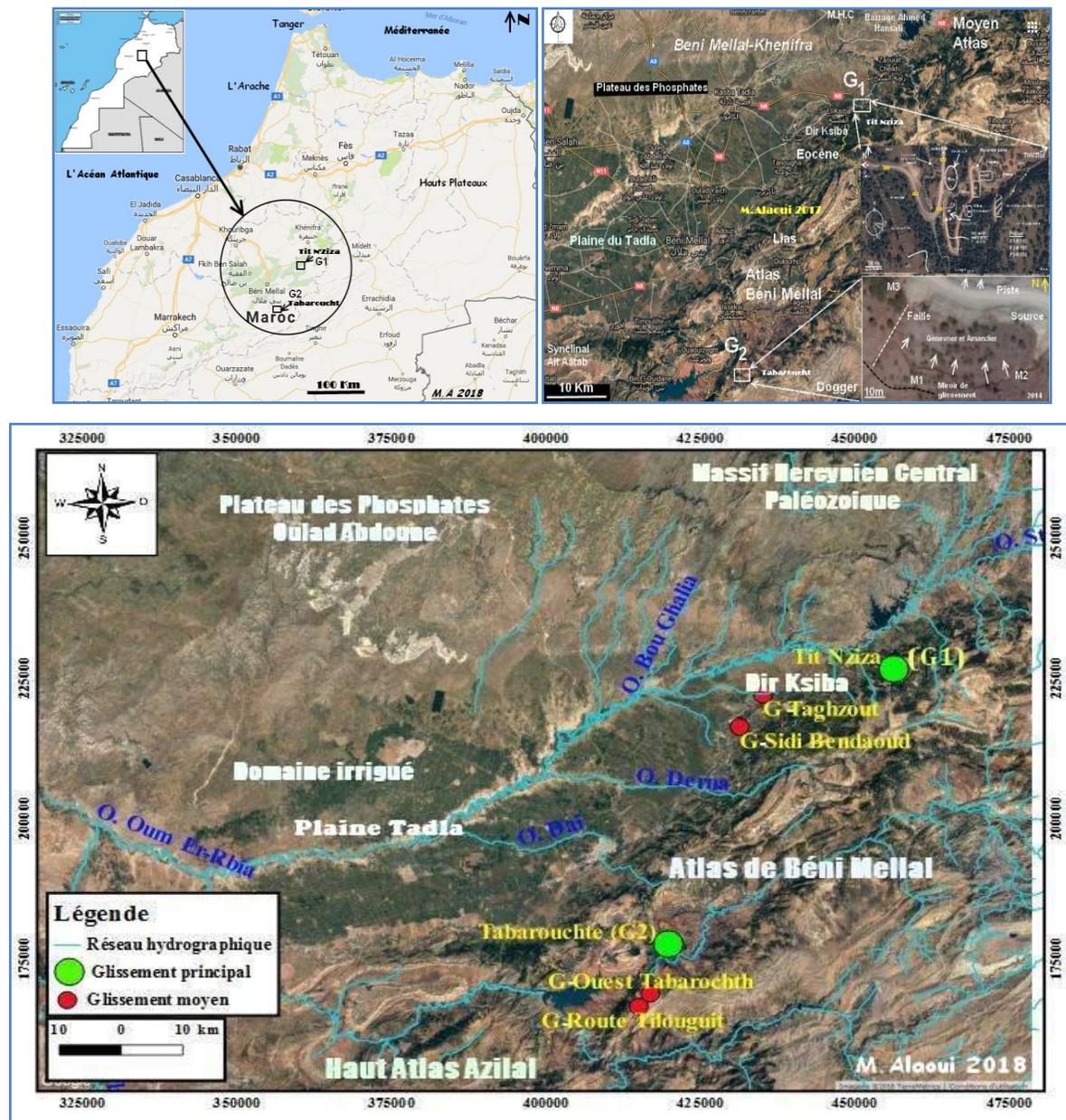


Figure 3: Cartographie et localisation géographique des sites étudiés

Le territoire de cette région est composé de quatre grands ensembles géographiques distincts qui entretiennent des relations d'échange, de complémentarité et des formes de solidarité notamment dans le domaine de l'agriculture et de l'élevage extensif.

La montagne: Le massif montagneux s'étend sur la totalité des provinces de Khénifra et d'Azilal et couvre une partie non négligeable des provinces de Béni-Mellal et de Khouribga; Le piémont ou le Dir: c'est une étroite bande du territoire, théoriquement définie comme étant l'intersection entre la montagne et la plaine ou zone tampon. En pratique, il est difficile de délimiter le Dir sur le terrain. On considère que chaque commune se situant en partie et/ou en totalité dans cette intersection fera partie de l'entité géographique piémontaise.

Le plateau des phosphates de Khouribga qui se caractérise, d'une part, par sa richesse minière et, d'autre part, par sa pauvreté en eau souterraine ; La plaine de Tadla: elle occupe une partie de la province de Béni-Mellal et la totalité de la superficie de la province de Fquih Ben Saleh, elle va de la ville de Béni-Mellal à celle de Kasba Tadla.

Sur la rive gauche d'Oued Oum Er Rbia, se situe une nouvelle étendue de terres profondes qui disparaissent, au fur et à mesure que l'on se rapproche de la limite Nord avec la région de Casablanca-Settat Les sols dans la région sont diversifiés en raison de la nature des roches mères.

Ils sont superficiels, peu profonds et peu humifères. Leurs réserves hydriques sont parfois limitées. D'ailleurs, la dominance de chêne vert, essence très plastique du point de vue écologique, confirme cette situation lorsque l'ambiance écologique est difficile. Les substrats sont colonisés par des essences thermo-xérophiles (pin d'Alep, thuya et genévrier rouge) et xérophiles (genévrier Thurifère).

Même en altitude, les sols restent en général peu profonds à superficiels, humifères et humides durant une période assez longue de l'année, ce qui permet l'installation d'essences forestières bienvenues (chêne zêne, cèdre et chêne vert).

- **Hydrologie**

La région est drainée par un cours d'eau principal qui est Oued Oum Er-Rbia et ses affluents (Oued Derna, Oued El Abid, Oued Lakhdar et Oued Tassout). L'Oued Oum Er-Rbia s'alimente principalement du Moyen Atlas où les précipitations sont importantes et où de nombreuses sources lui apportent un étiage assez régulier que connaît la région à la suite

des précipitations et de la fonte des neiges. Les divers apports que l'on enregistre au niveau de la région garantissent au fleuve de l'Oum Er Rbia un étiage très soutenu faisant de lui le cours d'eau le plus régulier du pays.

Le territoire de la région se trouve à 80% au niveau du bassin versant de l'Oum Er Rbia, le reste qui correspond à la zone Nord de la région se trouve au niveau du bassin versant de Bouragrag. Sur les 128 grands barrages qui sont actuellement en service au Maroc, 20 sont implantés sur le bassin du Sebou et 7 sur le bassin de la Moulouya.

La région de Béni Mellal-Khénifra en compte 15 barrages en plus de 7 systèmes de transfert d'eau.

Ces ouvrages permettent de garantir, tant pour le bassin de l'Oum Er-Rbia que pour les bassins limitrophes, la satisfaction des besoins en eau potable, industrielle et agricole ainsi que le soutien des débits nécessaires à la salubrité des cours d'eau. Cette infrastructure hydraulique actuelle permet de mobiliser, en moyenne, près de 3 550 millions de mètre cubes.

Ces ressources permettent l'irrigation de près de 493 575 ha et la production d'environ 350 millions de mètres cubes /an pour l'alimentation en eau potable et industrielle. Grâce à une puissance installée de 629 MW, la mobilisation des ressources permet également une production moyenne de 1866 millions de KWH /an d'énergie hydroélectrique, soit plus de 70% du productible national.

- **Hydrogéologie**

Quant aux eaux souterraines le complexe aquifère du bassin de l'Oum Er Rbia est constitué par un ensemble de nappes phréatiques du Plioquaternaire. On peut citer les nappes du Turonien, l'Éocène du Tadla constituant les nappes de Béni Moussa et de Béni Amir et enfin la nappe phréatique du Dir en contact avec la nappe karstique au NE.

- **Potentiel Forestier et Climat**

Le potentiel forestier que recèle la région contribue au développement socio-économique des populations en leur assurant: la matière première qui est le bois, des jours d'emploi, des parcours pour l'élevage, etc. La province de Khénifra dispose de la superficie forestière la plus importante, 47%, soit 443.500 ha, la forêt au sein de la province d'Azilal occupe 317.970 ha, la forêt à l'intérieur des provinces de Béni Mellal et Fquih Ben Salah

s'étend sur une superficie de 148.020 ha alors que Khouribga n'en dispose que de 3%. Malgré l'aspect multifonctionnel des forêts, des rôles prépondérants sont assignés à chaque forêt ou groupe de forêts. C'est ainsi que les forêts de plaine, du plateau du Dir et quelques massifs des forêts d'Ait Hmama et d'Ait Abdi sont considérés comme des forêts de protection, les forêts du moyen Atlas sont vouées à la production, avec comme principale production ligneuse le bois de feu de chêne vert (35.000 à 50.000 stères par an).

La position géographique de la région de Béni Mellal-Khénifra, lui confère une diversité climatique qui varie d'un climat humide (sommets de la chaîne du Haut Atlas et certains pics du moyen Atlas) à un climat subaride en contrebas des massifs montagneux.

Le climat dominant est de type continental: froid intense en hiver avec des étés très chauds. Par ailleurs, la pluviométrie moyenne annuelle connaît d'importantes variations.

En 2012, la province de Béni Mellal enregistre des précipitations de l'ordre de 291 mm souvent mal réparties le long de l'année, un chiffre qui diminue d'année en année (il était de l'ordre de 460,3 mm en 2008) et qui se trouve à l'origine de certaines catastrophes telles que les inondations et l'affaissement de terrains et l'effondrement de vieilles maisons; la province d'Azilal quant à elle, enregistre une pluviométrie de 450 mm avec des chutes de neige assez importantes, ce qui contribue à l'amélioration des volumes d'eau des retenues. Alors que Khouribga et Kasbah Tadla enregistrent respectivement 278 mm 334 mm.

Les températures moyennes annuelles varient entre des maximales de 40°C dans la province de Béni-Mellal et minimales de 2°C dans la province d'Azilal. La neige apparaît à partir de 900m d'altitude et le vent dominant est le chergui en période d'été.

- **Infrastructures de la Région**

La région de Béni Mellal-Khénifra dispose d'un réseau routier moyennement dense constitué de 1114,63 km de routes nationales, 4283,45 km de routes régionales dont 93,525 km sont revêtues et 2454,79 Km de routes provinciales dont 393,38 Km sont revêtus.

La densité routière régionale est de 256,64 km /1000km², elle est de 141,87 km /1000km² pour la province de Béni-Mellal et de 98,05 km /1000km² pour la province d'Azilal. En plus, 58% du réseau routier de la région se concentre dans la province de Khénifra qui contient 81% des routes nationales, 73% des routes régionales et 22% des routes provinciales, sans oublier les 80 km d'autoroute entre Béni Mellal et Khouribga.

En matière d'infrastructure ferroviaire, la région de Béni Mellal-Khénifra est desservie par un chemin de fer liant Casablanca à Khouribga, de 154 km, desservant essentiellement l'exploitation phosphatière. (Monographie générale Région Béni Mellal-Khenifra: Pages 6, 8, 10, 12,21 et 22).

Les chaînes de montagnes du Haut Atlas et du Moyen Atlas représentent l'élément morphologiquement le plus important du Maroc. Le haut Atlas en direction E-W ou WSW-ENE, sépare le Moyen Atlas, peuplé et cultivé, des domaines anti-atlasiques et sahariens beaucoup moins peuplés et arides. Le Moyen Atlas, orienté NE-SW isole le Maroc oriental, les hauts plateaux, des contrées occidentales et du Massif Hercynien Central.

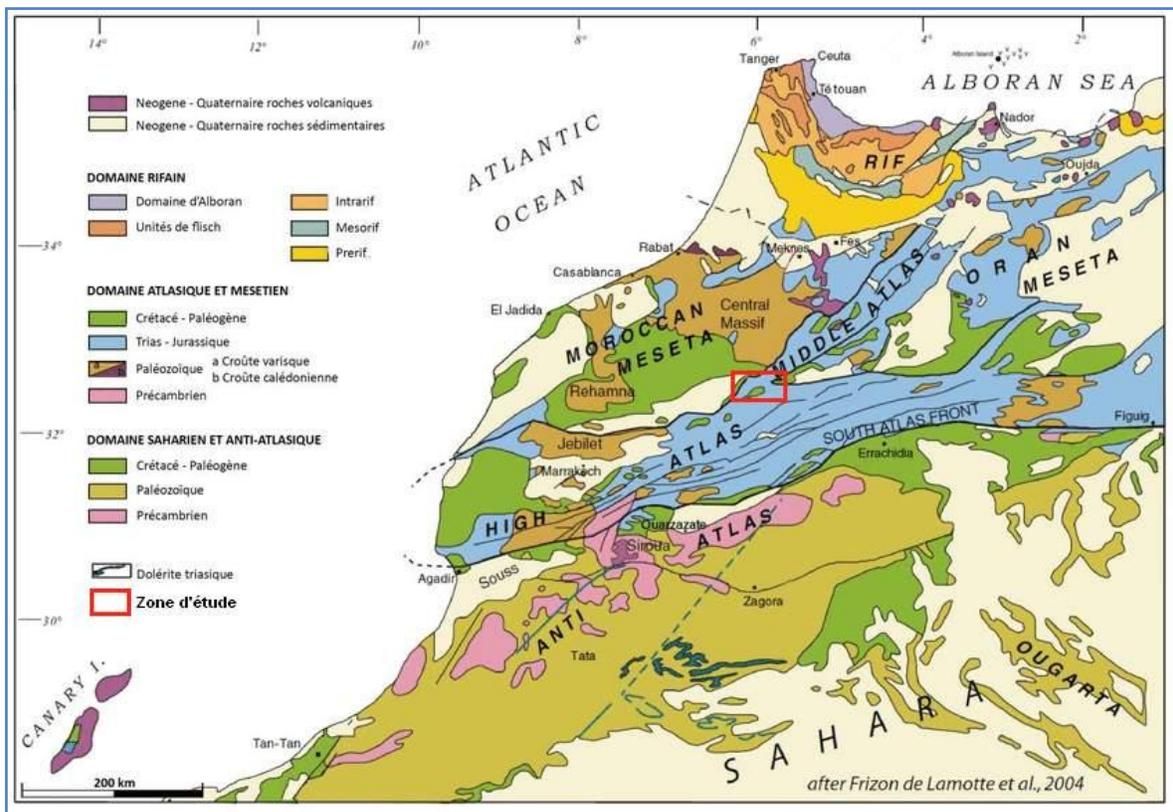


Figure 4: Carte géologique des principaux domaines structuraux (after Frizon de lamotte 2004)

La carte géologique montre que le Haut comme le Moyen Atlas sont constitués de couches surtout mésozoïques plissées et soulevées, englobant des noyaux de terrains paléozoïques. Les Atlas: Moyen Atlas et Haut Atlas font partie de la chaîne atlasique, formée au Tertiaire. C'est une chaîne intracontinentale, située dans le continent africain. Elle s'étend du Maroc à la Tunisie et constitue l'avant-pays déformé de la chaîne riftotellienne. Les sédiments méso-cénozoïques, autochtones, sont faillés et plissés. Fig.4

1.1. GÉOLOGIE DU HAUT ATLAS

Le Haut Atlas de Marrakech, au Sud de cette ville, est la partie la plus haute de la chaîne, et elle en contient culminants dont le Jbel Toubkal 4167 m et le Jbel Ouakrim 4089 m. La plus grande partie de la chaîne est occupée par des terrains anciens, paléozoïques mais aussi précambriens, qui affleurent dans plusieurs boutonnières dont la plus grande est celle du Bloc ancien, en chevauchement sur les terrains secondaires et tertiaires.

Nulle part dans ces massifs le raccourcissement dû à la tectonique atlasique n'est tel qu'il puisse masquer les structures anciennes ; dans les terrains paléozoïques, on peut donc reconnaître les déformations hercyniennes et les comparer à celle du domaine mésétien, telles les failles N_{70} qui ont pris une direction N_{120} .

Le Bloc ancien, par exemple, avec ses domaines schistosés, métamorphiques et granitisés, prolonge les zones centrales de la Meseta, de la boutonnière d'Ait Tamlil, avec ses nappes gravitaires carbonifères, correspond aux zones orientales des Jbilet. Le Haut Atlas occidental est séparé de l'Atlas de Marrakech par le couloir triasique d'Argana.

Les bordures du Haut Atlas Central montrent des terrains plus récents que le Jurassique : sur la bordure sud, en particulier, l'Eocène marin est en contact faillé avec les couches détritiques de l'Oligocène et du Néogène du sillon d'Ouarzazate. Cette faille, élément de l'accident sud-atlasique des auteurs, est localement un chevauchement vers le Sud-est à Sud-Sud-est.

Lors du Jurassique, le comblement du bassin après une transgression majeur, une grande subsidence a eu lieu, ce qui a donné naissance à des failles héritées N_{120} et apparition des dykes de diorites. Les cassures liasiques ont une direction globale NNO-SSE à N-S dans les séries calcaires chevauchées sur le tertiaire de Khmis Béni Aayat.

Les gradins nord atlasique se caractérisent par un chevauchement du jurassique sur les terrains Eocènes oriente NW-SE, avec affleurement d'une série de sources karstiques par égorgement de l'aquifère liasique entre Béni Mellal et Zaouia Cheikh en bordure de direction NE-SW via le Dir de l'Atlas d'El Ksiba.

Pendant le Tertiaire, l'ouverture de l'océan atlantique a créé des contraintes majeures de direction NO-SE. La phase orogénique commença par le jeu inverse des failles hercyniennes N_{70} et N_{20} qui ont rejoué en failles inverses pendant le Crétacé et pu chevaucher les terrains anciens sur les récents (Histoire Géologique du Maroc). Fig5.

Durant le Trias, l'ouverture du bassin par des failles normales conjuguées en Graben d'âge hercynien, a engendré un amincissement de la croûte continentale, ce qui a fait monter des basaltes dits fini-triasiques ou Permo-triasiques (Benzaquen 1963). Au Lias inférieur on a des dépôts carbonatés peu épais sur des plates formes avec des récifs.

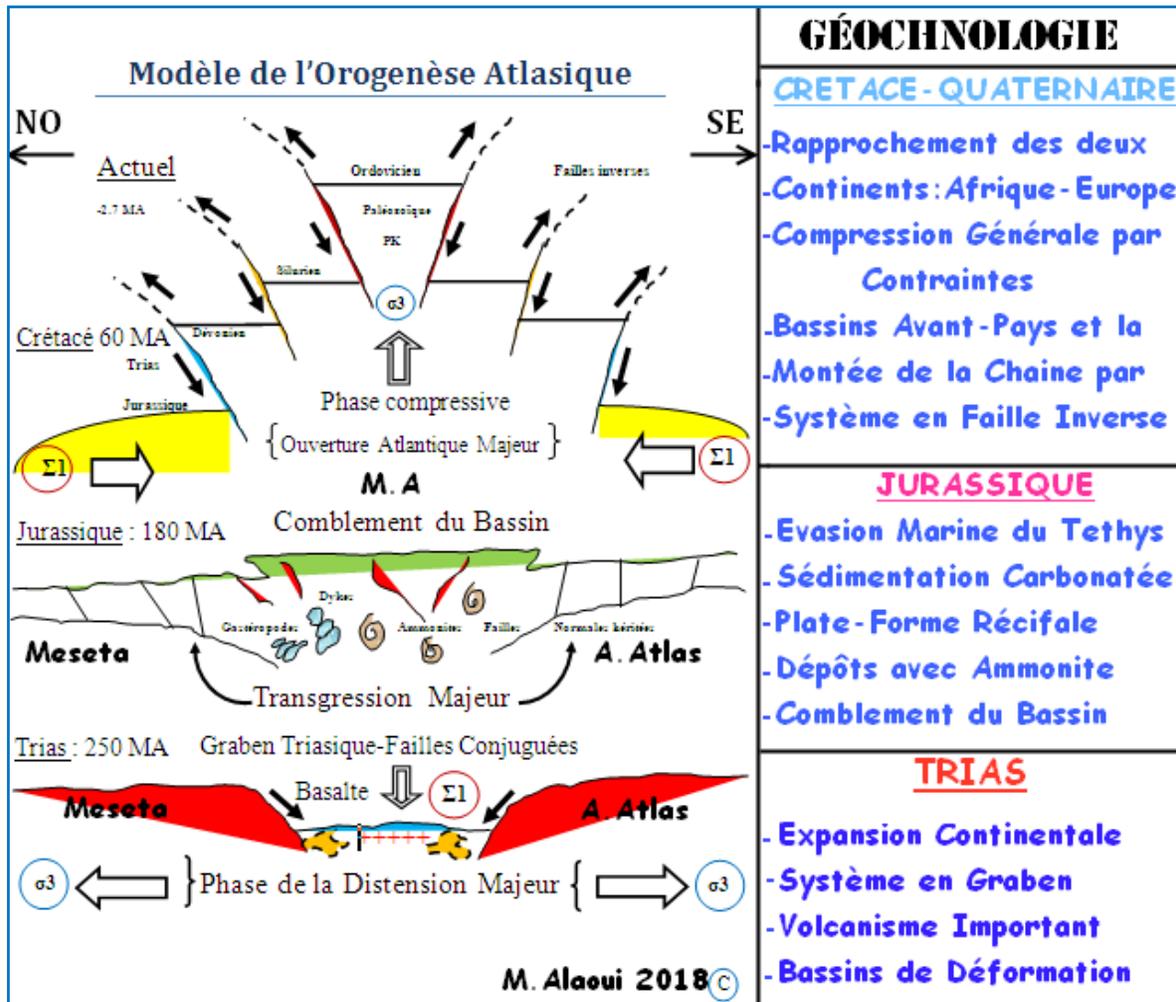


Figure 5: Modèle schématisé simplifié de l'orogénèse atlasique

Au Jurassique moyen on a observé une installation de faciès marneux à céphalopodes dans le bassin avec quelques niveaux calcaires, et sur ses bordures une plate forme très développée. A la fin du Jurassique moyen le comblement du bassin était généralisé des couches rouges. (Orogénèse des Chaînes de Montagnes. *Laville 1985*).

Pendant le Crétacé, où avait commencé une phase tectonique qui a duré jusqu'à nos jours, une transgression au Crétacé supérieur est en relation avec l'ouverture de l'Atlantique Sud, avec aussi le rapprochement de l'Afrique et l'Europe.

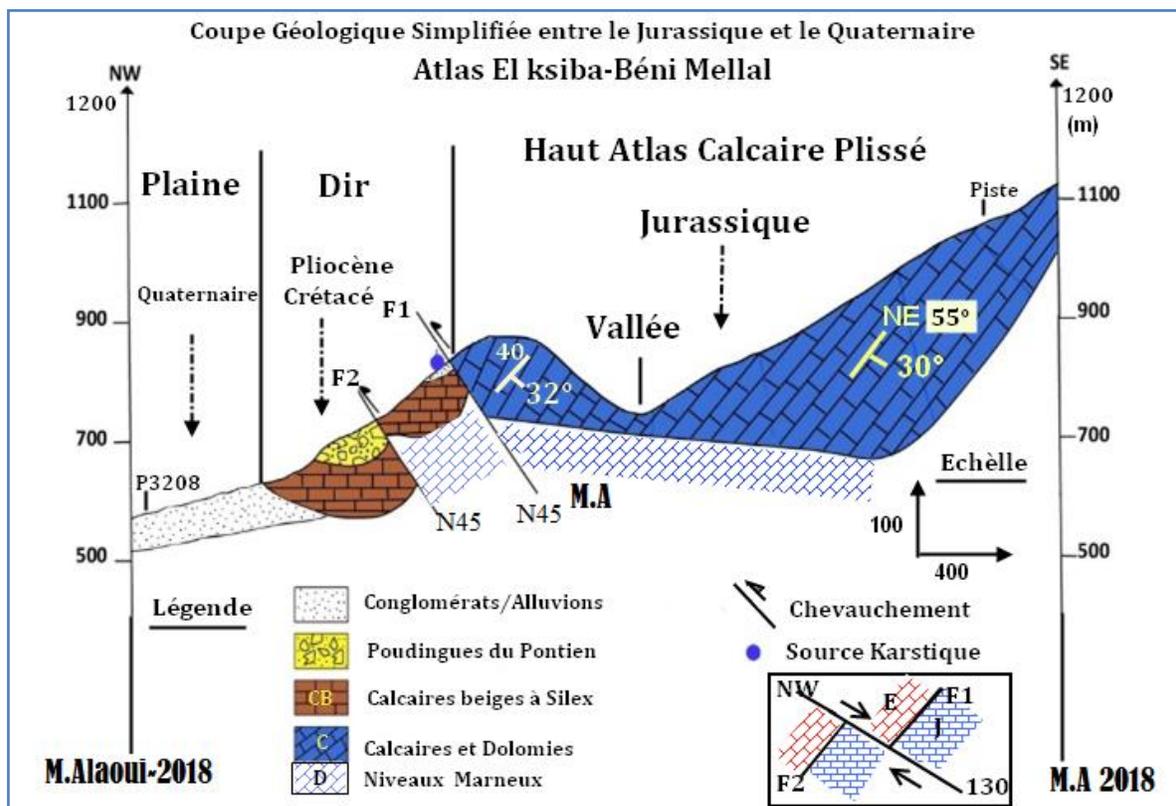
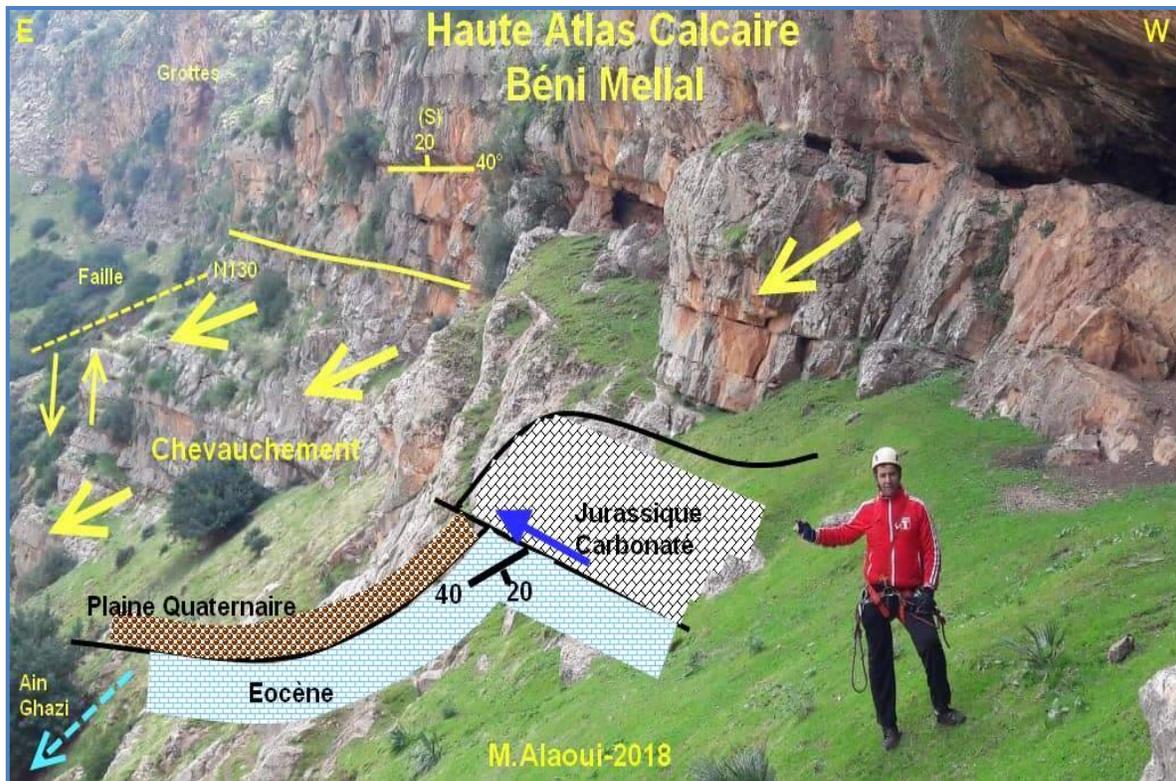


Figure 7: Coupe géologique du chevauchement de l'Atlas Béni Mellal sur le Dir et la Plaine du Tadla

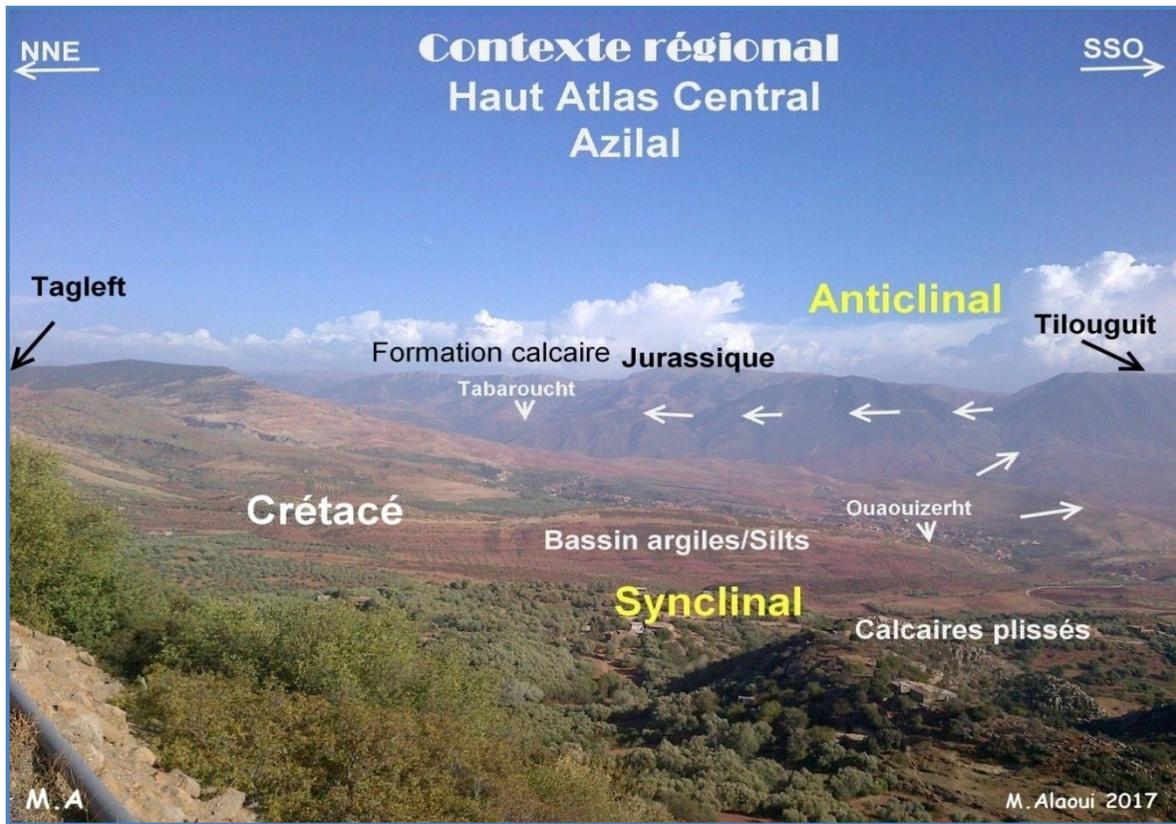


Figure 8: Vue panoramique de l'Atlas Ouaouizerht-Tabaroucht



Figure 9: Dykes jurassiques recoupant la formation de Guettioua dans le synclinal de Tagleft

Il s'agit de dykes d'âge Jurassiques moyen à Crétacé, ils affleurent sur les parements de la route amenant vers Ouaouizerht et aussi sur les collines en allant vers les anticlinaux affectant les carbonates du Dogger en direction du Sud. Ils étaient l'objet de maintes études géologiques et géochimiques par des marocains FSSM. Marrakech et FST Béni Mellal ainsi que des étrangers (des géologues portugais 2004). Fig9.

Le Haut Atlas Central au Maroc est un segment d'une vaste chaîne intracontinentale, qui s'étend depuis l'océan Atlantique dans la région d'Agadir au Maroc jusqu'au golfe de Gabès en Tunisie. Il a connu une importante activité magmatique depuis le Trias supérieur, matérialisée par la mise en place de coulées basaltes tholéitiques (Beraâouz 1995, Verati et al. 2007), suivies de coulées de laves basaltiques, de nombreuses intrusions, de champs filoniens au Jurassique-Crétacé (Rahimi et al. 1997, Zayane et al. 2002) et de Carbonatites (Laves à 50% CaCO₃) et de Lamprophyres (Roche magmatique filonienne, riche en biotite) à l'Eocène (Bouabdelli et al. 1987, Bouabdellah et al. 2010).

Dans l'Atlas de Béni -Mellal, qui constitue une zone-clé, les manifestations magmatiques du Jurassique-Crétacé se matérialisent par la mise en place d'un ensemble de roches magmatiques exposées côte à côte et en interdépendance étroite, sous forme de coulées de laves, sills, dykes et batholites. L'objectif de cette note est de définir l'affinité chimique de ces roches et de discuter leur signification géodynamique.

Le secteur étudié se situe dans la partie nord-occidentale du Haut Atlas Central le long du méridien 6°20' W de Béni- Mellal et au sud de la plaine de Tadla. Le Haut Atlas Central, dont fait partie le Haut Atlas de Béni-Mellal, correspond à une chaîne de montagnes intracontinentale, résultant de l'inversion structurale d'un bassin essentiellement jurassique (Laville et al. 2004, El Harfi et al. 2006).

Le Trias est représenté par des siltites rouges, des évaporites et des coulées de basaltes tholéitiques, recouvertes par des calcaires et des marnes d'âge liasique à bajocien, surmontés par des dépôts argilo- gréseux d'âge bathonien à crétacé inférieur (Souhel 1996, Haddoumi et al. 2010).

Au Jurassique, le bassin du Haut Atlas Central est constitué de sous-bassins subsidents sur décrochements senestres, séparés par des rides anticlinales synsédimentaires, dans le secteur étudié, les roches magmatiques, quelque soit leur mode de mise en place, ne se distinguent à aucun moment dans les sédiments de l'ancienne plate -forme liasique.

Cette incompatibilité est due essentiellement à la rigidité du bâti de cette plate-forme, à faciès périrécifaux (Monbaron 1981).

Les formations basiques montrent différents types de gisements : coulées basaltiques, sills, dykes et corps intrusifs, qui intrudent où sont interstratifiés au sein des couches rouges dont l'âge s'échelonne du Jurassique moyen au Crétacé inférieur. Les sills se présentent sous forme de corps d'une dizaine de mètres d'épaisseur concordant avec les formations des calcaires et calcaires marneux de Bin El Ouidane (sills d'Idemrane et d'Aït Boumaali).

Les coulées se présentent sous forme d'entablements basaltiques, constitués d'une succession de coulées de laves subaériennes séparés par des niveaux silto-gréseux rouges. Elles sont associées aux principaux sous-bassins de la région (Naour, Tagleft, Ouaouizerht, Aït Aatab et Ouzoud).

Les plutons sont représentés par les intrusions d'Idemrane et d'Ichichi. Les dykes de Tagleft recoupent les formations bathoniennes argilo-détritiques de Tilouguit et Guettioua. Ils montrent des extensions hectométriques à kilométrique, et des épaisseurs moyennes de 2 à 5 m, ainsi que des orientations définissant une structure radiale (Guezal et al. 2009). Fig.9

Le bassin jurassique de Tagleft-Ouaouizerht est de type dépo-centre ou synclinal avec des discordances progressives, sa géométrie structurale soit dextre en Z soit senestre en S (modèle Mammf. 1983. Cours géologie FSSM 1993).

Les cassures liasiques entre le synclinal d'Ait Aatab et celui de Tagleft ont une direction variant entre N_{20} et N_{120} . Ces structures facilitent le drainage des eaux entre le Lias calcaire et l'Eocène calcaire-dolomie à marneux ce qui alimente la nappe Turonienne qui plonge sous le Haut Atlas plissé.

Entre Azilal et Imilchil en passant par Ouaouizerht on rencontre, souvent, des synclinaux à « couches rouges » jurassique-crétacées de la partie septentrionale du Haut Atlas (Ouaouizerht, Tagleft et Naour).

La faille (AA) ou Accident Aghbala-Afourar (AAA) ou (3A), limite entre le Haut Atlas central et l'Atlas bordier, prolongement du Moyen Atlas. Des filons doléritiques recoupant les marnes et marnocalcaires de la Formation d'Agoudim (Toarcien-Aalénien-Bajocien) dans la vallée d'Ikassene. Certains filons dépassent 10 km de long entre synclinal de Tizi Nisli et les rides de Tassent sur la RN12. (Michard 2011).

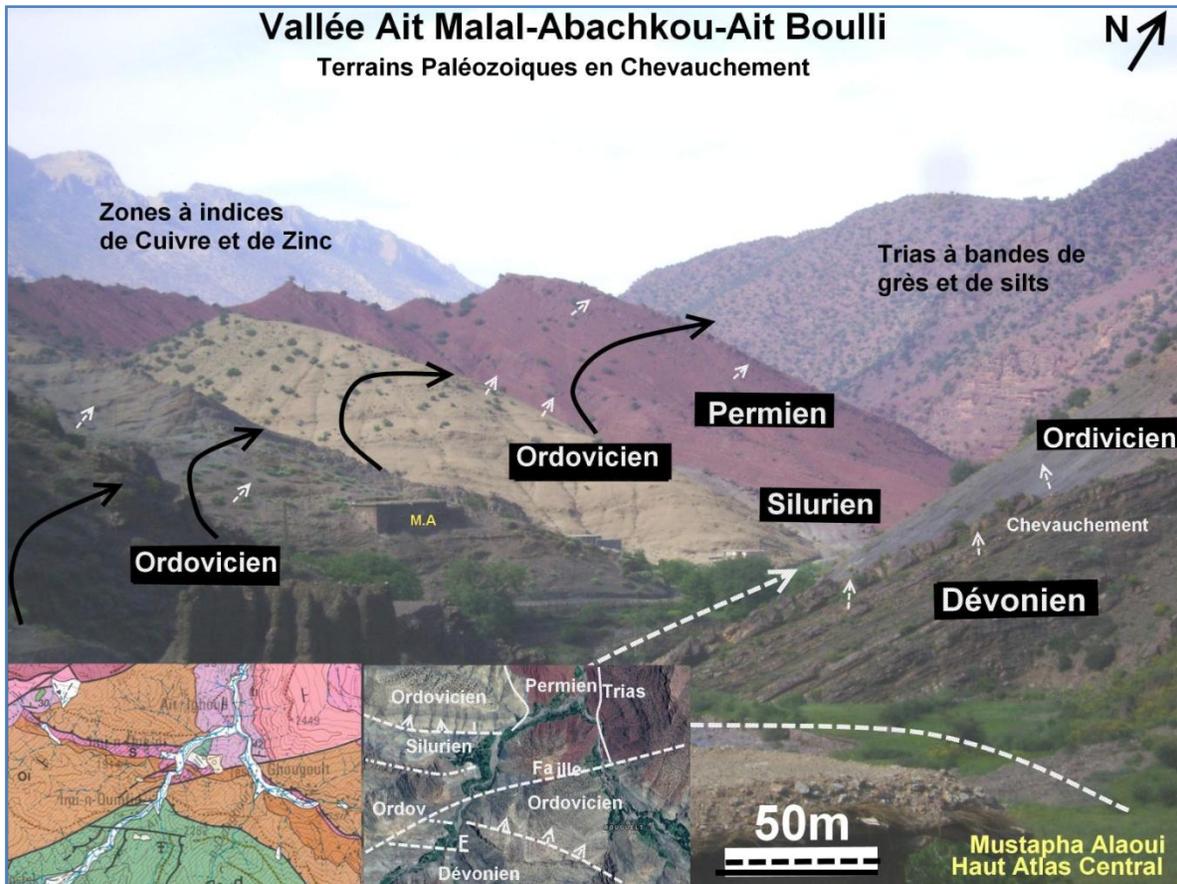


Figure 10: Boutonnière paléozoïque entre l'Ordovicien et le Permien du Haut Atlas Central des Ait Boulli

2.1. GÉOLOGIE DU MOYEN ATLAS

Branché sur le Moyen Atlas entre Béni Mellal et Aghbala, c'est un chaînon moins élevé en altitude que le Haut Atlas, culminant à 3340 m au Jbel Bou Naceur. Comme le Haut Atlas, il contient des boutonnières paléozoïques dont la plus importante est celle de Tazzaka dans les régions de Taza, à sa limite nord-occidentale.

D'après le modèle des fractures de RIEDEL, l'ouverture du bassin moyen Atlas est générée par un jeu senestre avec un angle d'environ 15° et une autre dextre avec un angle oscillant entre 70° et 75° .

Le régime tectonique est contrôlé par le cisaillement régional senestre entre la faille Gibel Tar et l'Accident Sud Atlasique (Challay et M. Bouabdelli FSSM 1993).

Une Faille inverse, liée au plissement, présente plusieurs fractures de Riedel associées au Modèle de Riedel, avec l'angle entre les fractures et le mouvement, bien synthétique, est marqué par la stratigraphie. Fig11.

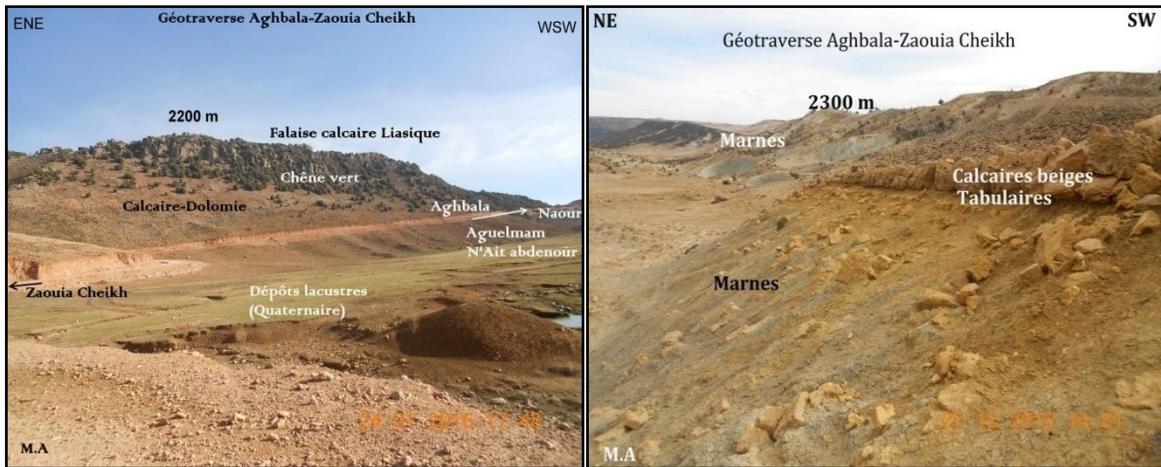


Figure 11: Géotransverse Aghbala-Zaouïa Cheikh marno-calcaire et calcaire à silex au Moyen Atlas

Sa colonne stratigraphique et ses structures sont semblables à celles du Haut Atlas, mais ses limites avec les domaines voisins: le Causse Moyen-Atlasique à l'Ouest et la Meseta orientale à l'Est, connues respectivement comme les accidents nord et Sud-moyen atlasiques, montrent, à la différence de celles du Haut Atlas, une composante latérale senestre importante. Au Nord-est, au-delà du bassin tertiaire de Guercif.

Le Moyen Atlas plissé continue dans le Terni-Masgout et les Béni-Snassen, mais le Jurassique supérieur y est marin et épais. (Piqué et al. 2007 et Piqué 1994).

a. Les collines molassiques

Ce sont des collines surbaissées orientées NE-SW, de terrains friables formées de dépôts marins calcaires phosphatés, de molasse rouge continentale, et de conglomérats, en allant vers El Ksiba constituant un chaînon bordier de l'Atlas et qui font partie de la série externe chevauchées au Sud et à l'Est, montrant un phénomène de glissement de terrain par endroits, et qui sont limités par un volcanisme à basalte altéré fini-triasique qui affleure sur les deux rives de la vallée d'Ait Chbat au Nord-est.

La bordure septentrionale de l'Atlas de Béni Mellal "Contribution à l'étude géologique de la région d'El Ksiba"/ Maurice Benzaquen 1963: Dépôts Eocènes (Pontien-Yprésien) des écaillés externes.

Ces collines nichent des calcaires karstiques Intercalées avec des travertins qui favorisent une source primordiale de calcaire (CaCO_3) pour la Cimenterie de l'Atlas, CIMAT Béni Mellal. (Étude sur la stabilité des fronts de taille dans la carrière Karstique de Tazayzrate dans les collines du Dir El Ksiba).Fig13.

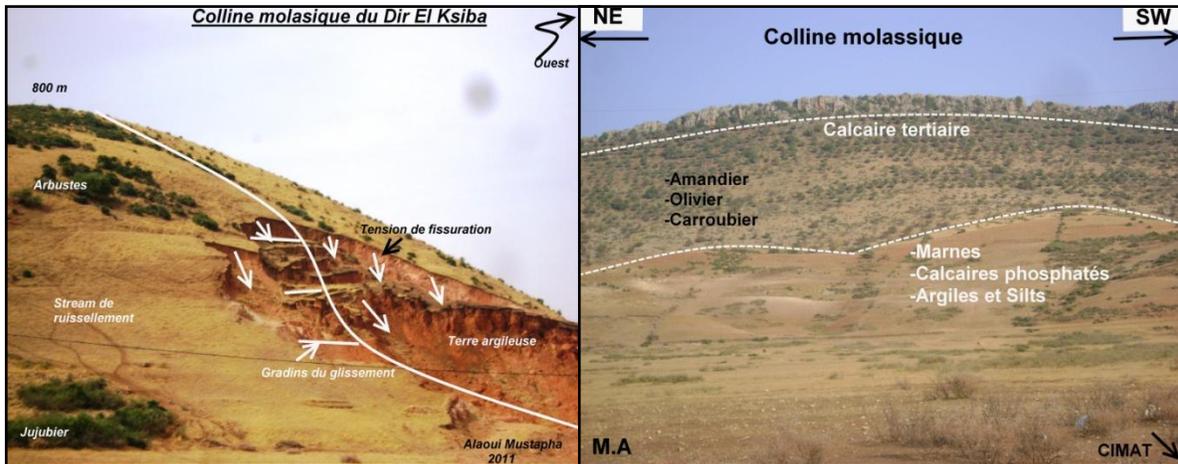


Figure 12: Colline molassique à grès rose et sable phosphatés Eocène dans l'Atlas du Dir El Ksiba

L'érosion intense des montagnes chevauchantes en direction du Sud-est, a engendré des collines molassiques pendant l'Eocène, le substratum est calcaire phosphaté, marneux et des grès rouges à roses. La direction globale de ces collines NE-SW. Fig.14 et 15

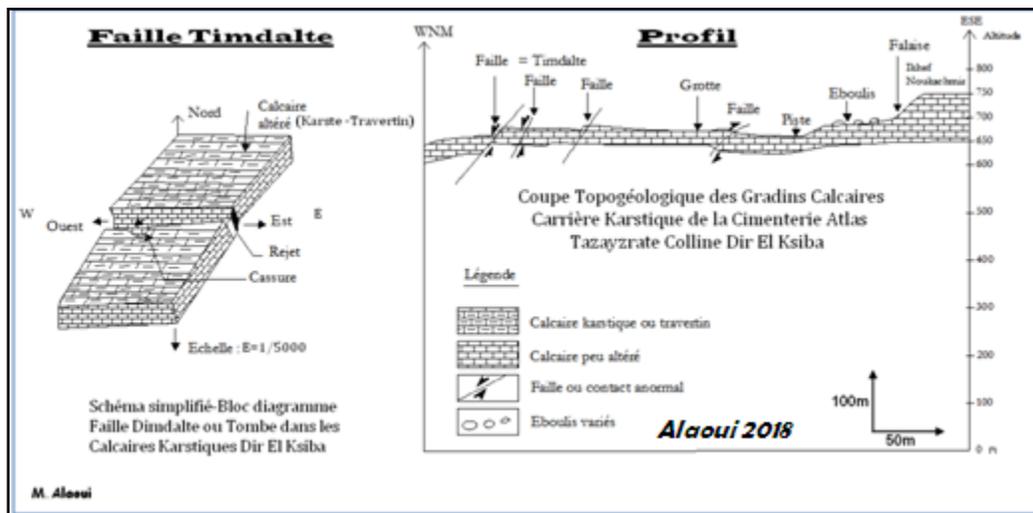


Figure 13: Coupe géologique dans la colline molassique à calcaires karstiques- travertins quaternaires faillées

b. Les Karstes et Travertins

L'eau est le facteur principal de la formation des cavernes dans les roches fissurées, par sa double action de corrosion physico-chimique et d'érosion mécanique. Plus la teneur de l'eau en acide carbonique est élevée, plus la dissolution est importante, plus l'eau (des pluies) devient agressive et peut attaquer le calcaire. Cette action est immense et elle s'exerce dans toute l'épaisseur d'une région calcaire. Michel Siffre 1994.

Les Tufs calcaires ou Travertins, se sont des calcaires karstiques altérés et poreux présentant des cassures, des fentes et des vacuoles qui sont engendrées par l'action des eaux riches en acides carboniques ce qu'on appelle phénomène d'érosion chimique.

Le relief Karstique présente un modèle facilement reconnaissable, tellement il est spécifique aux roches carbonatées et sulfatées, dont la principale caractéristique est de dissoudre dans l'eau contenant des acides, en particulier l'acide carboniques. J Cvijic 83.



Cet acide Faible dilué est alors capable, au contact de la roche, de dissoudre une certaine quantité de calcaire, c'est à dire du carbonate de calcium de formule $[\text{CaCO}_3]$ qui se transforme en bicarbonate de calcium $[(\text{CO}_3)_2\text{H}_2\text{Ca}]$ qui passe immédiatement dans l'eau. La dissolution des roches carbonatées, par une pluviométrie intense, aux piémonts de l'Atlas du Dir El Ksiba a engendré une série de grottes ce qui a poussé à faire une étude sur la méthodologie de détection des vides et des failles face à l'instabilité des fronts de taille de la carrière à calcaire de la cimenterie. Mémoire Stage Master1 .2011.

Les grottes constituent un contexte à risque de mouvements de terrains en milieu rural et urbain par des effondrements brutaux généralement mortels. Figure 9. Une érosion des écailles calcaires a engendré une sédimentation des collines à sables et dépôts calcaires phosphatés à foraminifères pendant le Pontien et l'Yprésien. Fig15 et Fig16

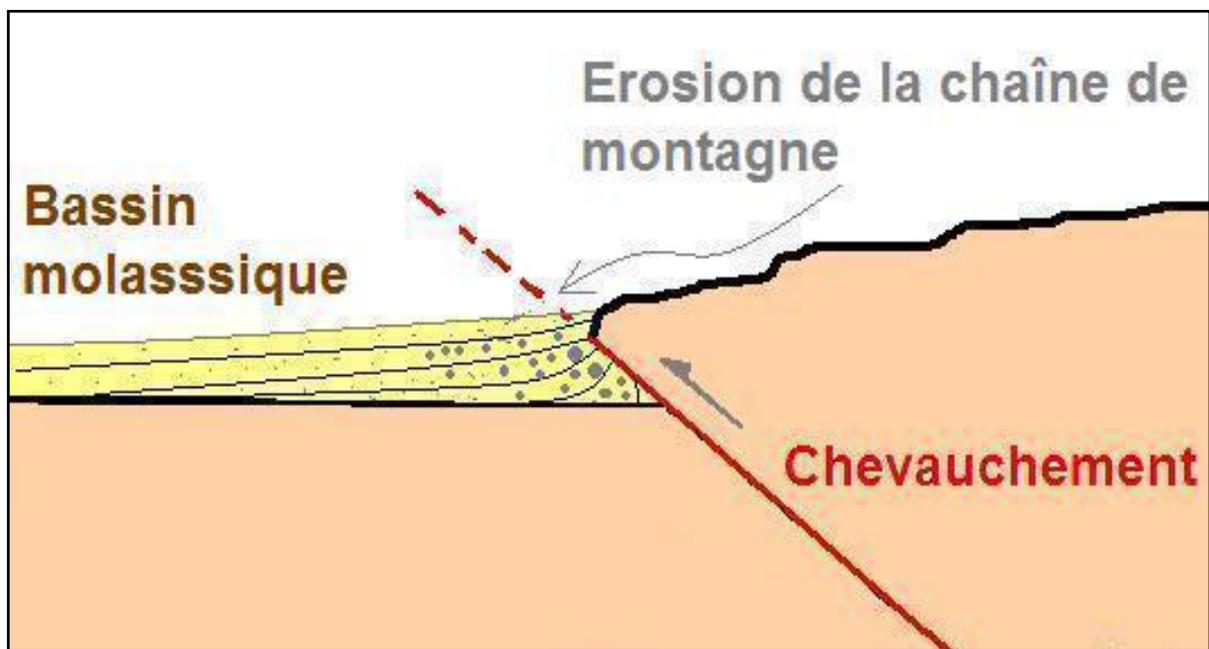


Figure 14: Modèle schématique de la genèse des molasses pendant le Tertiaire. (Saphon 2007)

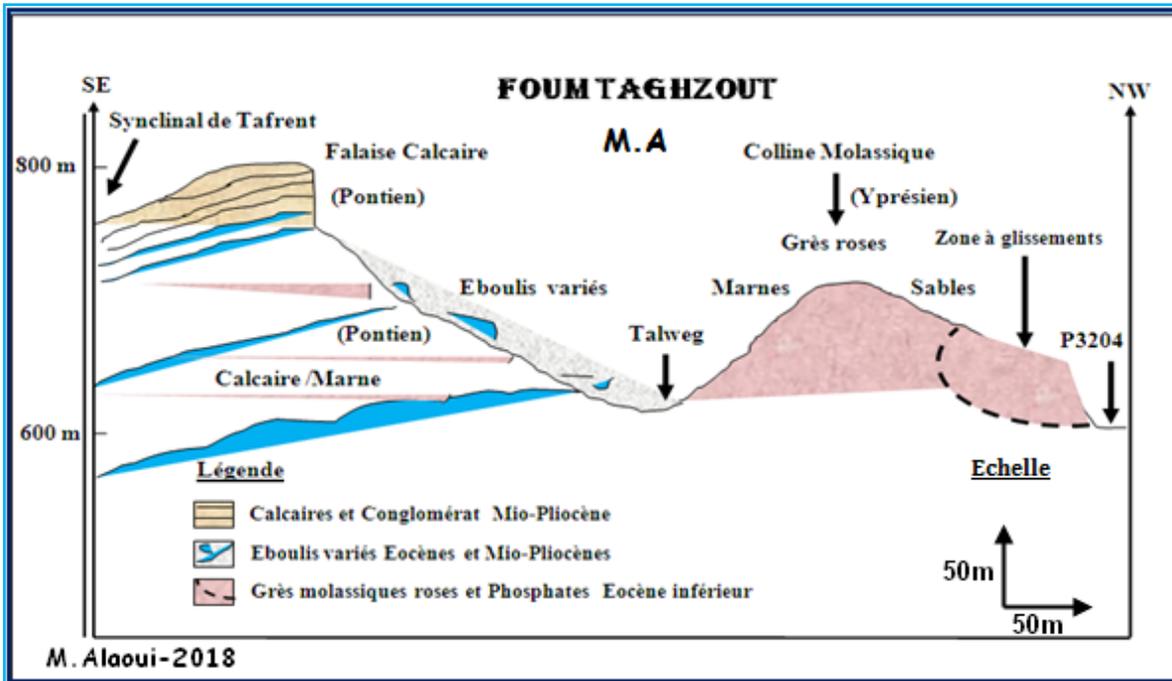


Figure 15: Profil géomorphologique simplifié des collines molassiques de l'Atlas Dir El Ksiba

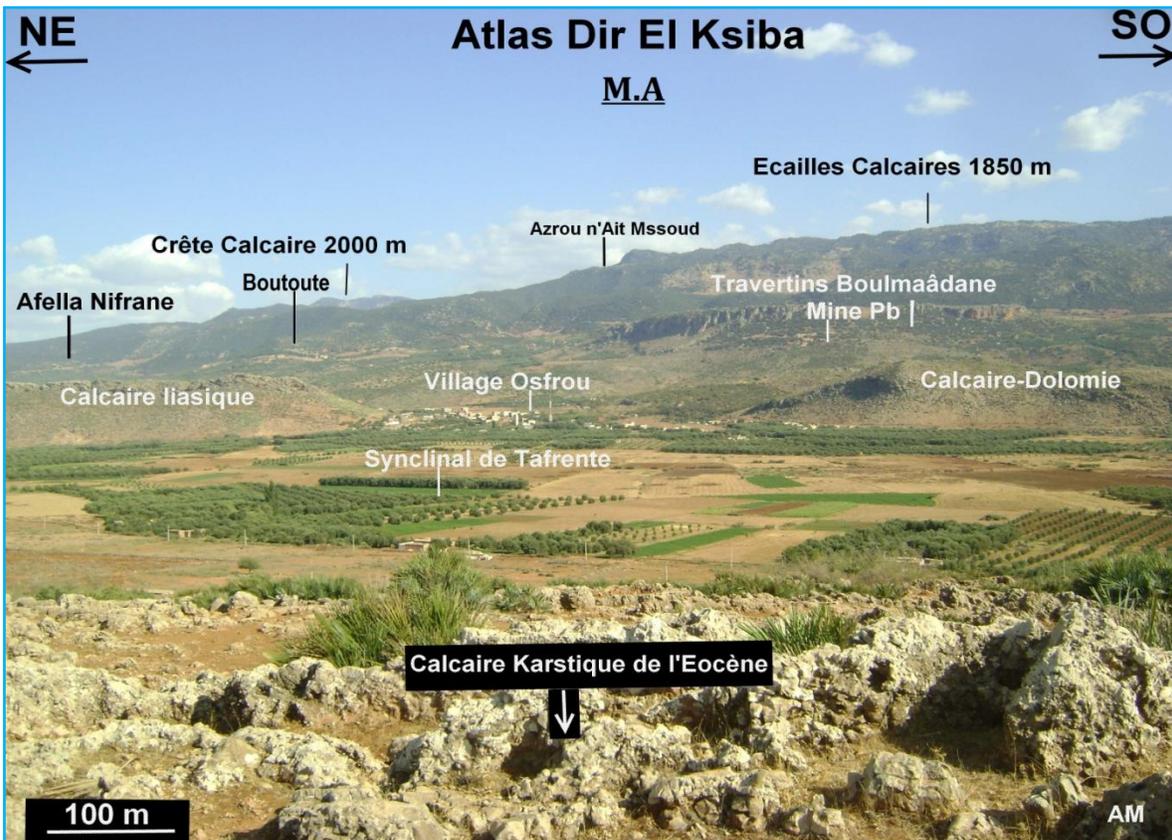


Figure 16: Vue panoramique des écaïlles calcaires liasiques chevauchées sur l'Éocène du Dir

2. TECTONIQUE ET STRUCTURALISME DE LA ZONE D'ÉTUDE

La tectonique et la géologie structurale convergent vers une analyse des déformations lithosphériques qui permettent d'estimer les paramètres cinématiques (déplacements) et thermomécanique (rhéologie) caractéristiques des dynamiques interne et externe d'un système au cours de sa déformation progressive.

Par dynamique interne à l'échelle d'une chaîne, on invoquera ici déplacements (trajets horizontaux et verticaux-chemins P, T,) et comportements relatifs (fragile ou ductile) des différentes unités impliquées ; par dynamique externe, on entendra essentiellement les déplacements imposés aux limites du système déformé (Gapais, 1987).

Depuis trente ans, la géologie structurale a grandement bénéficié du nouveau cadre fourni par la théorie unificatrice de la tectonique des plaques donnant ainsi une vision beaucoup plus cohérente de l'évolution globale de la Terre.

Le développement de techniques quantitatives a aussi contribué à éloigner la géologie structurale des sciences uniquement descriptives par le biais de la recherche de données mesurables, et leur utilisation sur le terrain et en laboratoire.

Le dernier né de l'approche expérimentale, la modélisation analogique, permet de simuler à une échelle plus réduite et dans des conditions de similitude, le comportement de la croûte océanique et continentale soumis à une déformation d'échelle crustale.

Et finalement, l'apport plus récent de la modélisation numérique, permet aux spécialistes de simuler sur ordinateur une situation de déformation réelle (observée sur le terrain) dans le but de déterminer l'influence de certains paramètres physiques et chimiques sur la déformation. (Félix-Antoine Comeau 2005).

Les caractéristiques structurales des bassins jurassiques formant la plus grande partie de l'Atlas de Béni Mellal, on peut distinguer deux types de formes:

- Dépocentres : Constituent de larges bassins subsidents à géométrie synclinale dont les dépôts sont affectés par des discordances progressives.
- Rides : Il s'agit d'anticlinaux étroits synsédimentaires, au niveau de leurs flancs on voit des réductions d'épaisseur et discordances progressives de brèches intraformationnelles et des dépôts gravitaires ou des Slymp.

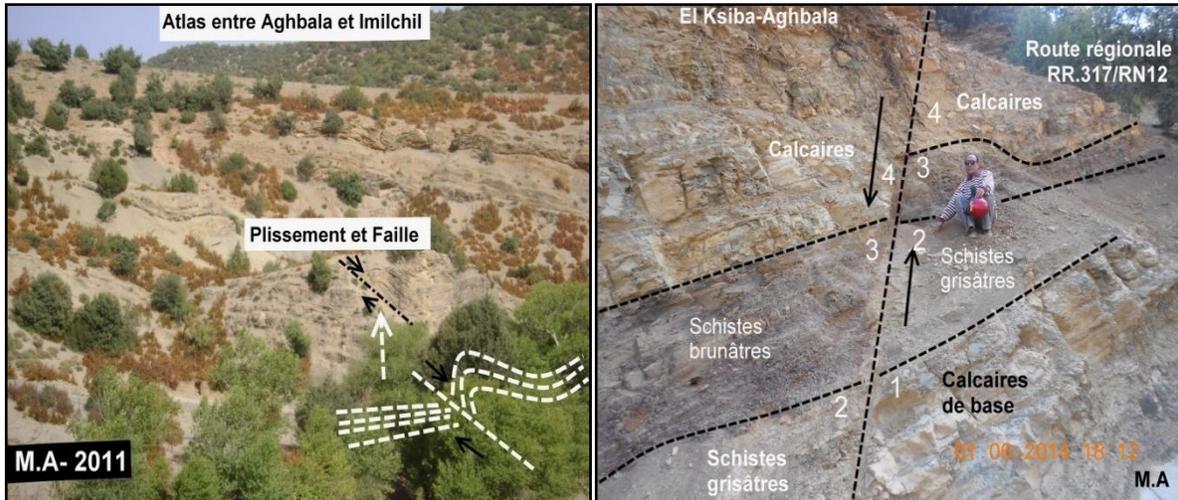


Figure17: Formes structurales entre le Synclinal de Nour et l'Anticlinal d'Imichil (Plis-Failles)

1.2. LES FAILLES

En géologie, une faille est une structure tectonique consistant en un plan ou une zone de rupture le long duquel deux blocs rocheux se déplacent l'un par rapport à l'autre. Ce plan divise un volume rocheux en deux compartiments qui ont glissé l'un par rapport à l'autre dans un contexte de déformation fragile.

Ce déplacement et la déformation cisailant sont dus aux forces exercées par les contraintes tectoniques, qui résultent de la tectonique des plaques ou à la force gravitaire (instabilité gravitaire).

La valeur du déplacement est le rejet de faille. Les failles actives sont responsables de la majorité des tremblements de terre. Ceux-ci sont dus au glissement rapide (quelques secondes à quelques dizaines de secondes) sur le plan de faille lors du brusque relâchement des contraintes accumulées de façon élastique pendant une longue période inter sismique.

Des failles sont en activité tectonique actuellement engendrant des magnitudes sismiques qui oscillent, parfois, entre [3.4] et [4.4] à l'échelle de Richter (Cherkaoui 2008) telle que la faille Aghbala-Afourar (F2A).

2.2. LES PLIS

Un pli est une structure courbe due à une déformation ductile de la roche. Le cas le plus simple est le pli de roches sédimentaires, dont les lits sont planaires et horizontaux avant le plissement. En général, les plis résultent des forces externes engendrées par des contraintes universelles. Fig17.

1.2.2. Antiforme

Une antiforme est un pli dont la convexité est orientée vers le haut. Si la série est normale (couches plus jeunes au-dessus des couches plus anciennes), l'antiforme est un anticlinal. Si la série est inverse (couches plus jeunes en dessous des couches plus anciennes), on parlera d'une antiforme synclinale ou d'un synclinal retourné.

2.2.2. Synforme

Une synforme est un pli dont la convexité est orientée vers le bas (pli en forme de U). Si la série est normale (couches plus jeunes au-dessus des couches plus âgées), la synforme est un synclinal. Par contre, si la série est inverse (couches plus jeunes sous les couches plus âgées), on parlera d'une Synforme anticlinale ou d'un anticlinal retourné.

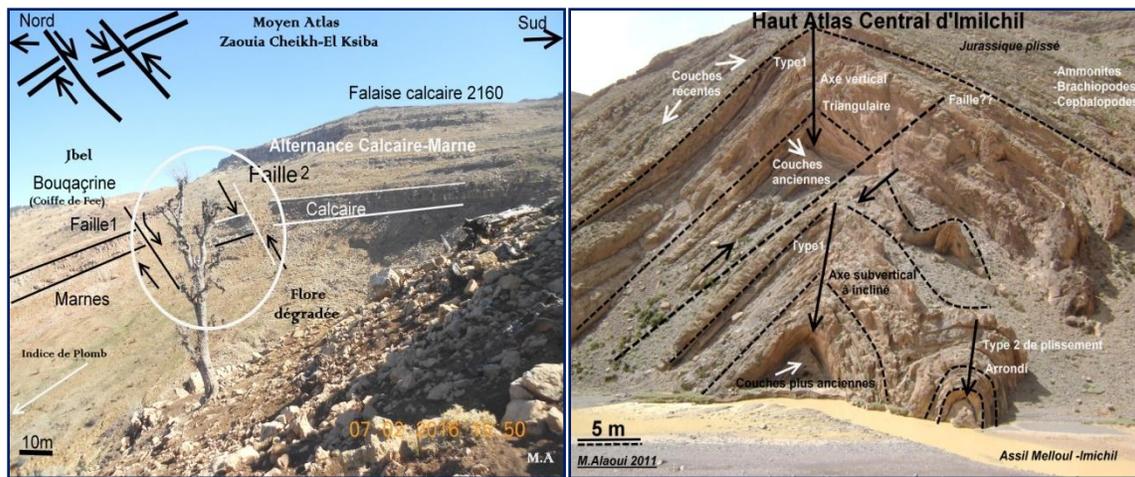


Figure18: Formes structurales: Faille dans les calcaires crétacés d'El Ksiba/Pli dans les récifs Assif Melloul

3. COUVERT VÉGÉTAL DE LA ZONE ÉTUDIÉE

Le Maroc, largement intégré au domaine méditerranéen est aussi soumis à des influences océaniques et sahariennes non seulement sur le plan climatique mais aussi sur le plan botanique, ce qui a favori un lieu de quelques plantes endémiques, par exemple le Laurier Noble, le Chêne Zeen, l'Arganier, et quelques variétés de Thym. Fig20

1.3. DOMAINE FORESTIER

Les essences forestières marocaines, à la lumière de leurs répartitions spatiales respectives, devraient avoir occupé chacune d'elles, des surfaces très importantes au cours de leur longue histoire. Chaque espèce devait profiter des conditions climatiques qui lui sont favorables pour dominer les autres.



Figure 19: Forêts en dégradation 1: Genévrier Thurifère l'Atlas de Zaouïa Cheikh à 1900 m. 2: Chêne Vert en disparition dans le Haut Atlas de Tabaroucht a 1400m

Plus tard, après le recul de la végétation tropicale, s'est installée la flore méditerranéenne. Le chêne liège avait une aire immense et devait couvrir tout le Maroc atlantique des pentes du Haut Atlas jusqu'au Rif, en contournant les montagnes élevées, trop froides pour lui et où dominent les résineux : Cèdre, Pins, Cyprès, Sapins, et Genévriers ou *Juniperus Thurifera*. Les conditions climatiques moins favorables auraient avantagé le thuya au détriment du chêne liège dans les zones méridionales et dans les milieux devenus humides (versants sud en montagnes).

Le chêne vert est l'essence la plus répandue au Maroc ; bien qu'il ait disparu sur d'immenses surfaces, le Maroc en possède encore près de 1.415.000 hectares, avec 72 millions de M³ de bois sur pied, soit 45% du volume global sur pied de l'ensemble des forêts marocaines.

Il est de tous les chênes marocains celui est le plus rustique et le plus plastique, aussi est-il la toile de fond, le ciment vivant du paysage forestier. (Abdelouafi, 2014). La surexploitation de la forêt par le surpâturage et commercialisation des plantes médicinales a influencé d'une façon directe sur la flore endémique telle le Laurier Sauce ou *Laurus Azorica*, qui caractérise la région d'El Ksiba, ainsi qu'une variété de Thym ou *Thymus Vulgaris* et le Caroubier ou *Ceratonia Siliqua*.

Les forêts ont une action importante sur le cycle de l'eau, notamment avec l'évapotranspiration. Leur recul (surtout sur les pentes) favorise les glissements de terrains, avalanches et coulées de boues, en augmentant la turbidité et la pollution des cours d'eau, au détriment de la flore aquatique, et de la faune piscicole, jusqu'à l'estuaire.

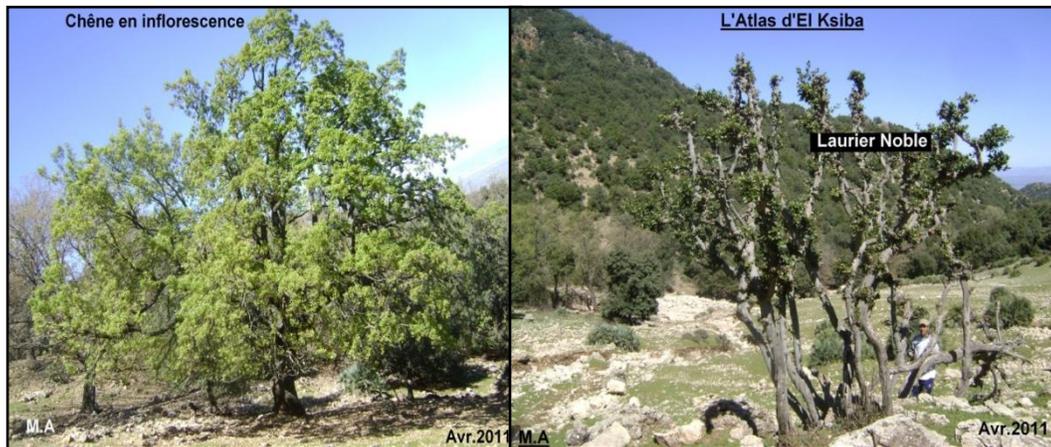


Figure 20: Quelques espèces endémiques de la région en voie de disparition

La région d'El Ksiba jouit d'un ensemble de forêts moyennement dense avec une variété d'espèces d'arbres et d'arbustes entre autres des herbacées. L'altitude et la nature calcaire du sol favorise l'existence de quelques types endémiques relatifs à cette région tels le Laurier sauce, le Chêne Zeen. Fig20.

La demande intense des matériaux de construction a poussé des entrepreneurs d'exploiter des carrières afin de cibler des séries épaisses à formations calco-dolomitiques friables ainsi que les collines et piémonts à calcaires karstiques du Dir. Fig21

La demande du marché des plantes médicinales a poussé les gens de la région à faire une récolte exagérée de quelques variétés endémiques, ainsi qu'un surpâturage a, aussi, une influence sur leur extension tel l'arbousier ou *Arbutus Unedo*, le lentisque ou *Pistacia Lentiscus*, le laurier ou *Laurus Azorica*, l'oléastre ou *Olea Europea*.

Ces arbres retiennent la majorité de l'eau de pluie qui s'infiltré en interception ou en rechargeant la nappe phréatique. Les forêts ont un effet significatif sur le cycle de l'eau, en particulier avec l'évapotranspiration.

La couverture végétale s'avère d'une importance considérable pour stabiliser les pentes, car les racines renforcent et fixent les couches de sols. C'est pourquoi les arbres et arbustes dotés de racines profondes et denses sont plus efficaces pour réduire les mouvements de sols.

La végétation aide surtout à prévenir les glissements de terrain superficiels, soit ceux d'une profondeur d'un à deux mètres. Les glissements plus profonds sur les pentes très abruptes, eux, sont moins influencés par le couvert végétal. (Développement Durable. Environnement, Faune et Parcs Québec).

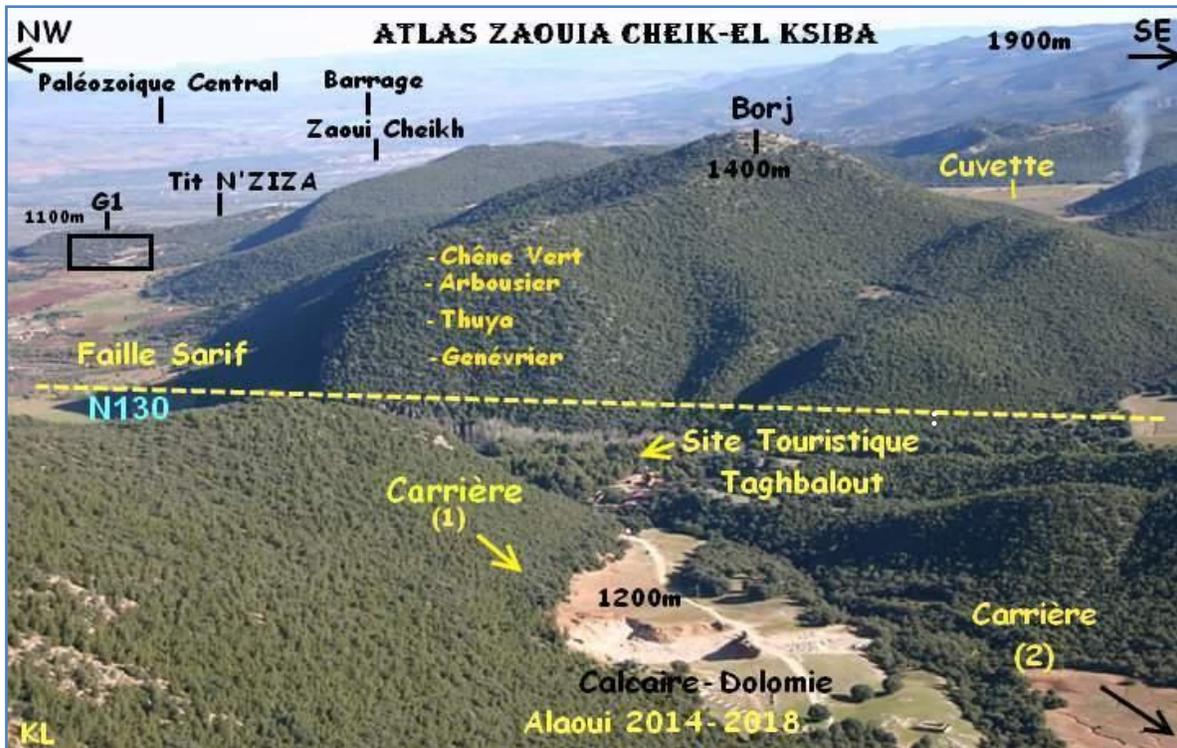


Figure 21: Forêt envahie par la surexploitation des carrières à matériaux

2.3. DOMAINE AGRICOLE DANS LES MONTAGNES

La forêt est en effet le milieu terrestre qui abrite et nourrit le plus d'êtres vivants. Une distinction est à faire entre la déforestation brute, où les plantations ne sont pas prises en compte, et la déforestation nette où celles-ci sont prises en compte. Fig22

Un mécanisme de contrôle ne portant que sur la déforestation nette aura tendance à privilégier la fonction de stockage de carbone, et à négliger la perte de biodiversité liée aux destructions des forêts naturelles.

Cependant, il convient de rester prudent sur les effets de la déforestation car l'extension des surfaces forestières comme celle de la déforestation ne sont pas des données scientifiquement établies et indiscutables.

Comme partout ailleurs au Maroc, la pression due aux animaux d'élevage dans le Rif, le Moyen-Atlas et le Haut Atlas, se traduit par une demande croissante des besoins en produits ligneux [bois de chauffage, bois de construction, objets en bois, meubles] et pour le pâturage ou le fourrage, provoquant une surexploitation des ressources naturelles.

Les pertes annuelles en surfaces forestières et pastorales sont considérables. Les prélèvements de biomasse sous forme de bois de feu et d'unités fourragères pâturées au

niveau des écosystèmes naturels sont, par endroits, largement supérieures à celles produites par les écosystèmes. Benjamin LISAN 2004.

Les zones de montagne situées à plus de 1000 m d'altitude couvrent 26% de la superficie du Maroc. En dépit de leur importance spatiale et démographique, ces régions ont été relativement délaissées dans les plans de développement rural, en raison de l'hostilité du milieu ambiant et des difficultés d'aménagement (El Alaoui, 1992), en comparaison avec les zones de plaine (périmètres irrigués, ceintures d'agriculture pluviale et milieux suburbains).

L'exploitation rationnelle et durable des ressources naturelles (forêts, faune sauvage, eaux, ...) pourrait apporter un surplus de revenus aux ruraux en zones de montagne au Maroc, mais elle tarde à se concrétiser (Bourbouze, 1998).

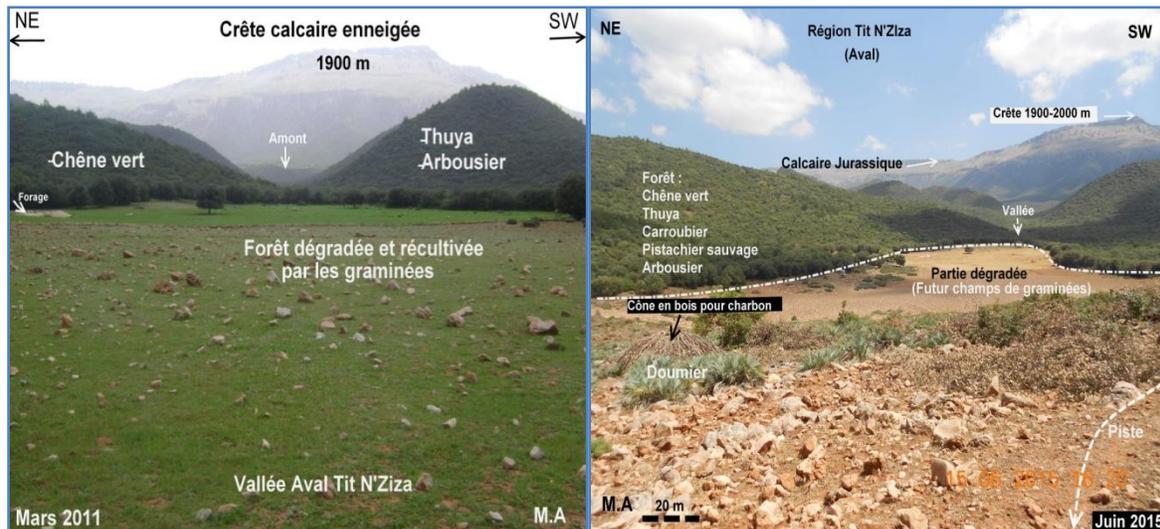


Figure 22: Degré de dégradation de la forêt par usage humain et par culture des céréales

L'exploitation des terres en montagnes, par culture des espèces fruitières a pu endommager les forêts des arbres stabilisants des terres. Dans les deux atlas le pâturage excessif, l'industrie du charbon, et l'évasion des cultures à rendement important, ont favorisé un effet néfaste sur le couvert végétal sauvage et par conséquent les terrains sont devenus de véritables espaces favorables à toutes sortes de risques géologiques suite à leur forte instabilité gravitaire et géomorphologique des versants.

Au Maroc, très peu d'études ont été réalisées sur la relation entre les changements climatiques et les politiques de développement rural, notamment dans les montagnes. Jusqu'aux années 1990, les politiques de développement rural étaient basées sur la lutte

contre la dégradation des forêts et l'érosion des sols, visant en premier lieu à réduire l'envasement des barrages.

Depuis les années 2000, les efforts se sont davantage orientés vers le contact direct avec la population afin de répondre à leurs besoins. Toutefois, l'intégration du domaine forestier au système agricole n'a pas débouché sur les résultats escomptés.

Très préoccupées par les impacts multiformes du changement climatique, les populations demeuraient peu réceptives aux propositions sectorielles des projets relatifs à la gestion patrimoniale des forêts. Pour y remédier, de nouveaux programmes de développement ont été mis en place et décentralisés à l'échelle des communes.

Bien que les projets engagés restent en-deçà des besoins, la nouvelle approche du développement rural se veut plus territoriale en matière d'amélioration de la résilience des populations aux changements actuels et futurs du climat.

Les forêts retiennent la majorité de l'eau de pluie qu'elles interceptent ou l'infiltrant en rechargeant les nappes phréatiques (dix fois plus environ qu'une pâture; elle-même beaucoup plus efficace qu'un champ labouré).

Les arbres contribuent plus que le reste de la flore au phénomène d'évapotranspiration et ce qui influence la pluviométrie. Ils créent une hygrométrie locale importante en zone tropicale. Leurs racines vont chercher l'eau jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de profondeur, ou de distance latérale. Reboiser et favoriser la régénération naturelle : voilà deux moyens efficaces de prévenir les glissements de terrain!

La dégradation des écosystèmes augmente la vulnérabilité des communautés humaines aux glissements de terrain. On estime qu'environ 3,7 millions de kilomètres carrés sur la planète y sont exposés, ce qui représente un risque pour 300 millions de personnes. (Développement Durable. Environnement, Faune et Parcs Québec).

4. MINES ET POTENTIEL MÉTALLOGÉNIQUE DE LA ZONE

Couvrant un grand domaine de la chaîne atlasique au Sud du domaine Mésétien au Nord-ouest, la région Béni Mellal-Khenifra abonde en formations géologiques variées riches en métaux de base, dont le Fer, le Plomb, le Zinc, le Cuivre, le Sel Gemme, ainsi que les Phosphates. Énergie & Mine CRI Béni Mellal-Khenifra.

Cette région dispose de ressources minières importantes. Selon le Centre Régional d'Investissement, le secteur minier est tiré essentiellement par l'extension des capacités

productives de l'OCP, mais aussi par l'abondance d'autres ressources minières qui sont exploitées par les investisseurs privés. L'OCP est en effet un acteur majeur dans la région qui contribue fortement au développement économique et social. La province de Khouribga est la plus importante zone de production de phosphate au Maroc. Le groupe OCP, qui y mène plusieurs projets est à ce titre un acteur majeur dans la région, qui contribue fortement au développement économique et social. Avec la grande réserve mondiale en phosphates se trouve dans le bassin des Oulad Abdoun. Les Ecos.ma 2016.

Dans le but de développer le secteur minier dans la région de Béni Mellal-Khenifra, la délégation régionale de l'Energie et des Mines a donné l'assistance et l'aide efficace aux jeunes investisseurs pour implanter et faire des études d'exploration et aussi l'exploitation des permis de recherches minières afin de donner un essor économique à la région, la minéralisation dans cette région est générée par deux processus géologiques :

- **Mines liées aux accidents tectoniques**

Les failles hercyniennes normales ont joué un rôle primordial dans la mise en place des basaltes entre le Permien et le Trias par amincissement de la croûte terrestre.

Les Grabens triasiques sont devenus des Horsts pendant le Crétacé suite aux contraintes régionales. Ces failles normales ont rejoué en failles inverses pendant l'orogénèse atlasique, la formation des croisons NNW-SSE à Nord-Sud et leur remplissage par les coulées hydrothermales riches en hydrosilicates de Zinc.

Les karstes ont abrité des minéralisations au niveau du Lias moyen par la mise en place des mines de Zinc en qualité de "Calamina" ou Calamines dans l'Atlas Béni Mellal-Khenifra. On cite le cas de la mine de Tadaghast à Ait Boulli et celle de Taghya à calamines au Sud de Tagleft (18% à 32% Zn). Le remplissage des karstes par les fluides porteurs de minéralisations a fait l'objet de plusieurs études, surtout dans les cassures karstiques du lias moyen le long de la chaîne atlasique.

- **Mines liées aux intrusions magmatiques**

La mise en place de plusieurs Basaltes et Gabbros durant le jurassique, a favorisé un processus minéralogique et métallogénique qui a donné une dizaine de mines anciennes et actuelles. On note les grandes mines de cuivre, de plomb, et de zinc liées au volcanisme jurassique, telle l'ancienne mine de Naour, celle de Ghazi Tabaroucht, et de Tansrift.

La production régionale de métaux de base déjà cités en plus de Barytine et de Manganèse a été de 39184 tonnes durant 2015, et celle des phosphates s'élevait à 19878280 tonnes vers la fin Novembre 2015.

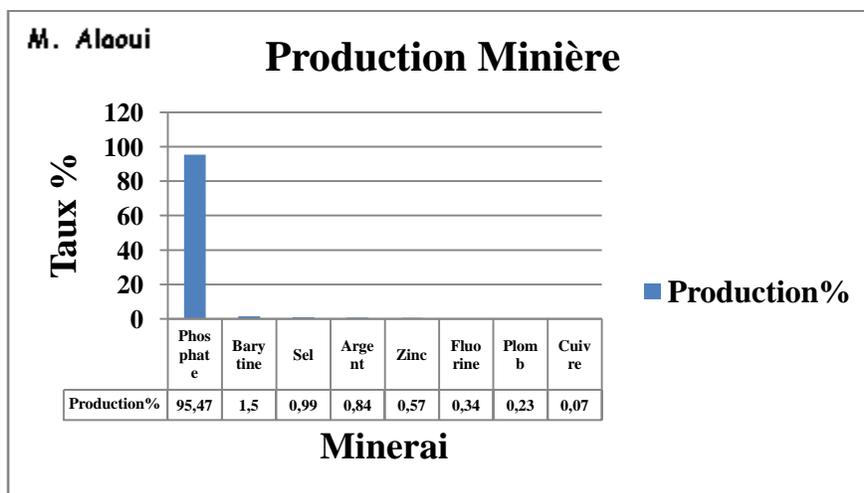


Figure 23: Types de minerais exploités dans la région d'étude

Le phosphate reste l'élément minéral le plus important qui dépasse 95% à l'échelle nationale, et représente la première réserve mondiale, les autres métaux sont en cours de développement tel le zinc, le plomb et le cuivre. La barytine vient en seconde classe avec un taux de 1.5%. *UMT. Alaoui 2005 Fig23.*

1.4. ANCIENNES MINES DE LA RÉGION

On cite la mine de cuivre de « *Naour* » situé à 30 km au S.E d'El Ksiba, mise en place par un volcanisme tardi-orogénique.

Cette zone est l'objet d'un projet en qualité de permis de recherches minières à tendance de réexploiter les anciennes galeries et remblais. Dans les travertins d'El Ksiba à la base des écaillés calcaires on note l'ancienne mine nommée *Boulmâadane* de Plomb dominant la route provinciale P3208 depuis le Sud.

Dans le Haut Atlas Central, et à l'Ouest du glissement de Tabaroucht, d'environ 750 m, on a la mine dite « *Mine de Ghazi* ». Sa mise en place est liée, probablement aux dykes jurassiques et des coulées basaltiques d'âge jurassique supérieur ou du Bathonien.

Après épuisement de ces mines, le risque d'éventuels glissements de terrains est fortement probable, en présence des facteurs d'instabilité, surtout, par effondrement des galeries après enlèvement des piliers. *Fig24.*

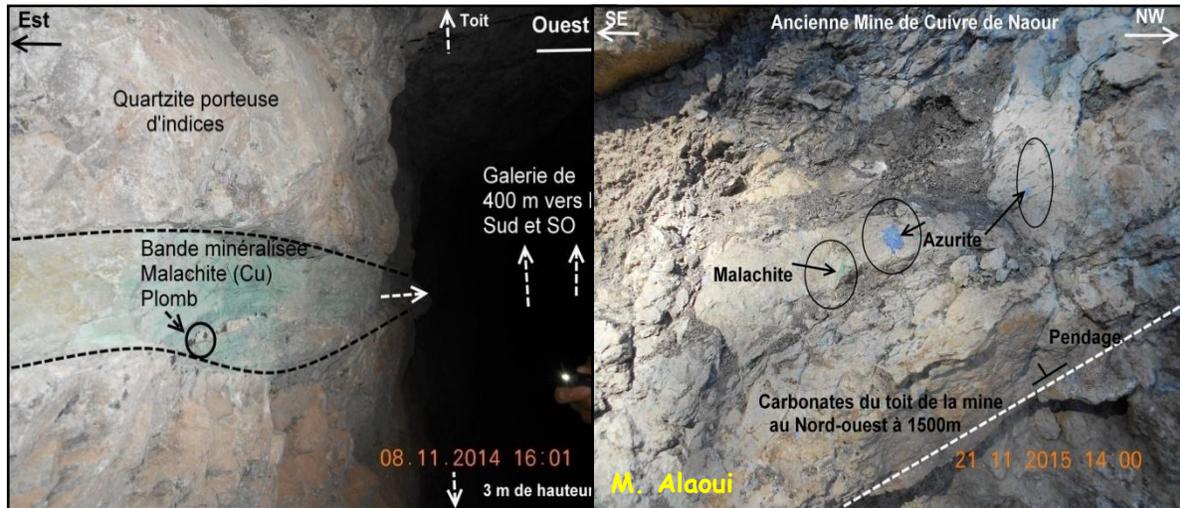


Figure24: Mines de cuivre: Ghazi Haut Atlas Central et de Naour Moyen Atlas

2.4. NOUVELLES ET FUTURES MINES

Actuellement, et à nos jours, plusieurs sociétés à octroi de permis de recherches minières ont entamé des études détaillées afin de valoriser le minerai, avec tendance d'améliorer le produit national et chercher des coopérations avec les pays leader dans le domaine de la prospection et la recherche minière ciblant les métaux précieux. L'actuelle prospection fait recours aux méthodes géophysiques pour plus de précision pour l'estimation des réserves en place, car la reconnaissance minière par des sondages mécaniques, qualifiés de sondages directs, est plus chère, notamment le carotté.

L'Atlas de Béni Mellal-Khenifra est un domaine riche de point de vue mines et carrières de métaux et matériaux, telles les schistes paléozoïques du Massif Hercynien Central, et des carrières des basaltes altérés destinées pour les cimenteries. Les collines éocènes d'El Ksiba est une vaste zone riche en calcaire travertin, ce qui a poussé la cimenterie CIMAT à installer l'usine sur les plaines d'en face.

Les montagnes entre Zaouïa Cheikh et El Ksiba ont connu, ces dernières années, une importante exploration des sites à indices de métaux précieux tels le cuivre, le plomb, et le zinc. Les travertins d'El Ksiba de Boulmâadane à 5km au Sud-ouest a fait l'objet d'une exploitation ancienne du plomb, actuellement cette mine est en cours d'une prospection minière afin de l'exploiter à nouveau.

A 12 Km de Tit N'Ziza une série de permis de recherches sont implantés pour prospector et valoriser les niveaux minéralisés notamment le complexe Plomb-Zinc, qui renferme des traces d'argent (Ag^+) selon l'augmentation de la teneur du Plomb, en ciblant

les structures de la géotransversée Zaouïa Cheikh-Aghbala de Jbel Bou Sannane à formations porteuses d'indices de minéralisation. Fig25.

Après fermeture de ces mines, le risque de mouvements de terrains est probable, notamment, en présence des facteurs d'instabilité, surtout, par effondrement des galeries après enlèvement des piliers et fluctuation des nappes souterraines.

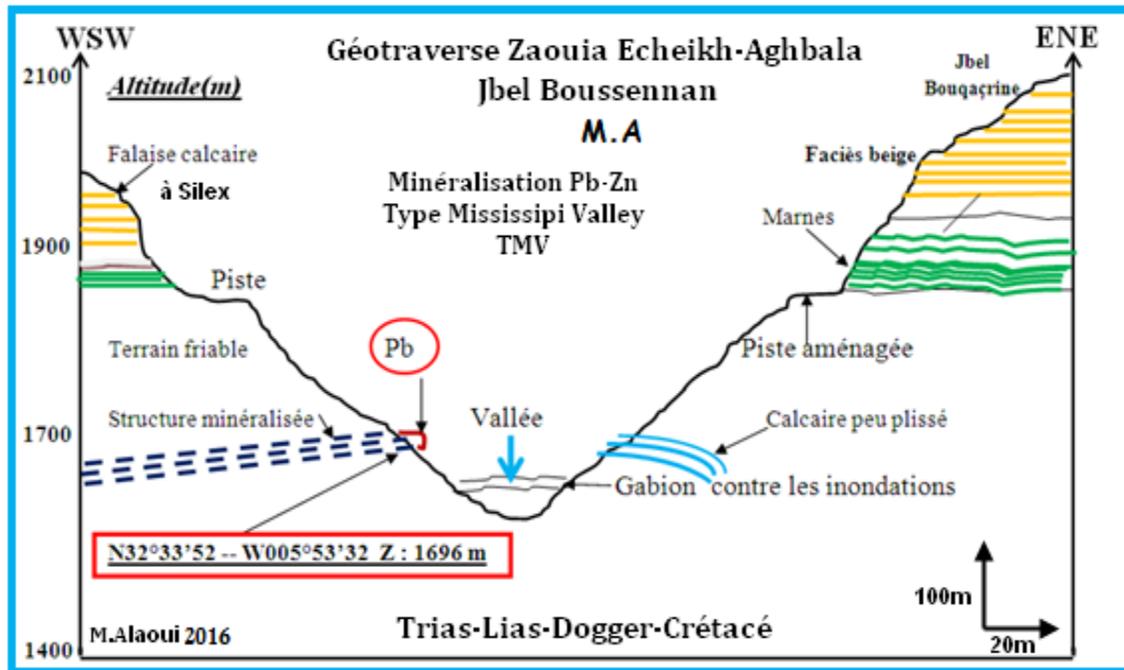


Figure 25: Profil géomorphologique simplifié d'une zone à indices de Pb 12 km à l'Est du glissement

5. DESCRIPTION DES GLISSEMENTS DE TERRAIN DANS LA ZONE D'ÉTUDE.

1.5. POSITIONNEMENT DU GLISSEMENT DE TIT N'ZIZA G1

Le glissement est situé à environ 2 Km du Sud-est d'Imhiouach, se trouve à une altitude entre 980 1100 m, sa latitude est de [32.578134°N] et sa longitude est de [-5.978395°E] en degré décimal en points cardinaux Nord et Est. Il s'agit d'un talus à éventuel glissement de terrain, la pente globale varie entre 55% et 65%, déduite de la carte topographique (Khenifra 1/50000) par les courbes de niveau et l'échelle, et vérifiée par des mesures de boussole.

Le mauvais comportement du sol entraîne une migration d'une masse de terre vers le bas, notamment pendant les périodes pluvieuses de l'année. Fig27

L'aménagement de la piste est un facteur majeur de l'instabilité géologique, avec un impact direct et indirect de quelques facteurs tels les pluies torrentielles, la dégradation de la forêt en crête, et les secousses sismiques.

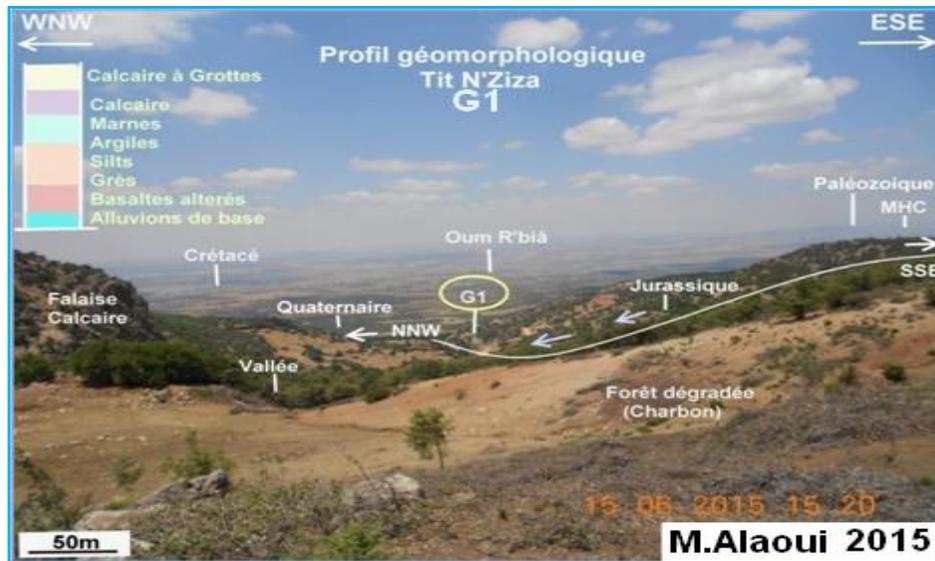


Figure 26: Géologie régionale et vue panoramique de la vallée à glissements de terrain

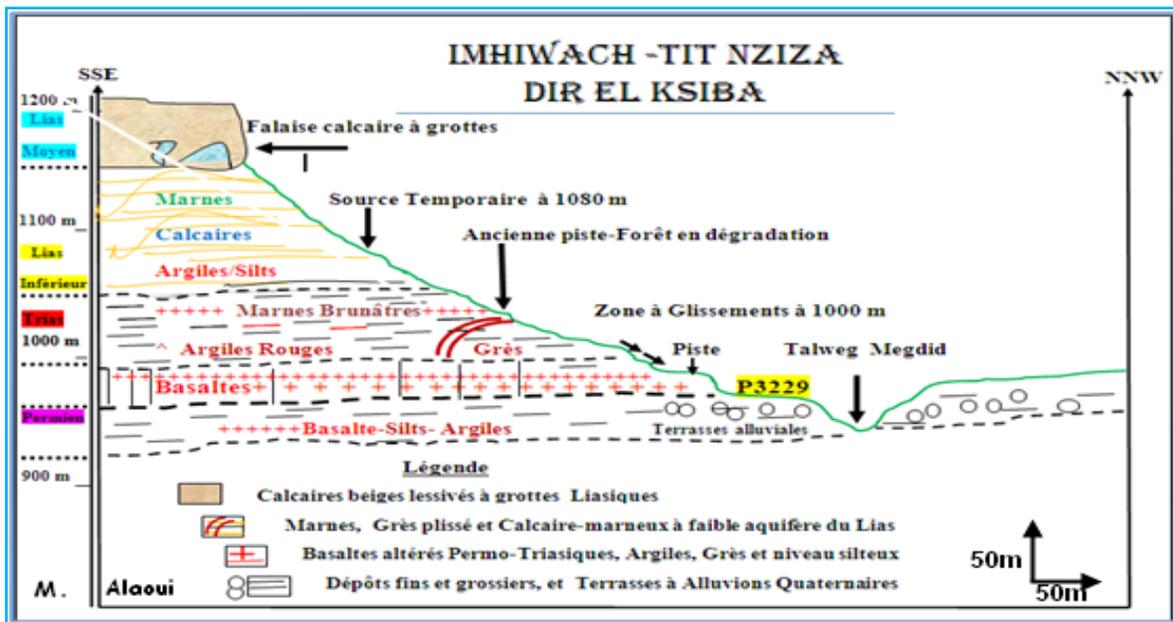


Figure 27: Profil géologique simplifié de la vallée à glissement G1 "Tit Nziza"

De point de vue géologie, la zone est formée par des dépôts calcaires, des marnes et des argiles et aussi des basaltes par endroits. L'âge des formations remonte au Trias et Jurassique (-140 Ma). Les formations Crétacées affleurent, notamment, dans les plaines au Nord en contact avec le paléozoïque en discordance et Nord-ouest du site .Fig26 et Fig27.

2.5. POSITIONNEMENT DU GLISSEMENT DE TABAROUCHT G2

Le secteur d'étude se situe dans les montagnes du Haut Atlas Central, appartenant à la région d'Azilal. Le lieu du risque domine le bassin de Bine El Ouidane en direction de l'ESE, à une altitude de 1200 à 1400 m, empruntant la piste aménagée, goudronnée actuellement, sur la route régionale amenant vers Tilouguit et la Cathédrale.

Ce point à mouvement de terrain situé entre les longitudes [N32°00'00'''] et [N32°30'00'''] et les méridiens internationaux [W006°10'00'''] et [W006°20'00'''], point à [32,11837 -6,25921], ces coordonnées sont en Degré, Minute, Seconde et Degré décimal.

Suite aux mouvements de terrain affectant la piste aménagée entre Ouauizerht et Tabaroucht à 2 km au Sud-ouest du chef-lieu de la commune territoriale, déclaré par les autorités locales et par les Eaux et Forêts en Octobre 2014, une mission d'expertise a été effectuée, ceci en vue de s'enquérir des principales données suivantes :

- Ampleur du glissement et son risque sur l'environnement
- Origine du mouvement de terrain et les facteurs précurseurs
- Recommandation et proposition d'un confortement adéquat

Une exploration géologique et géotechnique des substratums formant les séries sédimentaires de cette partie sera très efficace pour connaître l'origine des facteurs directs d'un tel mouvement de terrain.

Les données géomorphologiques et structurales vont nous permettre de qualifier l'intensité de l'aléa et son impact sur l'environnement naturel et humain avec des dégâts matériels importants.

Les formations géologiques de cette région sont purement jurassiques s'étalant du Lias jusqu'au Dogger. C'est un versant orienté NNE-SSW à Nord-Sud, présentant des pentes variables de 55% à 70%, avec une végétation moins dense et à système racinaire très limité, surtout, l'amandier, le genévrier et quelques arbustes. Fig28

Le Talus est traversé par un torrent, issu d'une faille N0 à N30, qui draine les eaux à l'amont, on a deux types de sol à mauvais comportement en présence d'eau qui sont :

- Un sol brunâtre en amont avec éboulis de calcaires où apparaît le grand miroir de glissement qui devient petit en allant vers l'Ouest par l'action des racines du chêne.
- Un sol jaunâtre à grisâtre avec cassures et brèches présentant un aquifère dans un niveau marneux violacé avec un débit varie entre 36 m³/J et 40 m³/J.

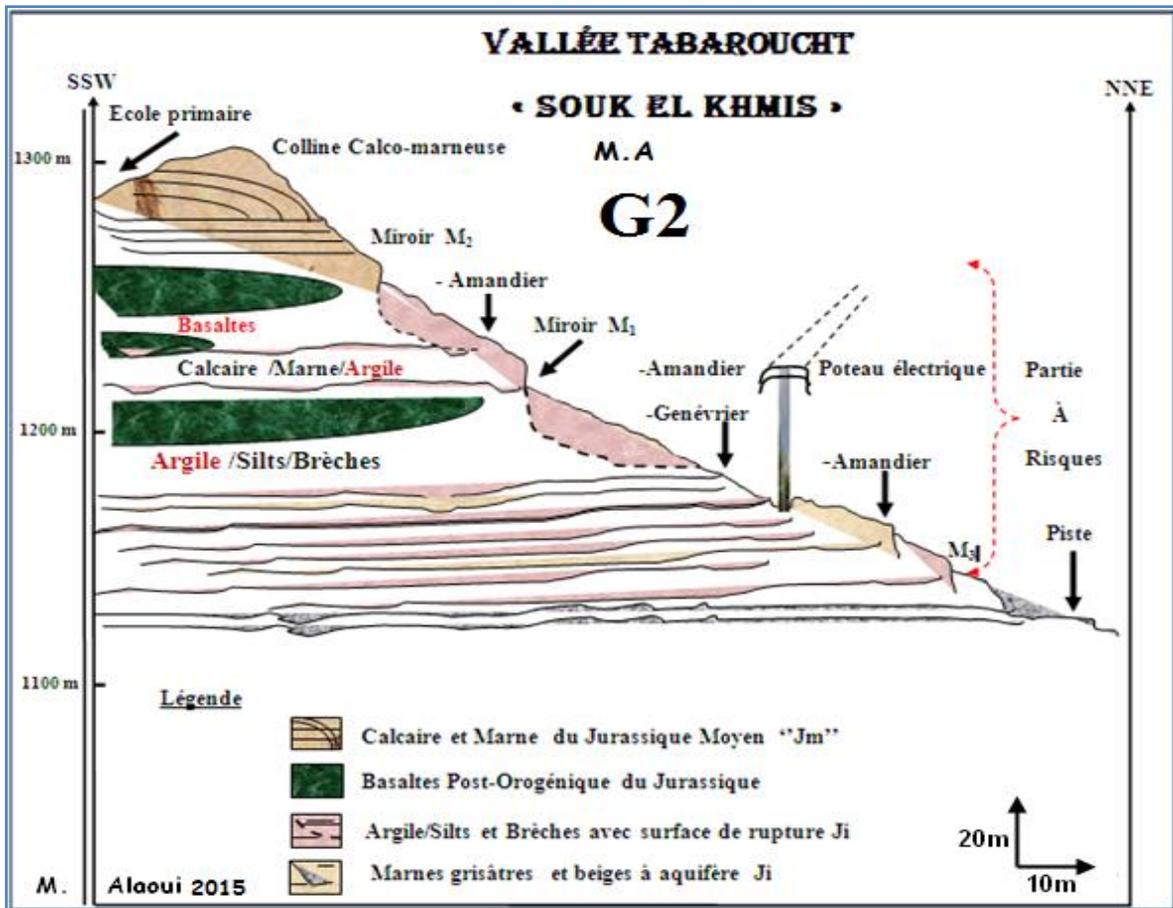


Figure 28: Coupe géomorphologique simplifiée du talus à glissements de terrain G2

Les roches volcaniques n'affleurent pas au niveau des miroirs, ce qui traduit la vulnérabilité de ce versant face aux facteurs d'instabilité géomorphologique.

Les coins où les calcaires présentent un léger plissement ou bien qui ont un pendage subvertical ont une stabilité remarquable avec une résistance aux risques de glissement, donc on peut dire que ce type de formation structurale joue le rôle de piliers et rend ces parties un peu stables.

La réception d'une quantité importante de neige, cas de la période [Janvier-Février] de l'année 2018, a favorisé, par la suite, un flux d'eau très élevé suite à la lente fonte des névés par conséquent une infiltration efficace au niveau de l'impluvium à l'amont des talus, ce qui obligera un remède efficace et adéquat avant d'être mis en péril.

Le glissement en question a touché un champ d'amandier, le flan droit de la piste aménagée, une huilerie, et la partie aval de la piste, les fissures ont dépassé 0.55m, par endroits, les déplacements relatifs des miroirs varient entre 0.45 m et 2.6 m.

Chapitre III

MATÉRIEL ET MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

Pour en connaître la nature, la géométrie et l'évolution dans le temps d'un glissement de terrain, il est nécessaire d'étudier le site. Des relevés topographiques, des études en laboratoire sur les propriétés du matériau et la mise en place d'inclinomètres sont les techniques généralement retenues pour localiser la ou les surfaces de cisaillement et suivre l'intensité et l'évolution du mouvement dans le temps. (Feregotto, 2010). Fig.29

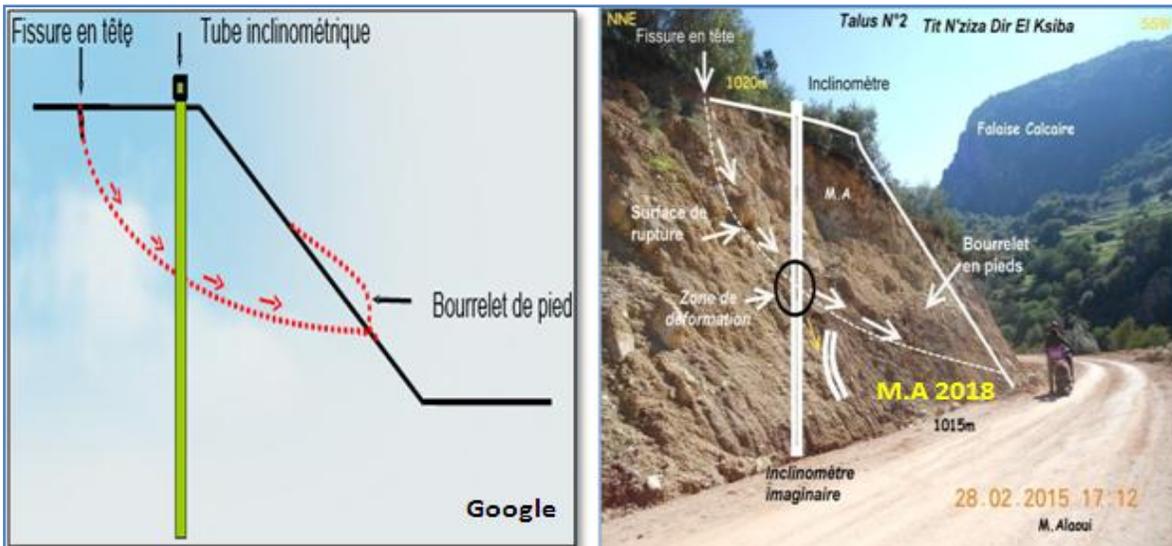


Figure 29: Fonctionnement d'un tube nclinometrique à la base d'un glissement de terrain

Cartographier, à différentes échelles et déduire la valeur de la pente conditionnant la problématique par un fond topographique avec une démonstration mathématique à l'aide de l'équation de l'arc tangente [Arctan] et confirmation par la boussole en mesurant le pendage de la grande pente de la partie glissée.

L'analyse des cartes topographiques et la recherche sur terrain nous a donné une idée précise sur le réseau hydrographique qui peut intervenir d'une façon directe dans l'évolution de l'aléa dans le temps et dans l'espace. Les eaux souterraines et de surface jouent un rôle déstabilisant sur les sols et les massifs rocheux avec des manifestations qui peuvent être extrêmes comme les glissements de terrain.

On peut exploiter les données structurales pour savoir le régime tectonique de la région d'étude. Les directions des failles et quelques légers plissements dans les grès au sein des marnes, par la projection des orientations dans le canevas de Schmidt, peut-on déduire la contrainte de la déformation tectonique pour confirmer les accidents majeurs de l'orogénèse atlasique qui a donné lieu à l'actuelle chaîne de montagnes.

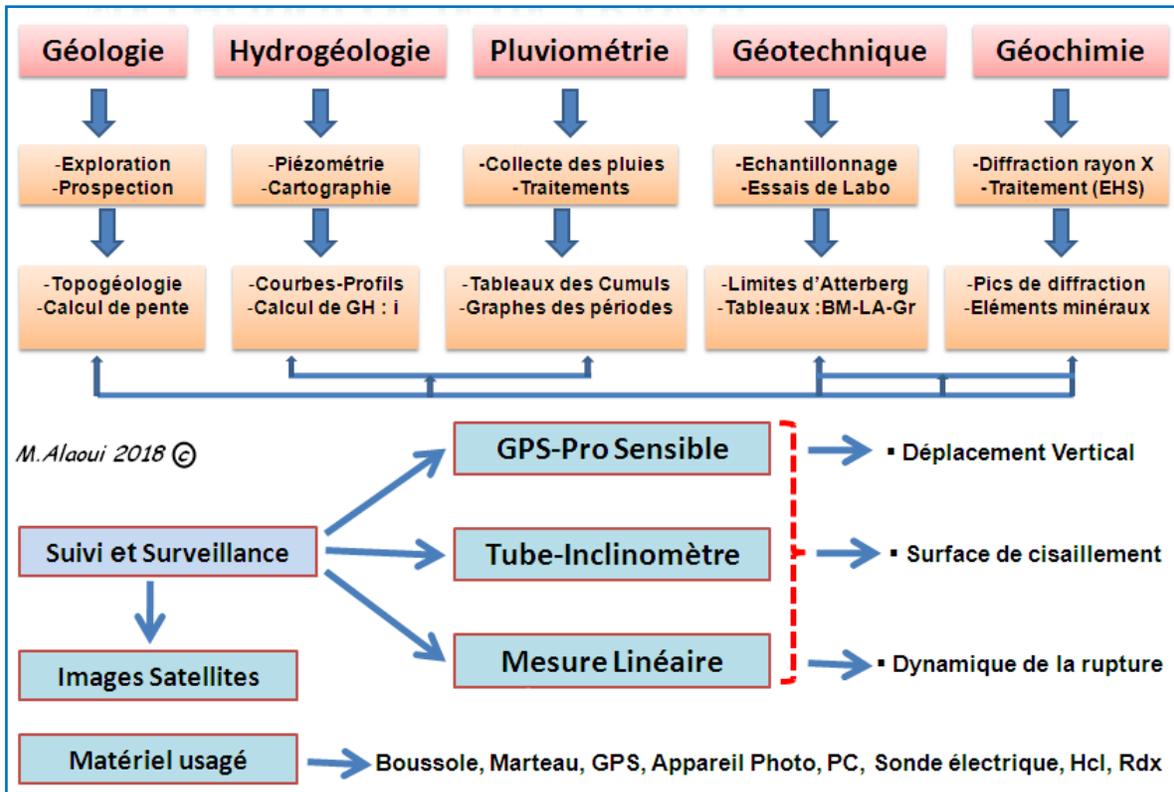


Figure 30: Organigramme de la méthodologie de travail usagée

Pour prévenir ces risques, la modélisation hydromécanique et hydrogéologique doit aller de pair avec des opérations de drainage des eaux et une bonne surveillance.

Les nappes souterraines, et plus exactement leurs fluctuations liées aux conditions météorologiques ou parfois aux actions humaines, sont très souvent à l'origine de déclenchements des mouvements de versants : glissements, éboulements, coulées ou laves torrentielles. Fig30.

De point de vue hydrogéologie, une série de mesures piézométriques a été effectuée afin de connaître le niveau aquifère en amont du site, notamment, de savoir l'origine des eaux aux pieds des talus en période sèche (entre Mai et Octobre).

On a déduit le niveau piézométrique ou bien le niveau d'eau, d'après la loi de Darcy, les écoulements souterrains sont contrôlés par le gradient hydraulique de chaque milieu poreux. Au niveau du sondage [W₃] le niveau piézométrique NP est de 1086 m d'après la formule suivante :

$$NP = \text{Altitude} - \text{Profondeur}_w \quad (\text{Niveau d'eau}) \text{ avec } [\Delta h = 100\text{m}](1).$$

Les arrivées des eaux au niveau du glissement est favori par un gradient hydraulique important, en présence d'un substratum poreux. La différence entre 1086 et 986 m est très important (1), ce qui va augmenter le drainage par le coefficient de perméabilité K.

1. MÉTHODOLOGIE GÉOTECHNIQUE

La géotechnique est une branche de la géologie dans le cas général ; c'est la branche qui étudie la mécanique des sols. Donc l'objet de la géotechnique est le sol lui-même, l'analyse du glissement de terrain en question repose sur des levés de terrain et sur l'exploitation des résultats d'expertise géotechnique. Fig31.

La campagne de reconnaissance géotechnique a été réalisée par le Laboratoire de Géotechnique, durant les travaux de terrassement de la piste, qui a fait l'objet de deux prélèvements d'échantillonnage d'analyse pour des essais mécaniques sur le sol et le matériau de la partie à risque de glissement. Connaitre les limites géométriques et la nature des matériaux, donc on peut déduire un modèle géotechnique.

1.1. INDICES D'INSTABILITÉ GRAVITAIRE

Parmi les indices d'instabilité rencontrés au niveau du talus on note :

- Fissurations liées à la dessiccation du sol ou fente de fissuration
- Miroirs ou plans liés au déplacement des masses de terre ou plan de rupture
- Inclinaison des arbres ou angle de déviation [α]
- Failles à différentes orientations ou cassures dans les substratums



Figure 31: Fissurations de Tension au niveau de la piste durant les périodes arides

Des fissures, dont l'ouverture peut atteindre **12** cm d'ouverture et presque **30** m de longueur, sont apparues sur la piste en amont du talus glissé. Elles ont contribué à l'augmentation de la perméabilité du terrain et l'infiltration des eaux de pluies. Fig31.

Des nids d'arrachement naissent en haut du talus, suite au mauvais comportement du sol, des plans de rejet apparaissent en pente engendrant des miroirs nets, qui peuvent nous renseigner, souvent, sur la cinétique du mouvement. L'inclinaison des arbres, notamment à système racinaire faible, est un bon indice sur terrains. Fig31 et Fig32.



Figure 32: Inclinaison des arbres suivant les plans de ruptures G1: Tit Nziza. G2: Tabaroucht

Un sol instable à différentes conséquences sur la forêt: il peut entraîner des troncs partiellement enterrés, un déracinement des arbres, et le plus fréquemment des arbres «courbés »; sur un sol en mouvement, l'arbre tend à s'incliner dans la direction du mouvement. Pour maintenir une croissance verticale, l'arbre se courbe, d'où un tronc en forme de « crosse ».

Un arbre courbé permet ainsi d'estimer la ou les directions d'un glissement de terrain (direction des courbures), ainsi que l'amplitude du mouvement (angle d'inclinaison α), (Braam et al. 1987b). Il faut néanmoins être attentif aux autres conditions du secteur, une pente forte, le vent, la neige, la compétition avec les arbres voisins pouvant causer également une courbure (Schweingruber, 1993).

Il est connu que le tronc d'un arbre s'accroît par cernes annuelles concentriques. La courbure a pour conséquence la déformation des cernes. Cela est permis grâce à la formation de bois de réaction, bois plus foncé dont la structure des cellules a été modifiée.

Chez les conifères, ce bois se forme dans le sens du mouvement, d'où une asymétrie des cernes du côté « aval » du tronc. L'analyse de l'excentricité des cernes est une science à part entière, la dendrogéomorphologie, considérée comme une méthode très précise pour

dater les processus géomorphologiques (Lang et al. 1999). Elle est dérivée de la dendrochronologie (du grec dendron: arbre, chronos: temps, logos: étude).

Dans les Alpes, elle a été utilisée à de nombreuses reprises pour dater des glissements de terrain (Braam et al. 1987b; Kirschoffer, 1994; Astrade et al. 1998; Lopez Saez, 2006), les résultats dates d'activité de glissements - étant précis, ils peuvent être intégrés dans des modèles de stabilité de versant et servir à les caler (Van Asch et al.1997; Buma, 2000), d'autre part, l'analyse des cernes permet de mettre en relation croissance de l'arbre, activité de glissement et conditions climatiques.

Ainsi, il est possible de déterminer l'impact de l'évolution du climat sur les glissements de terrain, dans un contexte de changement climatique. Les racines permettent de stabiliser les sols par ancrage vertical, en augmentant leur résistance au cisaillement.

De nombreuses recherches montrent les effets néfastes des coupes forestières sur l'activité de glissement de terrain. A la base de chaque miroir les arbres présentent une inclinaison des troncs suite au mauvais comportement des sols vis-à-vis de la teneur en eau, l'angle de déviation dépend de l'ampleur et le type de la flore.

2.1. INDICES GÉOTECHNIQUES

Les roches et les sédiments peuvent naturellement contenir de l'eau. La place qu'elle occupe dans une masse donnée s'exprime en pourcentage du volume total: c'est ce qu'on appelle la Teneur en Eau, notée souvent [W].

En mécanique des sols et des roches, la définition de la teneur en eau est pondérale :

$$w = \frac{W_w}{W_s}$$

Où on a :

- W_w est le poids d'eau ou bien le poids humide, - W_s est le poids des grains appelé aussi poids sec, ou fraction solide.

- W_w : Poids Humide - W_s : Poids Sec - w : en Pourcentage

Il existe des valeurs seuil à partir desquelles les matériaux vont changer de comportement, du fait de la perte de cohésion entre les particules. On distingue ainsi :

La limite de plasticité, « W_P » qui désigne la teneur en eau à partir de laquelle une masse solide adopte une consistance comparable à celle d'une pâte et se déforme.

La limite de liquidité, « W_L » qui est le pourcentage d'eau au-delà duquel la masse se liquéfie et coule et devient visqueuse.

Limite de retrait « W_R » c'est le pourcentage d'eau où la masse solide adopte une consistance qui tend vers une pâte peu maniable.

Indice de consistance « I_C » c'est le rapport qui exprime la sensibilité à l'eau d'un sol par rapport à sa teneur W

L'indice de Plasticité, « I_P » c'est la différence entre limite de plasticité et limite de liquidité, il est calculé par la formule suivante :

$$I_P = W_P - W_L \quad I_c = \frac{w_l - w}{I_p} \quad (2) \quad [\text{Commet 1951}]$$

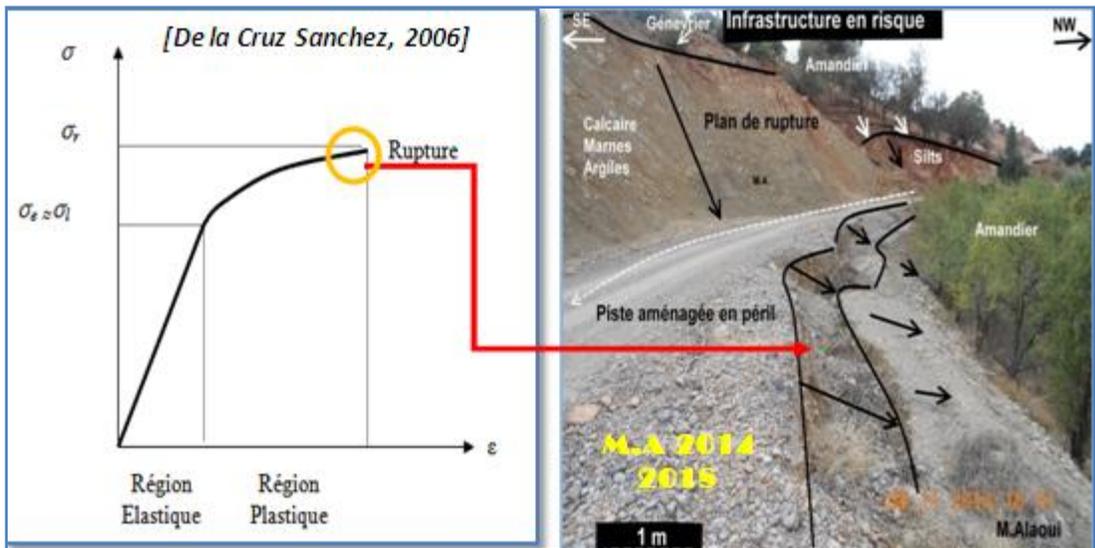
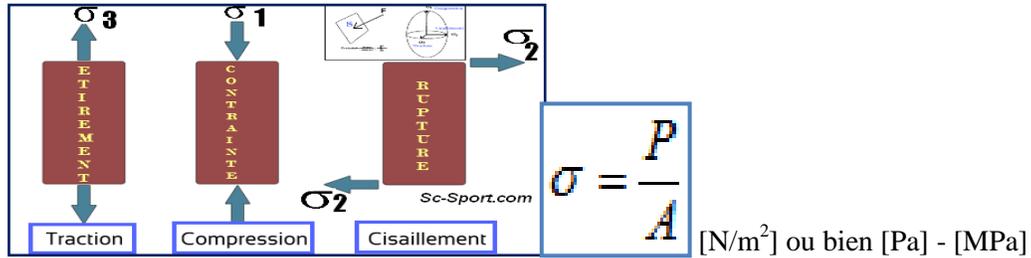


Figure 33: Relation entre Déformation[ϵ] et Contrainte [σ] au sein des sols

Tout corps, le bois inclus, est soumis à l'action des différentes forces externes, notamment celles de compression, de traction et de cisaillement (Panshin et de Zeeuw 1980). De la combinaison de ces trois forces s'origine la force de flexion. La résistance d'un corps aux différentes forces externes détermine sa résistance mécanique (De la Cruz, 2006). Un corps soumis à des sollicitations externes développe des efforts internes représentés par la notion de contrainte. Celle-ci se calcule à partir de l'équation suivante :



Où : $-\sigma$: Contrainte, $-P$: Force appliquée, $-A$: Surface de la section transversale

La relation fondamentale entre la déformation $[\epsilon]$ et la contrainte $[\sigma]$ est une fonction linéaire telle que : $f[\epsilon] = [\sigma]$. (Gere et Timoshenko, 1997).

Le bleu de méthylène, c'est pour déterminer la fraction argileuse contenue dans le présent matériau. La valeur de bleu de méthylène, MB est souvent exprimée en grammes de colorant par kilogramme de fraction 0/2 mm et obtenue à l'aide de l'équation mathématique suivante :

$$MB = 10 \cdot \frac{V_1}{M_1}$$

Où on a :

- **M1** : La masse de l'échantillon, en grammes
- **V1** : Le volume total de solution de colorant injectée, en millilitres. Fig34

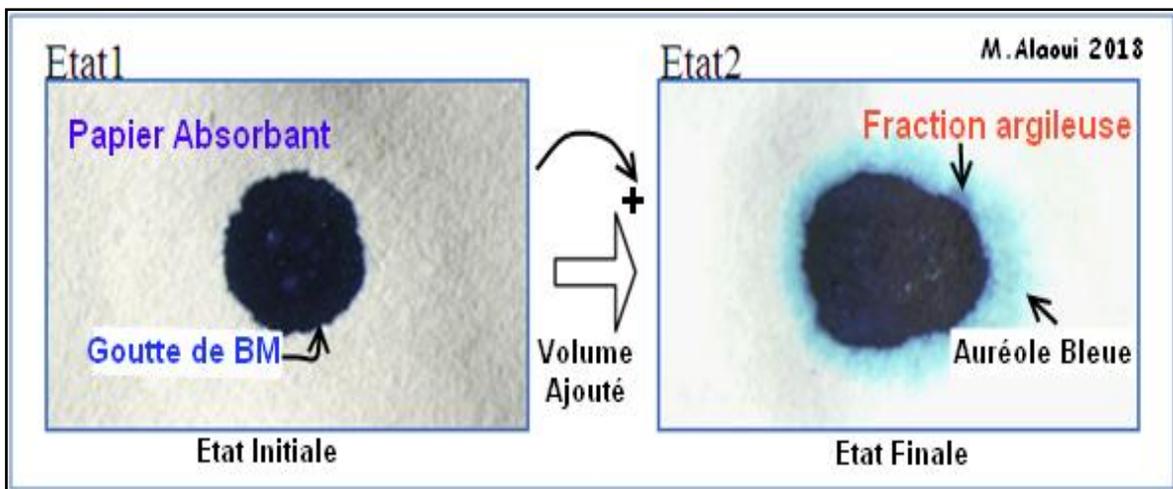


Figure 34: Détection de la fraction argileuse dans le substrat par le Bleu de Méthylène

L'analyse granulométrique, a pour but de déterminer les proportions pondérales des grains de différentes tailles dans le sol. Le but c'est d'avoir une idée sur la perméabilité K.



Figure 35: Dispositifs des essais géotechniques et mécanique du Sol (Laboratoire-Public)

2. MÉTHODOLOGIE HYDROGÉOLOGIQUE

La recherche de l'origine des arrivées d'eau au niveau des bases de glissements a préoccupé notre pensée, ce qui fait une compagnie de prélèvements et captage des nappes sises en amont s'avérait indispensable pour connaître l'origine des écoulements souterrains qui ruinent les talus, même, en périodes sèches. L'usage d'une sonde électrique (120 m) et d'un GPS (Garmin S62) pour positionner et mesurer les élévations et altitudes relatives aux ouvrages hydrauliques sis en amont du talus. Les mesures piézométriques ont été effectuées entre Juillet 2015 et Juin 2016, pour diagnostiquer le flux en périodes arides.

Ouvrage	Well 4	Well 3	Well 2	Well 1	Source Karstique "Tit N'Ziza"
Hydraulique	Ouvrage 4	Ouvrage 3	Ouvrage 2	Ouvrage 1	
Coordonnée	N32°34'32.6"	N32°34'30.0"	N32°34'23.7"	N32°33'59.0"	N32°34'41.6" W005°57'32.1"
Géographique	W005°57'51.4"	W005°58'07.4"	W005°58'03.7"	W005°59'45.7"	
Altitude (m)	1135	1132	1152	1198	1122
Profondeur (m)	07.02	18.03	31.30	55.40	0.25 0.25
2015-2016	06.46	18.28	31.49	54.90	
Profondeur_w (m)	15.00	46.00	51.00	105.00	1.00
Niveau des eaux (m)	1120.00	1086.00	1101.00	1093.00	1121
Diamètre de l'ouvrage Ø(m)	1.20	0.40	0.40	0.40	1.00

M.A

Tableau 1: Prélèvement des principales nappes et sources à l'amont du talus G1

Le choix des dates n'était pas au hasard, mais notre perspective c'est de détecter la problématique de l'aléa en dehors des mois pluvieux. En Juillet 2015 le talus présentait des

sources à suintements ou à faible débit à la base, avec présence des têtards, donc le lien hydrogéologique entre le talus et le bassin en cuvette à l'amont est relativement prouvé. Fin Septembre 2015 les arrivées d'eau au niveau du glissement présentait des traces d'abeilles qui léchaient cette eau durant toute la période sèche est un acte qui prouve que les eaux arrivent toute l'année. Les données des piézomètres, les profondeurs, et les coordonnées géographiques, prélevés sur terrain ont été exploitées pour concevoir une carte relative de situation des sondages et sources, et d'estimer le niveau piézométrique pour comparer les affleurements en bas du talus et le niveau moyen des nappes. Tableau1

D'après les mesures d'altitudes on a déduit que le sens d'écoulement est d'orientation globale[E-W], ce qui fait que la sursaturation des nappes peut augmenter le flux hydraulique qui va par la suite faire affleurer en sources au niveau du talus G_1 .

Le gradient hydraulique "i" est un paramètre physique qui nous aide à savoir exactement le sens de l'écoulement souterrain. La conception d'une carte hydrogéologique est un atout de plus pour connaître le flux de l'aquifère et déduire la pente, et les lignes de partage des eaux souterraines. La relation entre l'altitude et la profondeur de la nappe nous donne le niveau piézométrique de l'aquifère, quant à celle entre l'altitude et la profondeur de l'ouvrage nous donne la base du flux dans la cuvette en amont du talus. Fig46 et Fig47

3. MINÉRALOGIE DU SUBSTRAT

Les rayons X ont été découverts en 1895 par W. Röntgen à Würzburg en Allemagne, le symbole "X" venant de l'inconnue en Mathématiques. La faculté des rayons X à traverser des parois opaques et à révéler l'intérieur du corps humain lui a valu un grand retentissement populaire. Les premières applications ont été tournées vers l'étude des cristaux afin de mettre en évidence les atomes constitutifs des molécules et confirmer ainsi la justesse du nombre d'Avogadro. En 1912, le physicien Laue a réussi à déterminer la longueur d'onde des rayons X grâce à un réseau cristallin. La plupart des scientifiques du début du siècle, comme par exemple Pasteur en biologie, utilisèrent les rayons X pour étudier les corps cristallisés.

Les premières applications médicales ont été réalisées par Marie Curie lors de la 1ère Guerre Mondiale pour aider les chirurgiens présents sur le front. La diffraction des rayons X est une méthode universellement utilisée pour identifier la nature et la structure des produits cristallisés. Cette méthode ne s'applique qu'à des milieux cristallins (roches,

cristaux, minéraux, pigments, argiles...) présentant les caractéristiques de l'état cristallin, c'est-à-dire un arrangement des atomes constitutifs de façon périodique, ordonné et dans des plans réticulaires tridimensionnels.

Les domaines d'application de la diffraction par Rayon X sont très variés et peuvent concerner aussi la recherche (valider un nouveau matériau, une réaction chimique ou physique, étudier des roches, ou des structures protéiques...), l'industrie (contrôle qualité d'un produit) ou l'art (analyse de peinture). (Simon Haziza et Emmanuelle Deleporte, Septembre 2014).

La minéralogie c'est l'étude de la répartition des éléments chimiques, de leur distribution dans les roches, les minéraux, les eaux et les gaz terrestres, de leur origine, de leur nature et de leur comportement au cours des processus géologiques. Elle applique les outils et concepts de la chimie à l'étude de la terre et des sédiments. Dans une certaine mesure, des échantillons sont accessibles à l'investigation chimique.

Une série d'échantillons ponctuels a été effectuée afin de déterminer les éléments chimiques contenus dans chaque niveau, notamment, les sols à mauvais comportement en présence d'eau. Certes, la zone est dominée par des argiles, des marnes, des calcaires beiges, et des basaltes altérés, donc notre tendance est orientée pour confirmer la teneur en argile et types des minéraux argileux jouant le rôle de déstabilisant en général.

Le choix des échantillons était au niveau des miroirs et à la base de la partie en mouvement pour le cas du G1 que pour celui du G2. Fig39 et Fig42

Les analyses minéralogiques, nous permettent d'avoir un aperçu sur la qualité des minéraux argileux détectés par le bleu de méthylène MB afin de comparer les données de la mécanique des sols avec la minéralogie des substrats rencontrés sur terrains. Fig40

- **Méthodologie et échantillonnage**

Les missions de terrain étaient axées sur l'expertise et le prélèvement des échantillons, une série de sachets stériles pour éviter toutes contaminations, et un runirage le long du miroir et sur le talus de glissement afin de pondérer les éléments du matériau.

Un séchage s'avère indispensable pour éliminer la teneur d'eau $[\omega]$ si l'échantillon est humide, après avoir séché le matériel, on broie le tout jusqu'à avoir de la poudre. Fig36.

On tamise à 250 μm , le tamisât est récupéré et divisé en deux échantillons, une partie pour analyse et l'autre pour témoin en cas de perte ou bien de faux usages. Fig36 et Fig37.

Les argiles jouent alors divers rôles par leurs propriétés physico-chimiques particulières; par leurs charges négatives, elles fixent des cations sous la forme échangeables; avec la matière organique elles contribuent à une organisation structurale favorable à la circulation de l'eau et de l'air; par leur capacité d'absorber de l'eau entre les feuillets (Argiles gonflantes), toutes ces propriétés font de l'argile un matériau d'une qualité exceptionnelle.

L'appareil de mesure s'appelle chambre de diffraction quand il est photographique et diffractomètre quand il comporte un système de comptage des photons (détecteur ou compteur), les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme.

Pour un angle d'incidence (θ) sur le cristal, on observera de la diffraction à l'angle 2θ pour la composante du rayonnement de longueur d'onde (λ) vérifiant la loi de Bragg: [$2d \sin\theta = \lambda$], cette loi va nous permettre de calculer la distance réticulaire entre les feuillets des argiles. Cette méthode consiste à bombarder l'échantillon avec des rayons X, et à regarder l'intensité de rayons [X] qui est diffusée selon l'orientation dans l'espace. Fig38.

[Diffractomètre ou Dispositif de Bragg-Brentano]

- **Matériel utilisé**



Figure 36: Préparation des échantillons pour analyse minéralogique

Le choix des points était objectif afin de connaître la minéralogie des lieux où le comportement des sols réagit avec la présence de l'eau et les autres facteurs, surtout la pente et la nature géologique. Les quatre derniers échantillons montrent, presque, un même

pic idéal qui correspond à l'angle de diffraction 15° ($2(\theta)=30^\circ$). Ce qui traduit une similitude des substratums au niveau du G1, avec la présence des basaltes par endroits. Fig39 et Tableau2.



Figure 37: Broyeur minéral et Tamis 250 µm

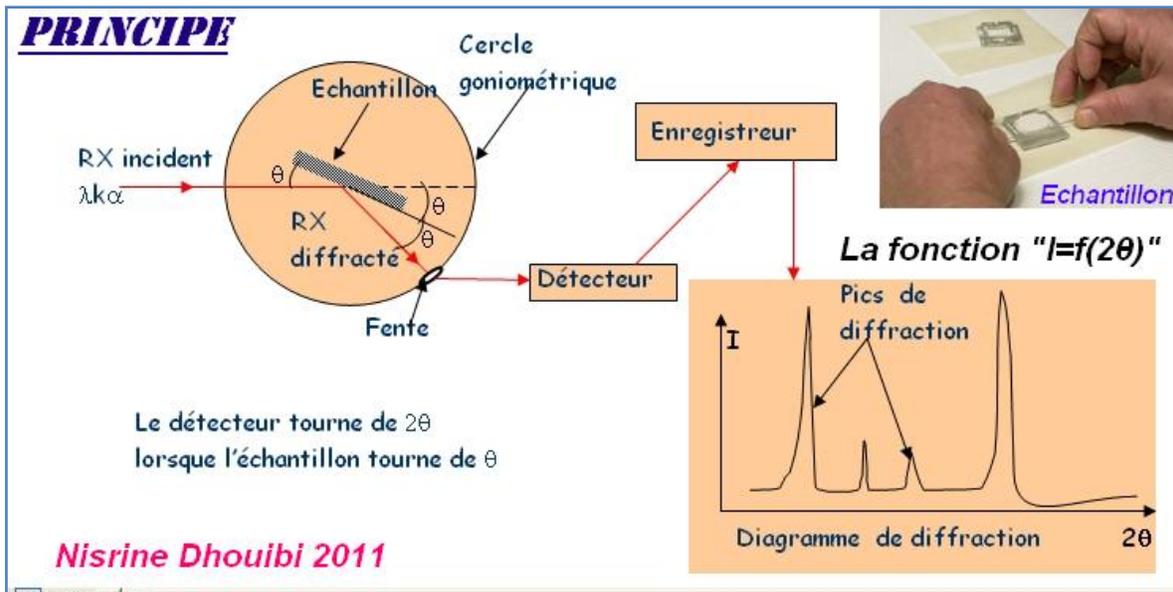


Figure 38: Schéma du principe du montage d'un tube à diffraction aux rayons X

Plusieurs travaux antérieurs à travers le monde ont montré que des minéraux argileux de smectite, de montmorillonite, de bentonite, d'illite, de vermiculite, de kaolinite, ou encore de sépiolite ont des capacités d'adsorption des métaux lourds dans les effluents et les eaux contaminées. (A.Qlihaa et al, « JMES » Mars 2016). Le diffractogramme a été obtenu à partir d'un seul échantillon désorienté (placés directement sous forme de poudre

dans un porte-échantillon classique). Le diagramme des rayons X de ce matériau brut est illustré par la figure 38.

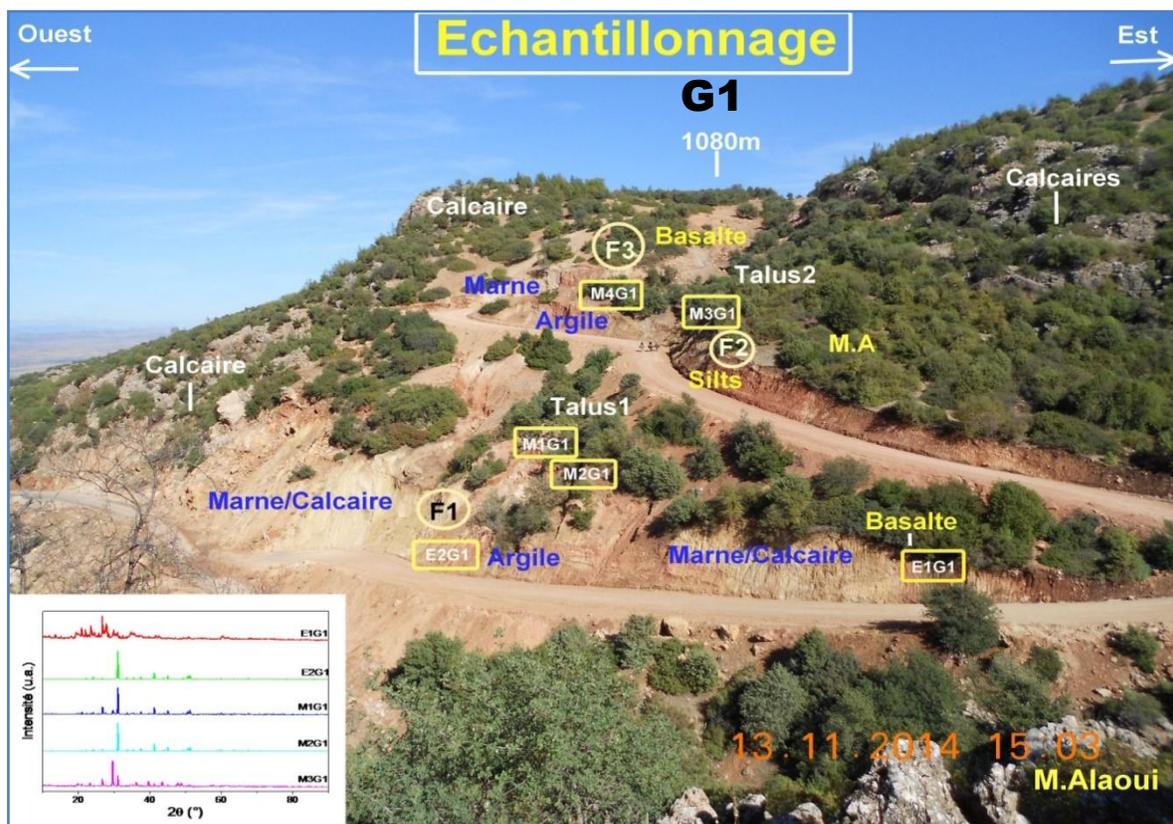


Figure 39: Vue générale de la partie échantillonnée du glissement G1

Echantillons	1	2	3	4	5
	E1G1	E2G1	M1G1	M2G1	M3G1
Coordonnées	N32°34'38.4''	N32°34'40.6''	N32°34'40.4''	N32°34'40.8''	N32°34'40.4''
GPS	W005°58'43.1''	W005°58'44.5''	W005°58'43.7''	W005°58'43.6''	W005°58'42.4''
Altitude(m)	984	976	996	997	1010
Sédiments	Calcaire-Basalt	Argile-Calcaire	Argile-Marne	Argile-Marne	Argile-Calcaire
Minéral	Si-CaO-Fe2O	Si2O-CaCO3	Si2O-Si2O	Si2O-Cr	Si2O-CaCO3

M.A 2018

Tableau 2 : Analyse minéralogique et localisation des points de prélèvement par [GPS]

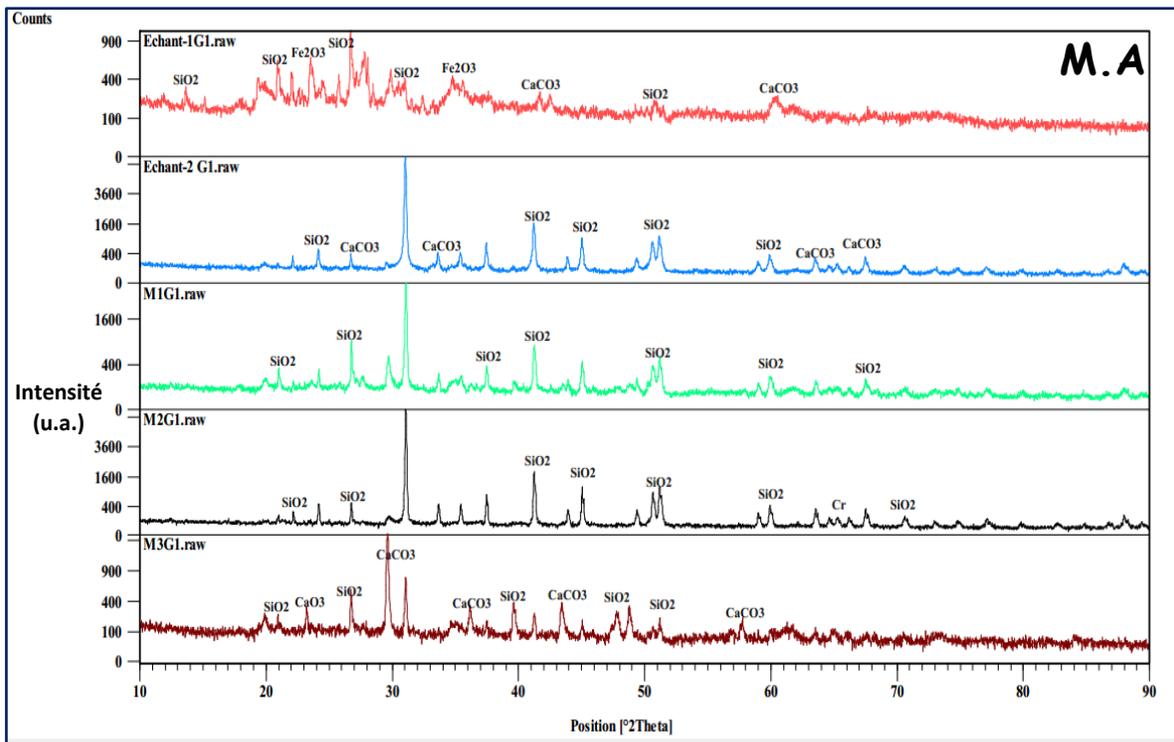


Figure 40: Résultat minéralogique de la diffraction des sédiments du Talus G1

Après analyse par DRX et traitement par Expert High Score, les échantillons du talus N°1 ont montré un pic identique avec l'angle de diffraction $2(\theta)=30^\circ$ des cristaux de la poudre bombardée par les rayons X. Le seul minéral dominant c'est le SiO_2 au niveau du miroir M1. L'échantillon M2, en plus du SiO_2 on a des traces du Chrome « Cr » qui est un minéral non argileux, ceci est expliqué, peut être, par l'existence d'une teinte jaunâtre à jaune motarde à la base de la rupture.

Le miroir M3 du talus N°2 montre des pics de CaCO_3 et SiO_2 en parallèle, cela veut dire que le substratum principal est marno-argileux à argilo-calcaire. Fig40 et Fig41

Quant à l'échantillon E2, les minéraux figurant sur le graphe sont celles des argiles et des carbonates, ceci est expliqué par le contact anormal par la faille F1, des formations marnocalcaires avec celle des argiles et silts issus de la masse de terre déplacée vers la piste. Pour l'échantillon E1 présentant des pics tout à fait différents des autres points prélevés, on a apparition des oxydes de fer (Fe_2O_3) issus des basaltes altérés (Hématite) et le CaCO_3 issu des carbonates à la base de la série liasique à fini-triasique. L'argile détectée par le [BM] appelée Montmorillonite fait partie des smectites et les phyllosilicates, elle

contient plus de Silicium, ce qui la rend acide à pH= 2.5 et d'alumine Al_2O_3 ; est une argile gonflante ($d=14A^\circ$ à $17A^\circ$) entre les feuillets après saturation par H_2O .



Figure 41: Lieu d'échantillonnage au niveau des miroirs du Talus1/G1

L'étude des sols a d'abord été naturaliste, basée sur la description qualitative, afin d'appréhender leur variabilité, leurs propriétés et leur évolution. Aujourd'hui, l'ambition affirmée est d'affiner la description qualitative en orientant les études vers la quantification.

Il s'agit d'améliorer les interprétations jusque là qualitatives afin de pouvoir obtenir des données transposables entre disciplines scientifiques (physique, chimie, biologie ...).

Le but en fin, est de comprendre l'ensemble des processus intervenant dans les sols. L'étude des sols est actuellement envisagée selon deux approches scientifiques complémentaires. L'approche holistique ou écologique, considère le sol comme une entité complexe qui possède des caractéristiques émergentes liées à sa totalité.

L'autre approche, dite réductionniste, réduit un système ou ses processus complexes à leurs composants plus simples en considérant ces derniers comme plus fondamentaux que la totalité complexe (Schwartz, 1997, extrait de Gobat et al. 2003).

D'après ces résultats obtenus on peut conclure qu'on a la même géologie et la même sédimentologie qui est détectée pour les deux sites. Donc la nature géologique est capitale dans l'instabilité des versants et talus qui réagit en présence de l'eau.

Le choix des points était objectif afin de connaître la minéralogie des lieux où le comportement des sols réagit avec l'eau et les autres facteurs majeurs, surtout la pente et la nature géologique.

L'analyse indique qu'elle est composée de Quartz (SiO_2), Calcite Ca (CO_3). Il révèle principalement la présence de deux pics intenses, l'un correspond à la Calcite et l'autre à un mélange de Quartz, ce qui implique que notre sédiment est hétérogène. Fig40

Ces résultats sont en parfait accord avec les observations au niveau du glissement du site G1. La fraction argileuse de notre matériau est constituée de Quartz et de Calcite comme indice majeur dans notre échantillon, cela confirme les résultats de la mécanique du sol du glissement Tit NZisa ou G1 qui montre des proportions élevées de SiO_2 (Quartz) et de CaCO_3 (Calcite). Les graphes obtenus par RDX confirment les éléments principaux de sa formule chimique suivante :

[(Na, Ca) 0,3(Al, Mg) Si₄O₁₀ (OH) _{2n} H₂O], déduite des essais de la mécanique du sol.

L'existence du complexe silice-Carbonate ($\text{CaCO}_3\text{-SiO}_2$) nous pousse à penser au complexe Marne-Calcaire-Argile, favorisant les bonnes conditions de rupture, surtout en présence des eaux.

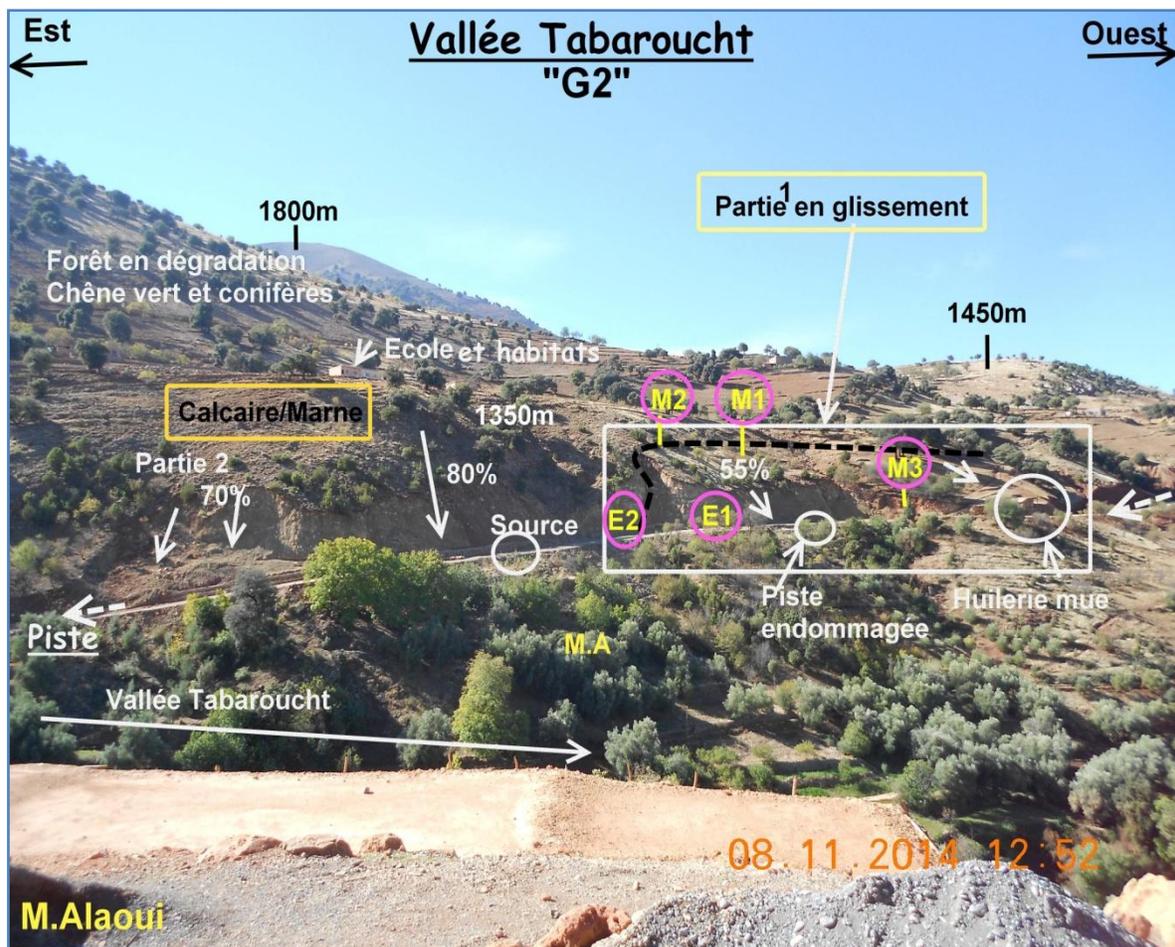


Figure 42: Vue panoramique de la partie à échantillons du Talus G2

Echantillon	1	2	3	4	5
M.A	E ₁	E ₂	M 1	M2	M3
Coordonnées GPS	32,11846 6,25280	32,11846 6,25192	32,11828 6,25357	32,11833 6,25377	32,11878 6,25409
Altitude(m)	1290	1285	1324	1321	1311
Type de sol	//	//	Argile- Marne	//	//
Chimie Minérale	//	//	CaCO3- SiO2	//	//

Tableau 3: Analyse et résultats minéralogique et localisation des points du Talus G2

On a centré notre analyse minéralogique sur le miroir M1 qui est localisé au cœur de la pente à glissement de terrain, la vallée qui présente ce type d'aléas renferme la même

série sédimentaire, ce qui nous a poussé à valider le résultat obtenu par diffraction aux rayons X ou RDX, par conséquent on a considéré que les éléments minéraux font partie de toute la colline à risques de glissements de masses dans cette zone d'étude G2, donc on peut pondérer ces résultats sur la nature du substratum du flan de la pente. Fig43 et Fig44.

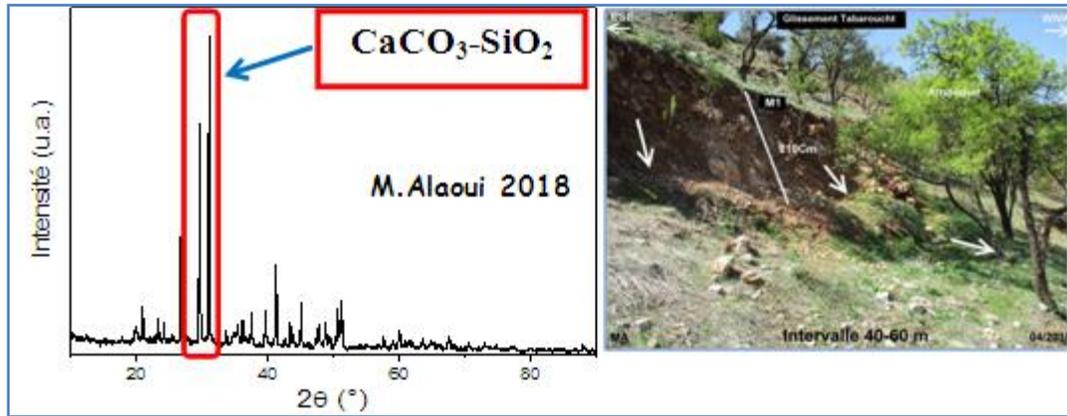


Figure 43: Minéralogie en graphes du miroir M1 du talus G2 Tabaroucht .



Figure 44: Localisation et cartographie des échantillons de la zone à glissement de terrain G2

Chapitre IV

RÉSULTATS D'ÉTUDE HYDRAULIQUE

1. PROCESSUS HYDROLOGIQUES ET HYDROGÉOLOGIQUES DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Les eaux souterraines constituent l'un des principaux facteurs de contrôle influençant l'activité des glissements de terrain. L'étude hydrogéologique, donc, est une étape incontournable dans la compréhension de leur fonctionnement, en vue de prédire leur déplacement ou d'adapter les solutions d'assainissement.

Cependant, les aquifères qui se développent au sein des glissements de terrain sont généralement complexes, et la compréhension de l'hydrogéologie des grands glissements reste encore aujourd'hui une problématique majeure (Belle, 2014).

L'augmentation de la teneur en eau d'un terrain est généralement étroitement liée aux conditions météorologiques : on la doit le plus souvent à des infiltrations ou des remontées de nappes phréatiques consécutives à des précipitations importantes (intenses et/ou prolongées), auxquelles peuvent venir s'ajouter la fonte des neiges.

Les glissements du Serre-des-Bayles (Monestier-du-Percy) en 1978, de l'Harmalière (Sinard) en 1981 et de la combe des Parajons (la Salle-en-Baumont) en 1994 se sont par exemple produits dans un contexte similaire, à la suite de fortes pluies et de la fonte du manteau neigeux.

Si l'on doit le plus souvent attribuer l'augmentation de la teneur en eau d'un terrain à des causes naturelles, il arrive aussi qu'elle soit liée à la présence de l'homme et à ses activités, par exemple en cas de fuites, voire de rupture, de canalisations souterraines, ou de concentration de rejets en eau après une imperméabilisation des surfaces.

1.1. HYDROGÉOLOGIE DU GLISSEMENT DE TIT N'ZIZA G1

La connaissance des arrivées des eaux souterraines est l'une des actions les plus efficaces pour prévenir, stabiliser ou ralentir un glissement de terrain. L'étude sur le mode d'alimentation de la nappe est indispensable pour intervenir d'une manière adéquate.

Cela démontre l'importance de l'étude hydrogéologique pour la compréhension de l'évolution des glissements de terrain, mais aussi pour maîtriser le risque correspondant.

Les mesures effectuées montrent que les nappes ont resté, relativement, statiques entre 2015 et 2016. Fig45 et Tableau1.

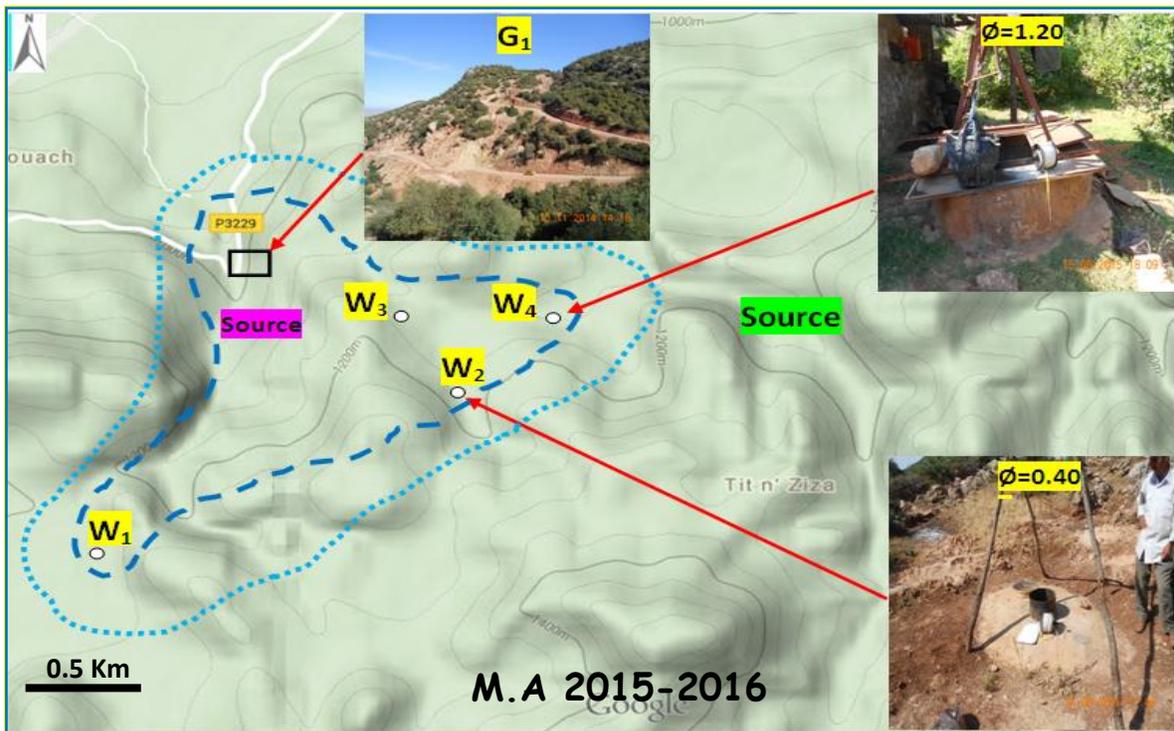
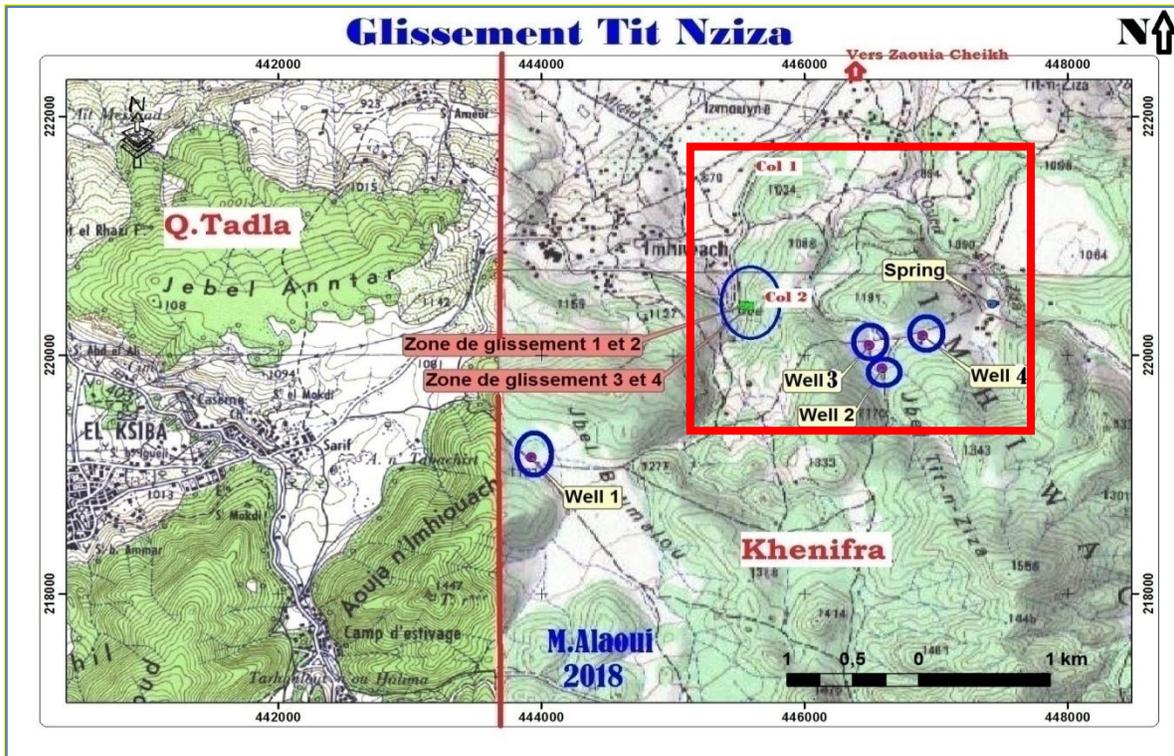


Figure 45: Situation ouvrages hydrauliques mesures en amont du talus à glissement G1

L'alimentation de la plupart des aquifères de cette zone est assurée par la fonte des neiges issue des crêtes entre 1800 m et 2000 m, et les pluies fines en présence d'un

substratum poreux calcaire-dolomie. Les mesures effectuées pour les différents aquifères à l'amont du talus vont nous renseigner sur l'arrivée des eaux aux pieds du talus en période sèche et leur impact direct sur l'instabilité gravitaire.

Quatre forages et une source karstique ont été prélevés et mesurés périodiquement, c'était entre Juillet 2015 et Juin 2016. Le choix de ces mois n'était pas au hasard, mais l'objectif était pour avoir une idée sur le flux de base de chaque aquifère là où l'irrigation s'accroissait. D'après ces mesures, la région est formée de plus de 3 aquifères différents à des altitudes variables selon la tectonique intrinsèque Fig45.

Ces principaux aquifères situés entre le piémont (Aquifère Liasique du Dir) et la plaine au Nord (Aquifère du Dir) où les sources ont des débits faibles. (Bouchaou 1996).

- Nappe phréatique entre 12 m et 15 m capté par un puits classique (W_4) de 1.20 m de diamètre, destiné à la boisson domestique et irrigation d'un verger de 0.5 ha

- Nappe libre peu profonde entre 45 et 50 m captée deux forages (W_2 et W_3) de 0.4 m, l'approche agricole est probable pour irriguer une surface importante.

- Nappe captive au SO entre 105 et 110 m captée par le forage W_1 de 0.4 m. L'irrigation des graminées et cultures variées estimés à plus de 5 ha. [*Tinifidine*]

- Nappe karstique, affleurant à l'Est et à l'amont des grottes et travertins, c'est une nappe issue des montagnes lointaines vu que pendant les pluies intenses ne montre pas de turbidité des matières en suspension probablement liée aux fontes des neiges.

C'est le seul point des eaux de la consommation humaine des agglomérations avoisinantes, l'aquifère principal se localise dans les dolomies et calcaires. L'Atlas de Béni-Mellal situé au rebord nord-ouest de la chaîne Atlasique Marocain (à l'intersection du Haut et Moyen Atlas), renferme un aquifère liasique Karstique très important.

Ce dernier donne naissance à plusieurs sources dont la plus importante est Ain Asserdoune (0.6 à 2.5 m³/s).

La synthèse géologique et paléomorphologique, montre que l'aquifère principal est situé dans les calcaires dolomitiques du Lias de plateforme.

Les sources émergent au niveau du chevauchement majeur de la bordure entre Timoulilt et Zaouïa Cheikh. La karstification est précoce (secondaire). (Bouchaou, et Pierre Chauve 1988).

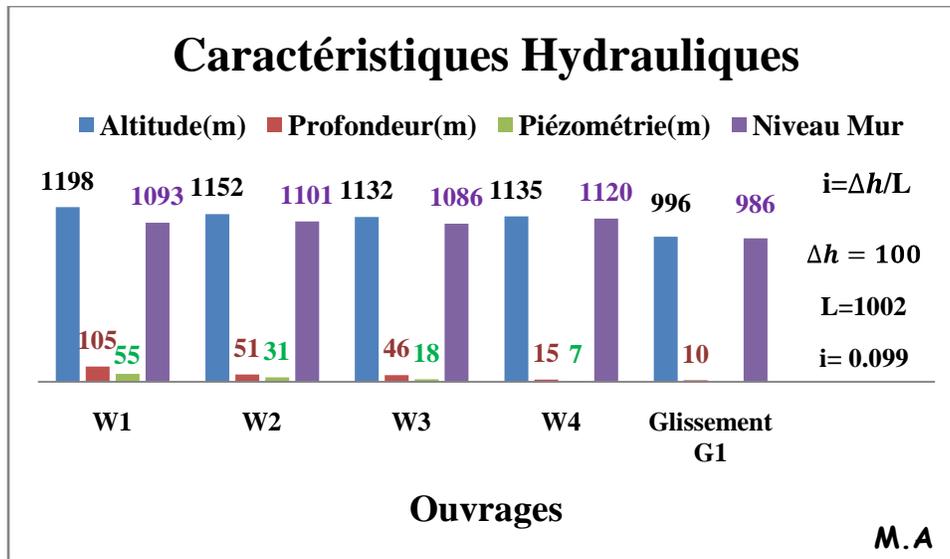


Figure 46: Caracteristiques hydrauliques des piézomètres du site à glissement

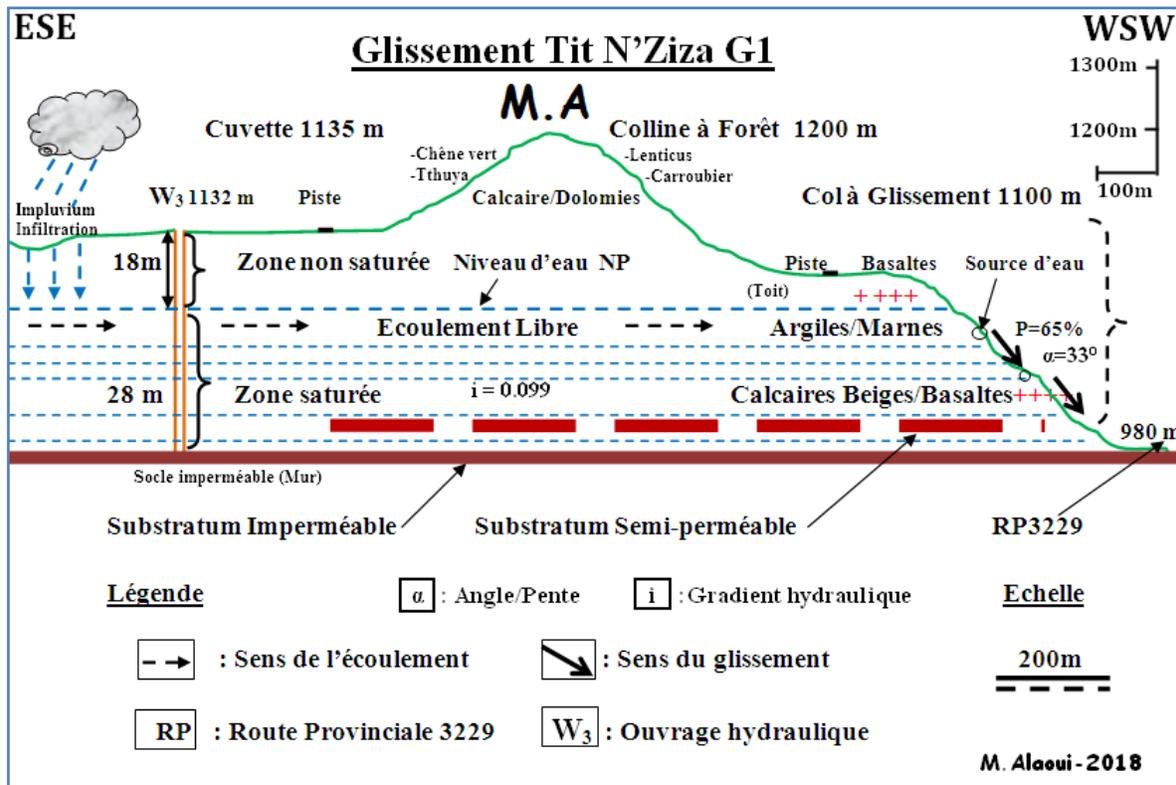


Figure 47: Relation hydrogéologique entre les sondages et le glissement de terrain

L'écoulement souterrain est contrôlé par un gradient hydraulique « i » entre la cuvette et la zone à glissements. A cet égard, l'arrivée des eaux au niveau du talus est l'une des problématiques qui gêne la stabilité des terres et pousse le géotechnicien à penser aux solutions adéquates pour un bon confortement de l'aléa. Fig46 et Fig47.

2.1. EFFETS DES PRÉCIPITATIONS SUR LES TALUS Á RISQUE DU GLISSEMENT TIT N'ZIZA DIR EL KSIBA G1

La région d'El Ksiba jouit d'un climat méditerranéen influencé par les nuées atlantiques, avec des étés chauds et secs, et des hivers humides et froids, avec souvent, des chutes de neige entre Novembre et Avril, allant de 5 cm en piedmonts à 60 cm aux sommets (26 cm Janvier 2017), ce qui influence sur les températures moyennes, ainsi que sur l'apport des eaux infiltrées qui enrichissent l'aquifère au niveau des marnes et des argiles du site à risque. La station d'El Ksiba a pour coordonnées géographiques: [N32°,43'00"], [W006°,01'00"] et l'altitude Z: 1080 m, même que celui du col à risque. Fig48.



Figure 48: Station météorologique d'El Ksiba et site à glissement à 1080m d'altitude

Lorsqu'il pleut, l'eau circule de différentes manières, sur ou à travers le sol par ruissellement en surface, écoulement hypodermique sur un substrat géologique imperméable, écoulement par réseaux de drainage, ou encore infiltration vers les eaux souterraines. Fig49.

L'augmentation de la teneur en eau d'un terrain est généralement étroitement liée aux conditions météorologiques : on la doit le plus souvent à des infiltrations ou des remontées de nappes phréatiques consécutives à des précipitations importantes (intenses et/ou prolongées), auxquelles peuvent venir s'ajouter la fonte des neiges.

Les saisons jouent sur le mode de circulation de l'eau, les eaux de pluies rejoignent les nappes souterraines par infiltration. (Benoit REAL-2012).

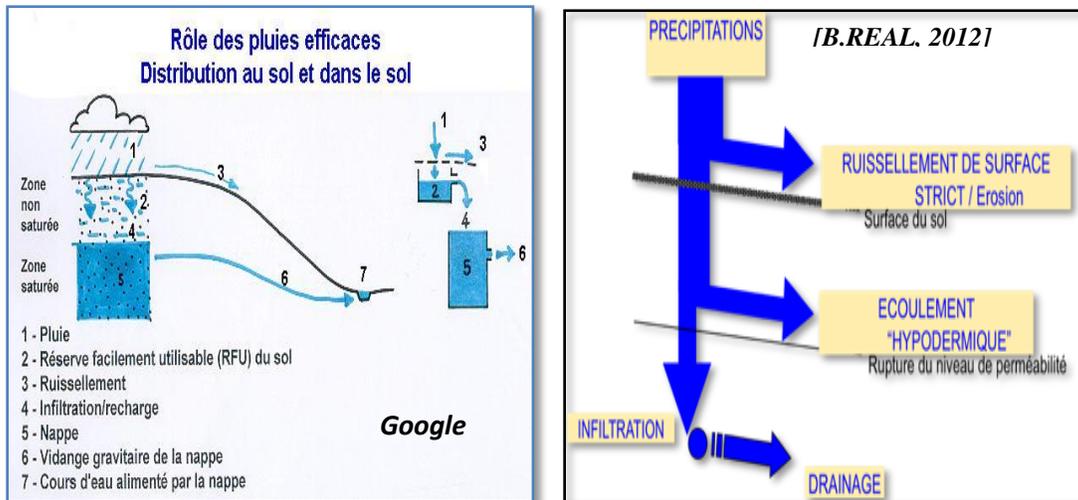


Figure 49: Modèle de repartition des eaux de pluies dans les sols

Les saisons influencent sur le mode de circulation de l'eau. En automne/hiver, des ruissellements de surface sur les limons battants ou des écoulements hypodermiques quand il y a des ruptures de perméabilité dans les horizons de surface peuvent être observés.

Lorsque la Réserve Utile [RU](Poirée, Ollier, 1962) du sol est pleine, se constituent des écoulements par réseaux de drainage dans les sols hydromorphes ou du ruissellement par saturation quand ces sols ne sont pas équipés de réseaux de drainage dans les sols non hydromorphes à infiltration rapide, (Real, 2013).

D'après ces deux graphes ci-dessous, le mois d'Août est le plus chaud de l'année avec [39.6°C], quant à Janvier [10.6°C], il reste le mois le plus froid, avec des températures, parfois, au dessous de zéro. Le cumul annuel a dépassé les 1000 mm ce qui a, probablement, déclenché l'aléa après 2003. Fig50.

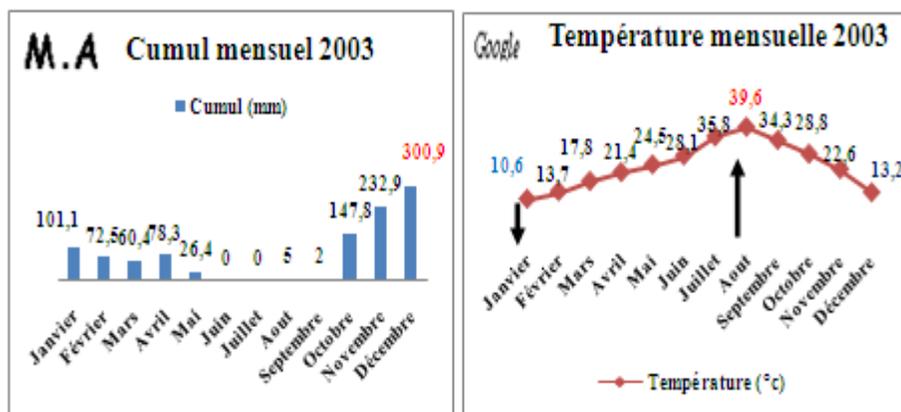


Figure 50: Relation entre la température et la pluviométrie [2003]

Année/Mois	Jan.	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil.	Aou	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
M. A												
2003	101.1	72.5	60.4	78.3	26.4	00.0	00.0	00.0	02.0	147.8	232.9	300.9
2004	02.8	126.9	81.1	73.8	189.9	19.3	00.0	00.0	00.0	104	89.0	108.5
2005	08.5	119.7	71.7	00.0	00.0	00.0	00.0	00.0	00.0	59.0	103.0	49.9
2006	242.3	194.2	57.0	33.0	41.0	12.0	00.0	00.0	00.0	27.0	31.0	16.0
2007	10.5	46.2	24.0	108.1	18.5	00.0	02.2	01.5	00.0	73.0	84.0	38.0
2008	81.0	41.5	21.5	45.5	42.7	00.0	00.0	00.0	36.0	109.0	224.5	218.5
2009	157.0	205	129.5	06.0	16.0	00.0	00.0	00.0	66.5	11.0	31.5	<u>278.0</u>
2010	247.5	<u>342.0</u>	142.5	77.5	44.0	24.5	00.0	00.0	00.0	157.5	162.5	124.0
2011	56.0	99.0	13.0	91.0	181.0	29.5	00.0	00.0	00.0	86.0	<u>384.0</u>	14.0
2012	58.0	29.0	11.0	165.5	03.5	00.0	00.0	00.0	21.5	<u>312.4</u>	256.0	17.0
2013	98.0	62.5	218.5	77.5	36.5	00.0	00.0	00.0	45.5	03.5	75.0	33.0
2014	178.0	72.0	46.0	67.5	03.0	03.0	00.0	00.0	04.0	05.5	267.5	113.0
2015	106.0	52.7	137.0	02.0	53.5	14.0	14.0	28.0	05.5	62.5	09.5	00.0
2016	27,5	108	104	53.5	53.0	06.0	13.0	14.0	00.0	94.0	148.5	107
2017	60.0	210.0	28.0	49.5	14.5	03.0	01.0	16.5	00.0	09.0	80.0	35.2
2018	142,3	84,6	232,7	149,1	50,6	00,0	00,0	19,0	49,0	225,6	139,4	10,5

Tableau 4: Répartition des précipitations des 16 ans passés (Météorologie d'El Ksiba)

L'année 2005 présente une période sèche un peu long qui a duré presque sept mois, avec un cumul annuel de 411.5 mm, soit une moyenne mensuelle de 34.3mm. Alors que 2010 reste l'année la plus pluvieuse pendant les quinze années écoulées avec un cumul de 1321.5 mm, soit une moyenne mensuelle de 110.13mm.

Le mois qui représente le grand cumul avec 342 mm était le mois de février 2010, ce qui a augmenté les flux des nappes phréatiques sans oublier son impact direct en inondations issues des bassins versants de la région du Dir El Ksiba. Pendant l'année 2017 les précipitations étaient bien réparties durant toute la période et la saison sèche est presque quasi-absente.

L'année 2015 est l'unique année qui a vécu le mois de décembre sec ou sans pluies (00 mm), avec une saison agricole un peu tardive, et un climat sec et froid. L'année 2003 présentait des précipitations bien réparties dans le temps, sa période sèche [mi-octobre] était limitée par deux mois pluvieux [26.4 mm -147.8 mm].

Quant à 2016 reste l'année qui a enregistré le cumul le plus faible (316.8mm) durant ces 16 ans, à titre d'exemple les puits et sondages de la région ont connu des baisses du niveau d'eau jusqu'à 25 m (10 tiges). Tableau 4.

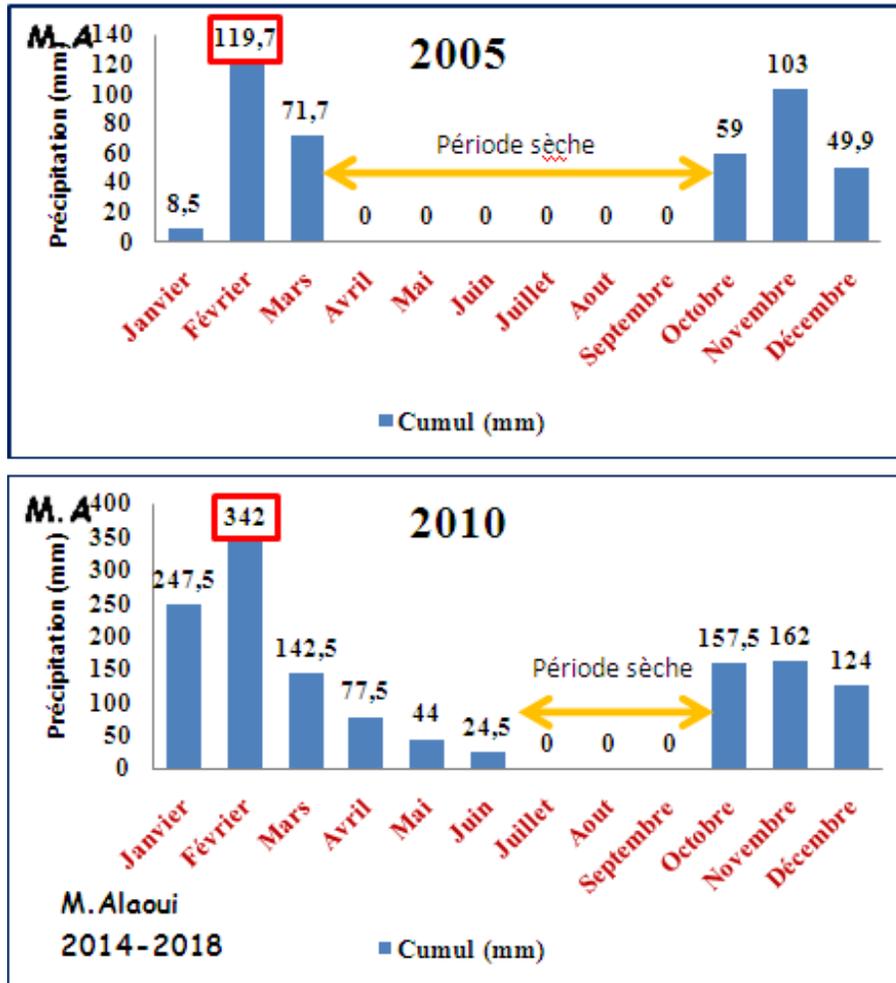


Figure 51: Diagrammes des précipitations à régimes différents 2005-2010

La période sèche est remarquable, elle a duré, presque, 7 mois, durant l'année 2005, ce qui a développé un système des fentes de tension ou de dessiccation, tant dis que l'année 2010 était la plus pluvieuse durant ces 16 ans passés, où la période sèche n'a pas dépassé 3 mois. Les années pluvieuses ont eu un impact sur la dynamique des mouvements de terrains sur tout le Royaume, notamment, les deux sites à risques.

Le mois le plus pluvieux était Février de l'année 2010 avec les 342 mm la région a connu des inondations mortelles, comme celle de la vallée des *Ait Chkounda* et *Ait Hamou Abdeslam*. Commune Territoriale Dir El Ksiba.

Les pluies de 2010 ont affecté des structures de faiblesse telles les failles et cassures ce qui a engendré des forts ruissellements au niveau des lignes des partages des eaux et les vallées, pour être drainées vers le cœur de la pente à glissements de terrain.

3.1. ÉTUDE PLUVIOMÉTRIQUE DU GLISSMENT G1

La station d'El Ksiba montre que durant la période [2003-2018] les précipitations mensuelles moyennes oscillent entre 30 mm et 120 mm, et la moyenne annuelle varie entre 300 mm et 1400 mm, mais avec une importante irrégularité interannuelle et saisonnière.

La saison fraîche reçoit la majorité des précipitations, sans oublier les averses pendant la fin du printemps et la fin de l'été de chaque année (à titre d'exemple : la pluie du 23 Juin 2014 avec une chute de la température). La saison sèche, qui s'étend de la mi-mai jusqu'à la mi-octobre, favorise la décohésion et la fissuration des sols marno-argileux. Fig52.

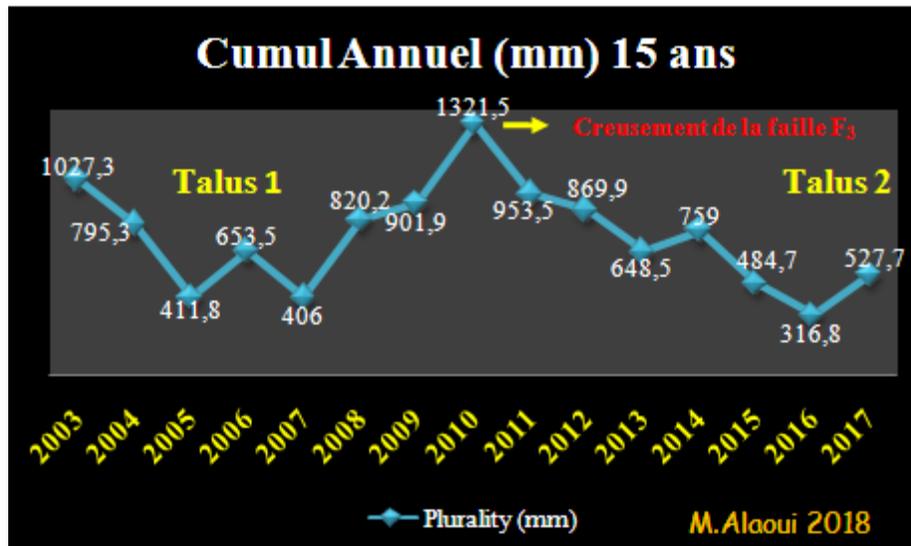


Figure 52: Précipitations annuelles moyennes avec emplacement des deux talus

D'après des hommes âgés de la région, le versant était vulnérable à tout éventuel risque d'instabilité gravitaires, vu sa nature géologique et sa localisation au niveau de la grande pente de la ligne des partages des eaux de pluies à 1080 m d'altitude.

En plus des facteurs directs, les précipitations restent le facteur déclenchant au niveau de ces talus, la dégradation de la flore favorise son instabilité. Le cumul de 2003 avait déclenché, certainement, le glissement du talus 1 (M1-M2), les crues de 2014 ont favori un déplacement des matériaux vers le bas au niveau du talus 2 (M3-M4). Les structures de faiblesse ont facilité le drainage des eaux de pluies telles les failles et les fissurations.

D'après le graphe ci-dessous, on note une symétrie bilatérale entre la période sèche et la période humide de 2018, avec un cumul de 120 mm entre Mai et Septembre soit une moyenne de 24 mm/mois. Fig53.

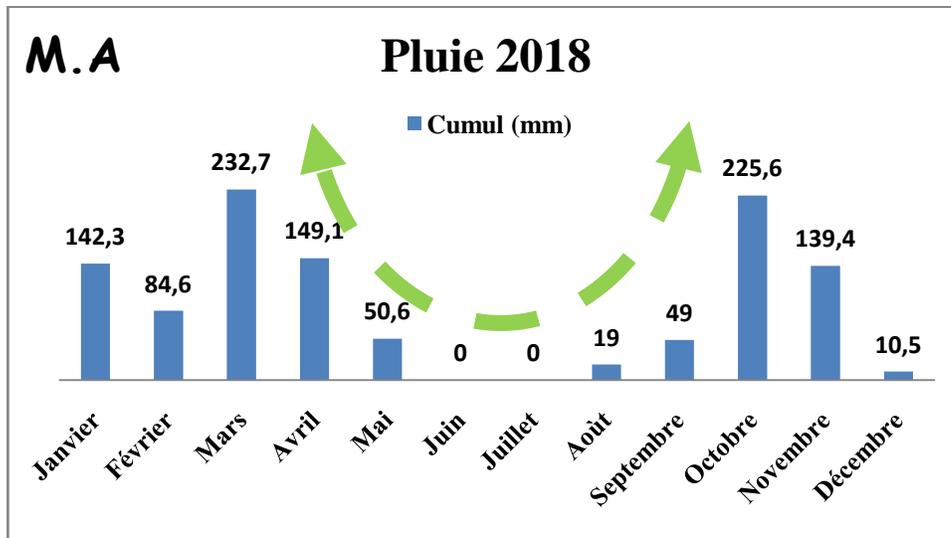


Figure 53: Précipitations et cumul mensuel de l'an 2018

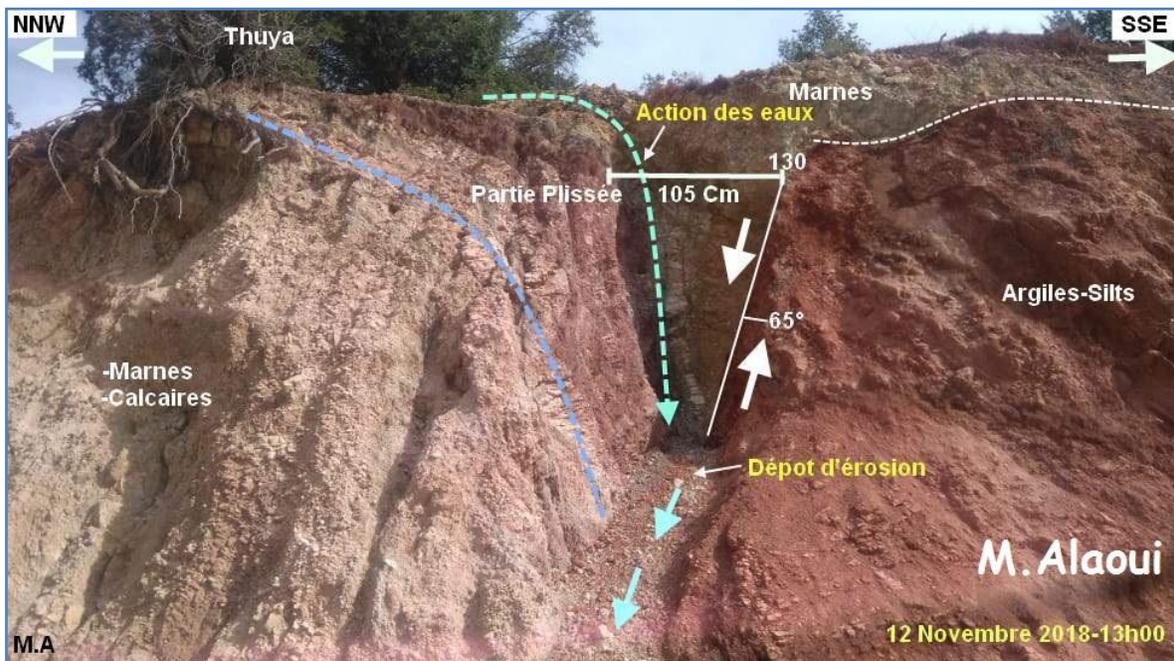


Figure 54: Impact net des pluies 2018 sur les structures de faiblesse au sein du Talus G1

Durant l'année 2018, la moyenne mensuelle pluviométriques a dépassé 90mm, ce qui a nettement enfoncé le creux de la faille de 45 cm jusqu'à 65 cm de profondeur. La largeur de la faille a dépassé 100 cm. Les 1103 mm précipitées ont favori un déplacement de la

coulée boueuse, avec aussi une augmentation des débits au niveau des sources par fluctuation des nappes sises en amont de la partie d'étude. Fig.54.

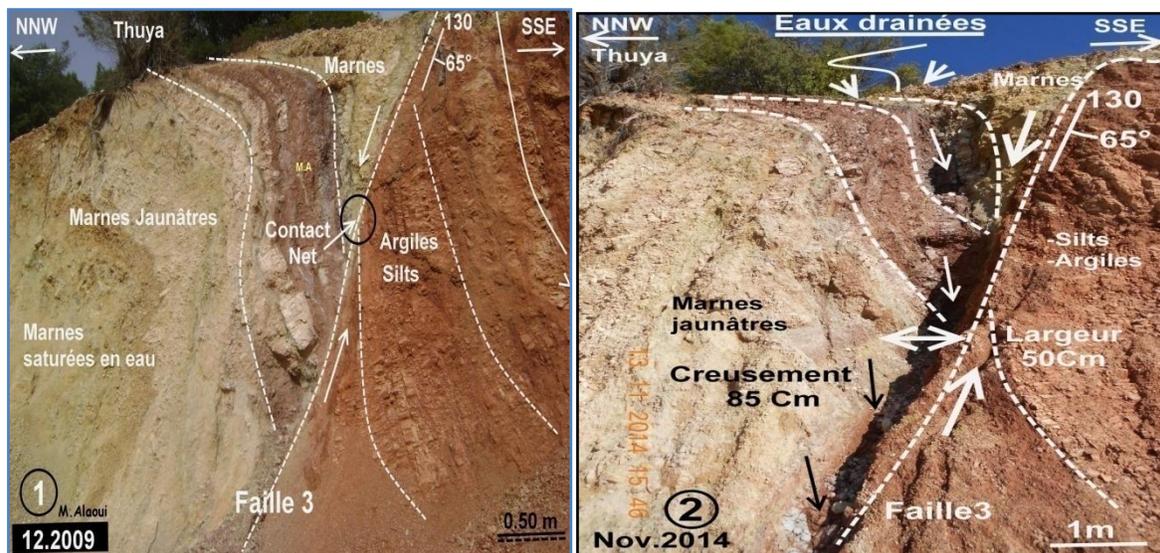


Figure 55: Impact net des pluies sur les structures de faiblesse au sein du talus G1 [2009-2014]

En Mars 2009 la faille ductile était intacte [Phot 1], en Novembre 2014, le cumul des 6256 mm ont été suffisantes pour creuser 85cm de profondeur durant cinq années par l'altération mécanique de l'eau [Photo 2]. Les nappes souterraines, et plus exactement leurs fluctuations liées aux conditions pluviométriques ou parfois aux actions humaines, sont très souvent à l'origine de déclenchements des mouvements de versants : glissements, éboulements, coulées boueuses ou laves torrentielles et chute de bloc. Fig55 et Fig56.



Figure 56: Piézométrie à l'amont et à l'aval du glissement en période sèche

De point de vue hydrogéologie, une série de mesures piézométriques a été effectuée afin de connaître le niveau de l'aquifère en amont du site, notamment, de savoir l'origine

des eaux sises aux pieds des talus en période sèche comprise entre Mai et Octobre. On a déduit le niveau piézométrique, par une série de mesures dans le temps. Fig57.

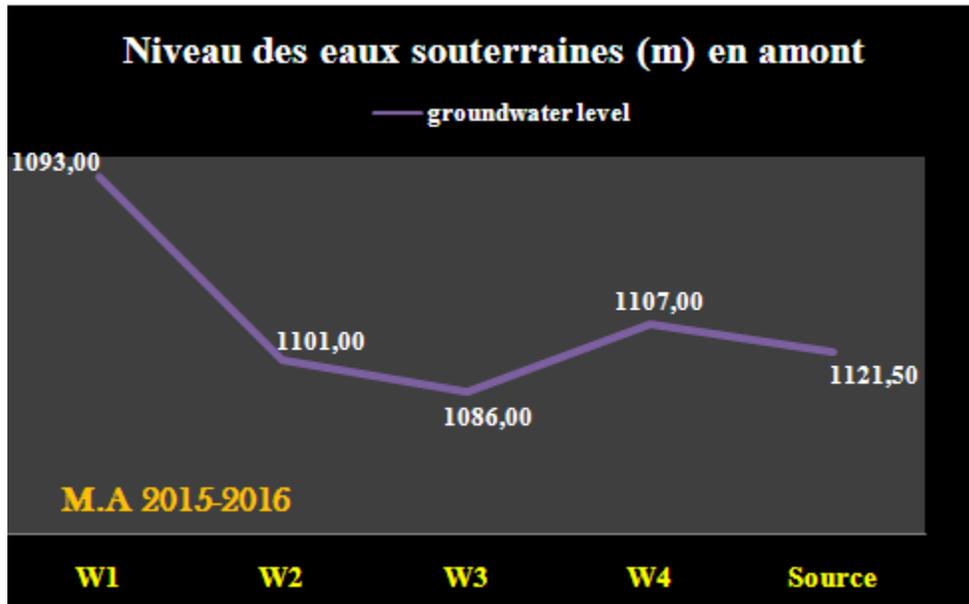


Figure 57: Niveau des eaux souterraines entre Juin 2016 et Juillet 2015

D'après la loi de Darcy, les écoulements souterrains sont contrôlés par le gradient hydraulique de chaque milieu poreux. Au niveau du sondage [W3] le niveau des eaux [NP] à la base de l'aquifère est d'environ 1086 m d'après la formule suivante :

$$NP = \text{Altitude} - \text{Profondeur}_w \quad (3) \quad [\text{Nivea d'eau}] \quad \text{et} \quad Q = [i] \cdot K \cdot A \quad [\text{Loi de Darcy}]$$

Les arrivées des eaux au niveau du glissement est favori par un gradient hydraulique important [i], en présence d'un substratum poreux. La différence entre 1086 et 986 m est important, ce qui fait augmenter le drainage par le coefficient de perméabilité K.

4.1. HYDROGÉOLOGIE DU GLISSEMENT DE TABAROUCHT G2

Cette zone d'étude est caractérisée par un réseau hydrographique d'ordres 1 et 2, entre la crête et les hautes collines, ce qui rend le secteur très vulnérable aux pluies torrentielles, qui aggravent la situation en périodes pluvieuses de chaque année, s'il y a lieu.

La commune territoriale de Tabaroucht ne possède pas une station météorologique à 1400 m d'altitude, donc les données pluviométriques ne sont pas incluses dans les mesures, car les seules stations proches, celle de Ouauizerht à 800 m d'altitude, et celle de Zaouïa

Ahensal à plus de 1600 m, ce qui fait les données ne seront plus compatibles à l'altitude de la partie étudiée.

Le système aquifère est situé au niveau des marnes grisâtres à la base de la partie en péril actuellement. La nappe, certainement, avait affleuré pendant les travaux du passage de la piste, et elle s'est manifestée en source. Les gens des Douars ont collecté son flux par un drainage subhorizontal afin de donner un seul écoulement uniforme et ponctuel. Les mesures ont été effectuées, notamment, au début de Novembre 2014, mi-octobre 2015 et fin Juin 2016. Les débits ont été mesurés et calculés par la formule classique suivante :

$$Q = \text{Volume} / \text{Temps} \text{ (M}^3/\text{J - l/s)} \quad (4)$$

Date de mesure	Débit mesuré Q (m³/24h-l/s)
M.A	
Novembre 2014	36 -0.416
Octobre 2015	40 -0.462
Juin 2016	38 -0.430

Tableau 5: Débits de la nappe entre 2014 et 2016 Tabaroucht

La moyenne annuelle des débits mesurés durant 3 années est de 38 M³/J, elle varie selon la pluviométrie régionale. L'existence d'un substratum marno-calcaire a favorisé un écoulement souterrain libre.

Lors des travaux de la piste (actuellement goudronnée) l'affleurement de l'aquifère était important ce qui a entraîné un risque de mouvement de masses. Durant la période de l'aménagement, la conception des murs de soutènement en qualité de gabions s'avérait indispensable pour freiner et stopper l'aléa pendant l'année 2014.

La présence des eaux au niveau des marnes grisâtres aggrave la situation du talus, le drainage ponctuel d'une telle source reste insuffisant pour stabiliser ou ralentir le déplacement des masses de terre en aval. Les pluies et les chutes de neige entre Décembre 2014 et Octobre 2015 ont augmenté probablement le flux de la nappe. Tableau 5 et Fig58.

Les failles et les cassures qu'a vécues la région durant le tertiaire, sans oublier la tectonique, ont engendré l'affleurement de l'aquifère liasique, ce qui a mis en exécutoire

les sources à grands débits dans, les gradins Nord de l'Atlas Béni Mellal-Khenifra selon une direction globale NE-SW depuis les sources de Bzou jusqu'aux celles de l'Oum Rbia.

La végétation aide surtout à prévenir les glissements de terrain superficiels, soit ceux d'une profondeur d'un à deux mètres. Les glissements plus profonds sur les pentes très abruptes, eux, sont moins influencés par le couvert végétal. (D.D.E.F.P. Québec).

L'écoulement de la nappe sise à la base du glissement G2 a connu une augmentation du débit, ce qui nous a empêchés d'estimer la valeur du jet en avril 2018. Fig.59.

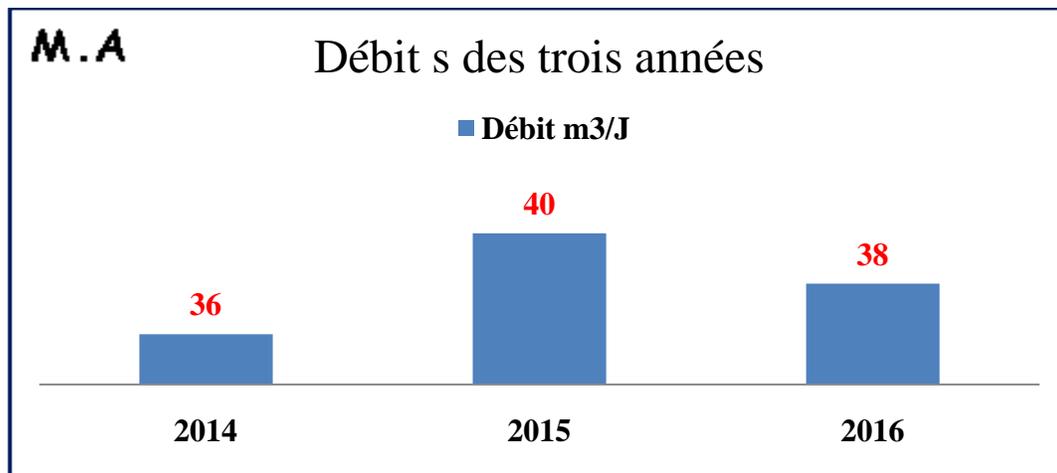


Figure 58: Débits de la nappe au niveau de la source entre 2014 et 2016

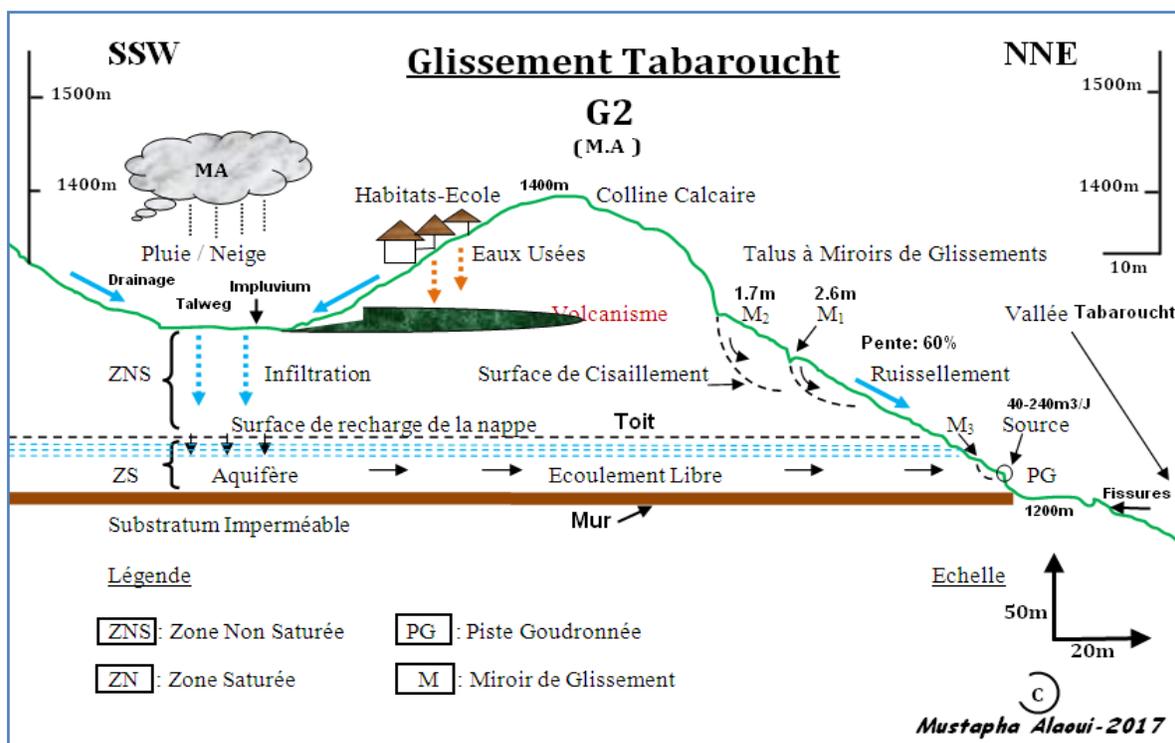


Figure 19: Profil schématique simplifié de la zone à glissement de terrain G2

CHAPITRE V

RÉSULTATS D'ÉTUDE GÉOLOGIQUE, GÉOTECHNIQUE, MINÉRALOGIQUE

1. ÉTUDE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE DU GLISSEMENT DE TIT N'ZIZA DIR EL KSIBA G1

1.1. CALCUL DE PENTE

En mathématiques, l'arctangente d'un nombre réel est la valeur d'un angle orienté dont la tangente vaut ce nombre. L'*arc tangente* d'un nombre x est l'angle y (exprimé en radians) de l'intervalle $]-\pi/2, +\pi/2[$ dont la tangente est x . Où il est question de pentes. On a l'équation mathématique suivante:

$$\forall x \in \mathbb{R} y = \text{Arctan}(x) \iff x = \tan y \text{ avec } y \in]-\pi/2, +\pi/2[$$

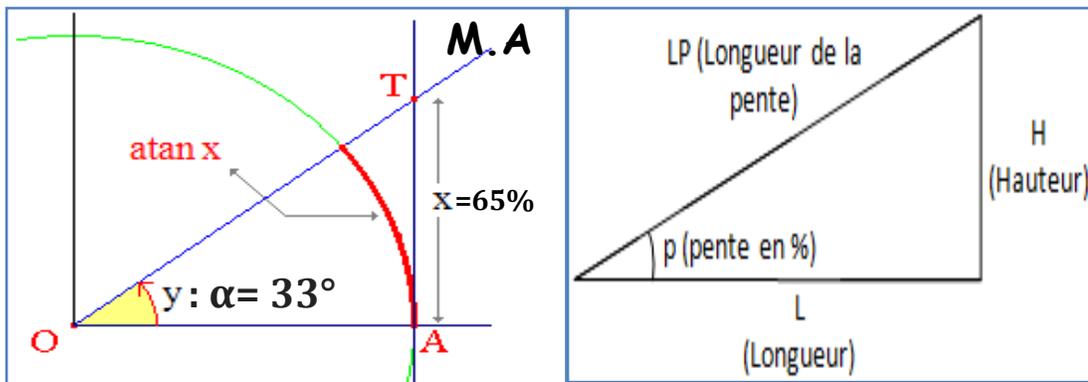


Figure 60: Modèle géométrique du calcul de la pente et de l'angle correspondant

Pour calculer la longueur de la pente, cela revient à calculer la longueur de l'hypoténuse du présent triangle en utilisant le théorème de PYTHAGORE.

$$(5) \text{ Longueur de la pente (LP)} = \sqrt{(L^2 + H^2)}$$

Remarque :

Dans notre cas de calcul, l'angle $[y]$ ou $[\alpha]$ doit appartenir à l'intervalle $]0, +\pi/2[$, car on travaille toujours dans des versants naturels à pentes naturelles et de valeurs positives. Fig60 et Fig61.

On va appliquer la formule classique suivante de calcul de pente : $[\tan \alpha = h/d]$ avec $[h]$: la différence d'altitude et $[d]$: la distance entre Oued et la crête du talus.

Alors on a la valeur de $[h] = 1240 - 980 = 260$ m et $[d] = 400$ m, déduite de l'échelle de la carte topographique, donc $\tan \alpha = 260/400 = 65\%$ ou $\tan [y] = 0.65$. Le pendage moyen de la ligne de grande pente mesuré par une boussole sur terrain varie entre 45° et 55° orienté vers le Nord-ouest. Fig61.

Or, la pente $[x]=65\%$ ou bien $[x]=0.65$, pour déduire la valeur de $[y]$ qui est l'angle de la pente calculée on applique l'équation précédente : $\text{Arctan } 0.65 = \tan^{-1} 0.65 = 33^{\circ} 1' 25.923''$, donc la valeur de $[y]=33^{\circ}$ (l'angle $\alpha= 33^{\circ} / \alpha= 57$ radian) [Arctan Calculator].

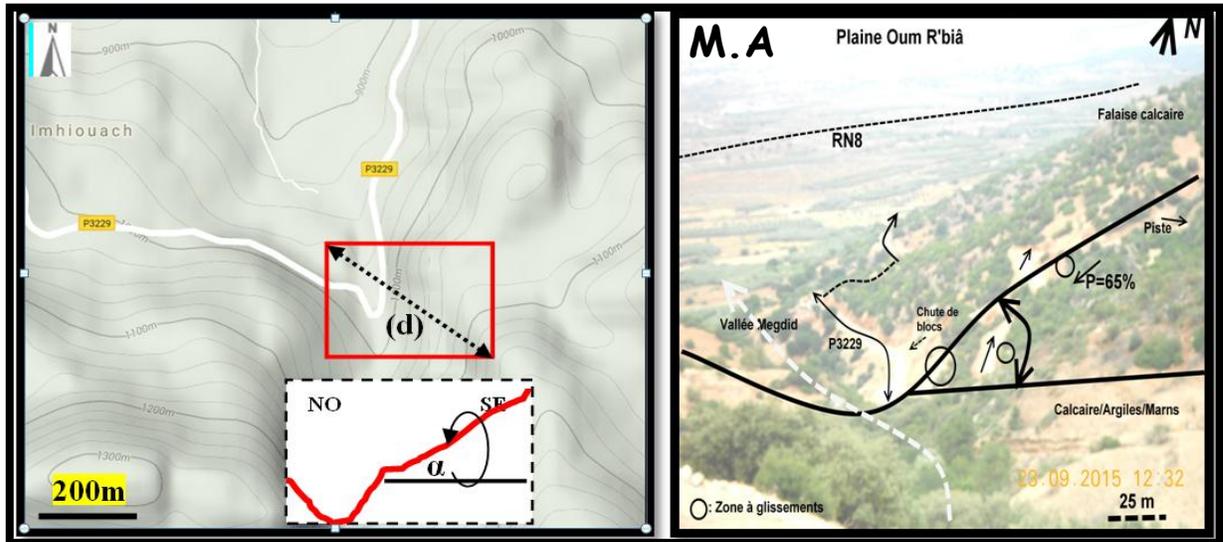


Figure 61: Profil topographique et géomorphologique du site à risques

On peut déduire la longueur de la pente du talus de la zone d'étude par la loi de Pythagore suivante:

$$(LP) = \sqrt{(L^2 + H^2)}$$

Application Numérique $L= 400$ m et $H=260$ m, donc la Longueur de la Pente estimée:

$$[LP = \sqrt{[400.400] + [260.260]} = 477\text{m}] \Leftrightarrow LP = 477 \text{ m}$$

2.1.SEDIMENTOLOGIE-LITHOLOGIE DU SITE

Le site est caractérisé par l'abondance des formations marnocalcaires, des argiles et des silts friables avec des affleurements des basaltes altérés fini triasiques ou plutôt Permotriasique (Benzaquen 1963). Les basaltes sont localisés à l'amont du talus et à sa base, soit disant, ils forment le toit et le mur des couches à glissement de terrain. Fig62.

Une comparaison au fil du temps de certaines structures géologiques tels les failles, nous donnera une idée sur les accidents dus aux changements climatiques dans l'espace et dans le temps. La collecte des données structurales locales afin de connaître le régime tectonique régional, d'après ces données, on peut déduire la contrainte régionale ou locale

et son orientation globale, ce qui fait-on doit penser à la néotectonique qui a affecté le flan Nord de l'Atlas Béni Mellal et la zone de transition entre le Haut et Moyen Atlas.

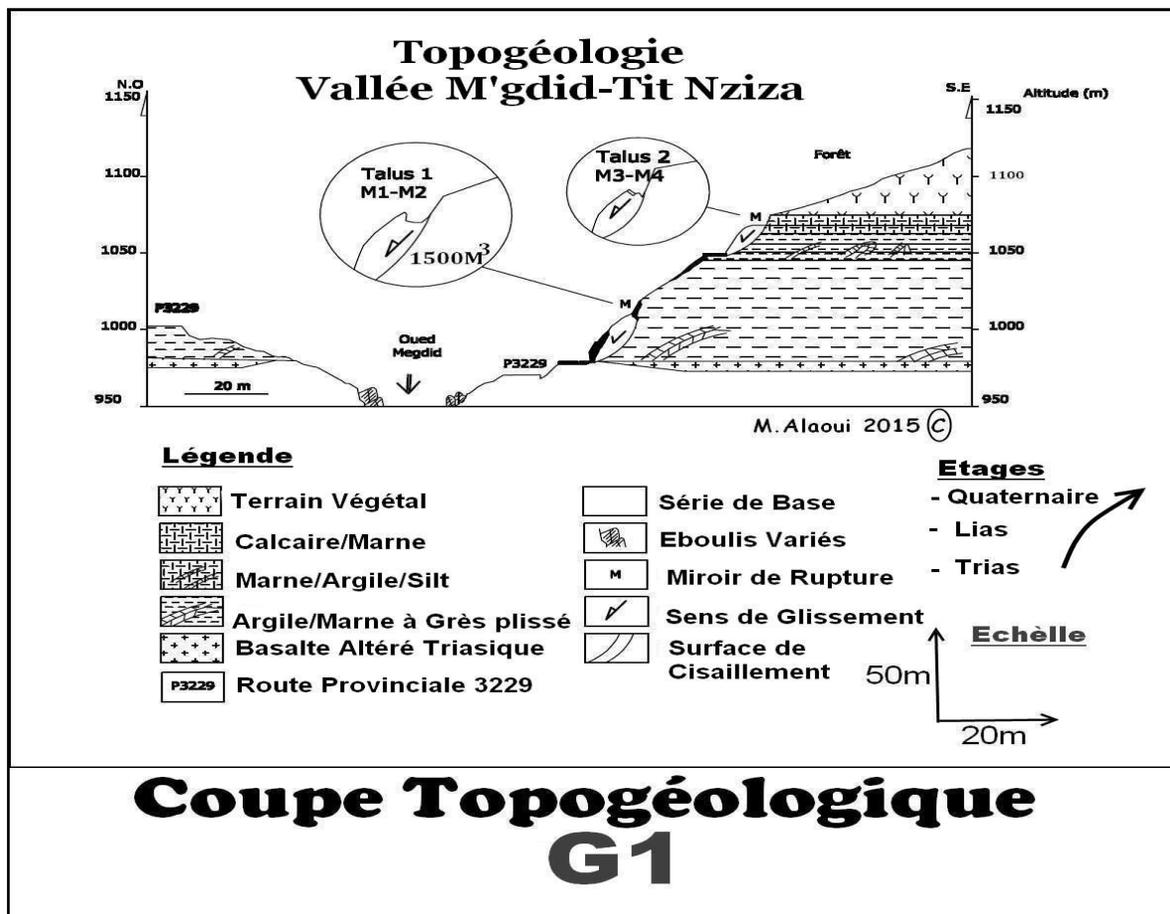


Figure 62: Coupe topogéologique de la vallée à glissements G1

3.1.MAGNITUDE SISMIQUE

Des chercheurs de l'Institut de Recherches et de Développement (IRD) et de l'Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) Péruvien viennent d'apporter les premières observations d'un mouvement de terrain réactivé par un séisme, survenu en Juillet 2013 dans le Sud du Pérou.

Les mesures du GPS montrent que la réponse du sol est à la fois concomitante à la secousse, avec un déplacement simultané de 2 cm, mais également post-sismique.

Le glissement s'est en effet prolongé durant cinq semaines, au cours desquelles l'amplitude du déplacement de terrain a triplé, atteignant 6 cm. Cette étude a été publiée dans la revue « Geophysical Research Letters ». Le glissement de **MACA**, dont les effets perdurent, couvre une surface de 1 Km². Il affecte un village de 900 habitants, situé dans la

vallée de la Colca à 70 Km au Nord d'Arequipa. Il provoque également l'affaissement d'une route touristique (160000 visiteurs par an) et menace des terrasses pré-Inca.

Du fait de la forte sensibilité de cette zone aux séismes, le phénomène est suivi par un GPS depuis 2011, dans le cadre de la collaboration entre **IRD** et **INGEMMET**. Les pluies concentrées de décembre à avril sont un autre facteur du glissement. Celui-ci a conduit le gouvernement régional d'Arequipa à demander la rélocalisation des habitants de **MACA** en Mai 2013. (Lacroix, Hugo, Edu, Bertrand2013).

Le Maroc est situé à l'extrémité nord-occidentale de l'Afrique, là où la plaque africaine rentre en collision avec la plaque européenne dont le taux de rapprochement est d'environ 0,4cm/an au niveau du détroit de Gibraltar.

Cette position particulière du Maroc se traduit actuellement par une sismicité relativement importante qui reflète la poursuite de la convergence entre ces deux plaques lithosphériques. La limite entre celles-ci est soulignée par l'alignement des épicentres entre les Açores et le détroit de Gibraltar.

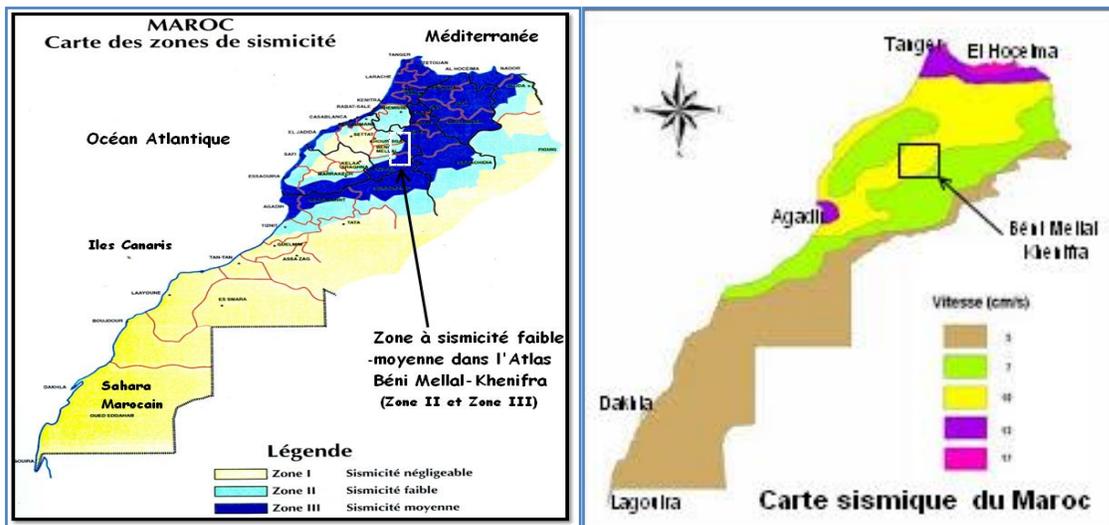


Figure 63: Carte nationale de sismicité générale [Cherkaoui, 2008]

Au niveau du domaine atlasique la où l'activité sismique est principalement localisée dans le Moyen Atlas et le Haut Atlas central. Cette sismicité est due en grande partie à la présence d'un réseau complexe de failles tectoniquement actif. Cherkaoui, 2008.

Le Maroc est subdivisé en trois zones sismiques, les zones nordiques sont les plus touchées et occupent une surface importante, vu leur situation vis-à-vis la faille du Bloc des Shoul et la zone de subduction Europe-Afrique. Fig63.

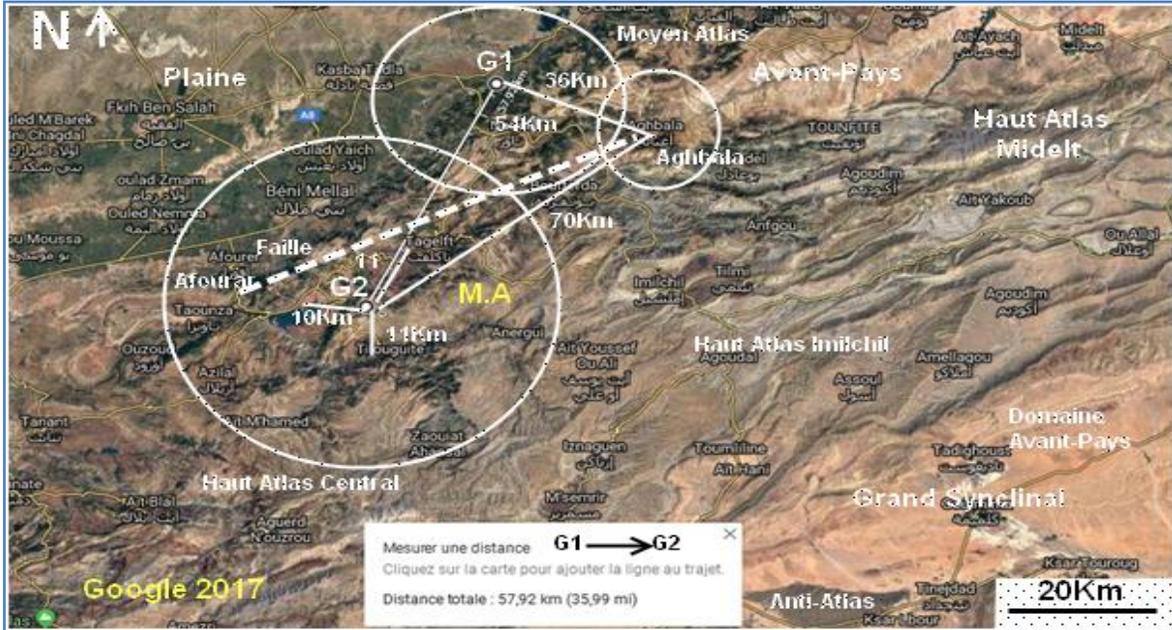


Figure 64: Environnement sismique et distance par à rapport aux lieux de secousse

Lieu de l'épicentre	Magnitude	Date de l'événement	Distance de G1(Km)	Distance de G2 (Km)
Ouaouizerht	3.8	Octobre 2003	54	10
El Ksiba	4.2	31 Mai 2013	4.5	53
Ouaouizerht	3.6	14 Mai 2014	54	10
Aghbala	3.6	Février 2015	36	70
M.A				
Aghbala	4.3	28 Avril 2015	36	70
Tagleft	4.4	12 Mai 2015	37	11
Tilouguit	3.7	27 Février 2017	65.32	10.80

Tableau 6: Valeurs sismiques enregistrées des deux glissements [Menara.Ma-Maghress-Med1 TV]

Les zones entourant le Haut Atlas et le Moyen, sont aussi exposées aux magnitudes moyennes suite à leur contact avec des failles actives telles l'accident atlasique, la faille de Tazzaka et la faille Aghbala-Afourar, qui sont en activité tectonique actuellement. Fig64.

Les cotes atlantiques de Tanger à Agadir sont contrôlées par les failles transformantes du fond de l'océan atlantique, Les séismes d'Agadir le 29/02/1960 et celui d'El Hoceima du 24/02/2004 restent les plus meurtriers au Maroc [Cherkaoui, 2008]. Ces

séismes ont, certainement, aggravé la situation des fissurations préexistantes [Lacroix, 2013] et les ont évoluées en zones de glissements de terrain au niveau des périmètres touchés par ces degrés de magnitude.

Les cas du Jebha dans le Rif Interne, et du Couloir Triasique d'Argana dans le Haut Atlas Occidental.

L'Atlas Béni Mellal-Khenifra appartient aux zones où la sismicité oscille entre des valeurs faibles à moyennes enregistrées à l'échelle nationale, donc le facteur séisme joue un rôle précurseur mais reste toujours indirect.

On a mesuré les distances approximatives à vol d'oiseau par une application sur Google Map, afin de donner le champ approximatif d'action des ondes sismiques qui agit sur les mouvements de masse. Tableau 6 et Fig64.

Les secousses sismiques ont un impact indirect sur l'instabilité des versants par rupture et déplacement ou par aggravation des fissures déjà existées. Fig65.

Une secousse de magnitude 4,2 a été enregistrée le 31 Mai 2013 vers 08h45m à 4, 5 km au Sud-ouest du glissement, ce qui avait exacerbé probablement le mouvement du talus.

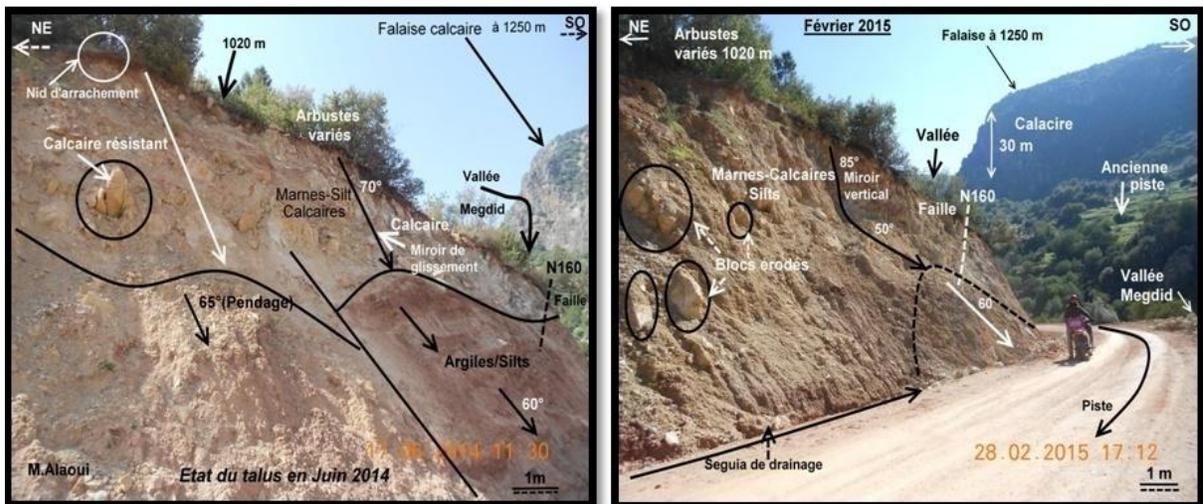


Figure 65: Évolution du miroir M3 suite aux différents facteurs d'instabilité G1

La première photo montre l'état du talus pendant l'été 2014 du 17/06/2014 était stable, quant la deuxième du 28/02/2015, après plus de 8 mois le déplacement des matériaux calco-marneux était net. Fig65.

Durant des inondations de Novembre 2014 les 267,5 mm ont pu augmenter l'ampleur de l'aléa, ce qui a influencé sa cinétique. Fig.66.



Figure 66: Comportement du talus selon la période ensoleillée et pluvieuse de chaque année



Figure 67: Failles affectant le site à calcaire marneux et argiles-silts

Les failles qui ont affecté le complexe marno-calcaire et argilo-silteux ont créé des zones de drainage des eaux par action mécanique pendant les crues. Le régime tectonique est contrôlé par un réseau de failles comprises entre N_{110} et N_{160} dextre et senestre, on peut parler du modèle de **RIEDEL** avec F_2 senestre et F_3 dextre.

Les caractéristiques des structures rencontrées sur terrain peuvent nous servir dans la recherche de la tectonique régionale de cette zone. Fig67.

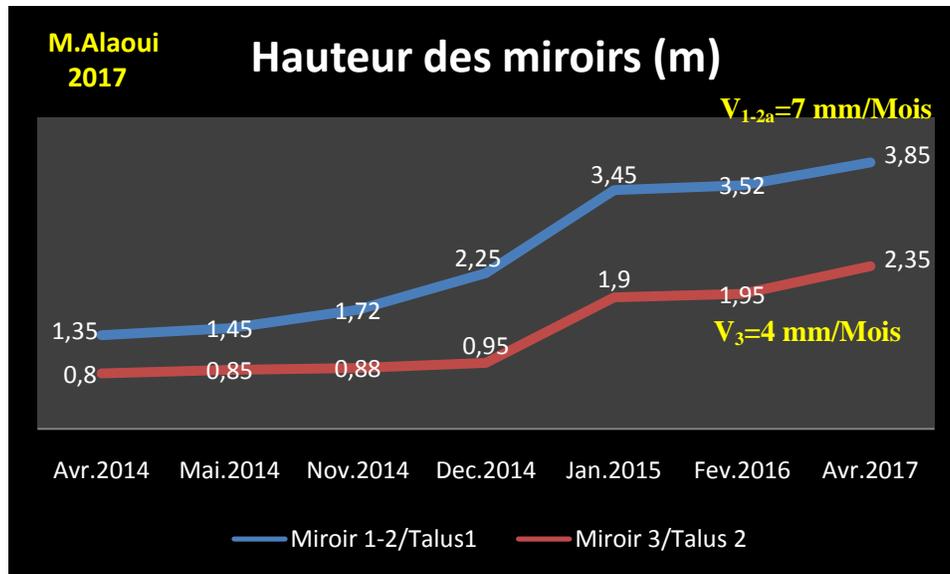


Figure 68 : Cinétique relative des miroirs des deux talus selon les conditions d'instabilité [2014-2017]

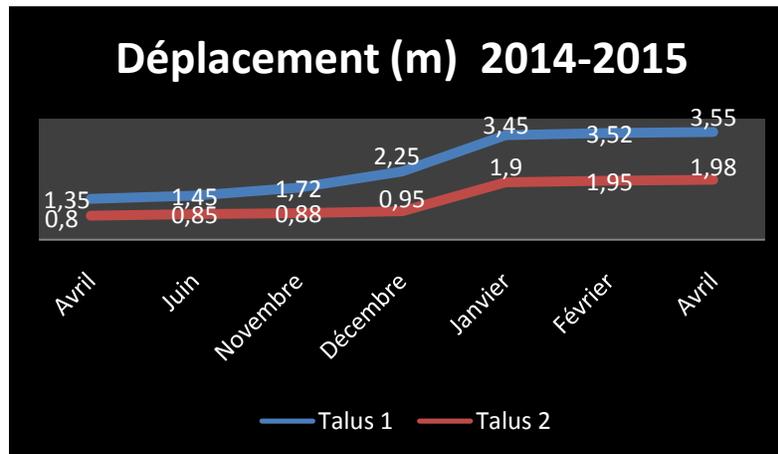


Figure 69: Cinétique relative au déplacement des deux talus [2014-2015]

Un suivi des mesures des miroirs durant la période d'étude, nous a montré qu'après les inondations de novembre-décembre 2014, le déplacement était remarquable et brutal notamment au niveau du miroir M3 en talus 2.

Les miroirs M1 et M2 ont été déclenchés et aggravés après les inondations de 2010 qu'a connus cette région. Fig68 et Fig69.

La vitesse relative des déplacements des talus est comprise entre 7mm/Mois et 14.02 mm/Mois, donc notre glissement est qualifié de lent. (Guide LCPC : Tableau 7).

Très lent	Lent	Moyen	Rapide	Très rapide
1 mm/an	1 mm/mois	1.5 mm/jour	4 mm/h	0.25 m/s
à	à	à	à	à
12 mm/an	50 mm/mois	100 mm/jour	10 m/h	10 m/s

Tableau 7: Échelle cinématique d'un mouvement de terrain (*Guide Pratique LCPC*)

4.1.MÉCANIQUE DU SOL

Deux échantillons ont été prélevés pour déterminer les caractéristiques géotechniques du sol en question. La mécanique du sol s'avère indispensable pour savoir le type de sol qui réagit avec ces conditions climatiques locales.

On se basant sur les limites d'Atterberg surtout l'Indice de Plasticité « IP » et le Bleu de Méthylène « BM » pour déterminer le facteur essentiel du mauvais comportement de ce sol. Tableau N°8.

Essais Géotechnique	D.max (mm)	<2 (mm)	<0.08 (mm)	Limite de Liquidité LL (%)	Limite de Plasticité LP(%)	Indice de Plasticité IP(%)	Los Angeles IA (%)	Bleu de Méthylène BM (%)
Echantillon 1	50	57.5	24.4	38	25	13	22	1.8
Echantillon 2	50	58	24.9	39	27	12	22	1.9
Moyenne 1-2	50	57.75	24.65	38.50	26	[12.50]	22	[1.85]

Tableau 8: Analyses et résultats de la mécanique du Sol [Service Technique]

5.1.ACTION ANTHROPIQUE

Une dégradation remarquable de la forêt suite à une surexploitation de la flore par le surpâturage des habitants et par la fabrication du charbon, avec aussi l'exploitation des carrières en amont des versants de l'Atlas de Dir El Ksiba.

Les travaux de la piste aménagée passant via le col.1, par le balayage des coulées boueuses du talus augmentent, après la saison pluvieuse, ce qui augmente, à chaque fois, le risque du glissement des matériaux et éboulement des flans rocheux. Fig70.

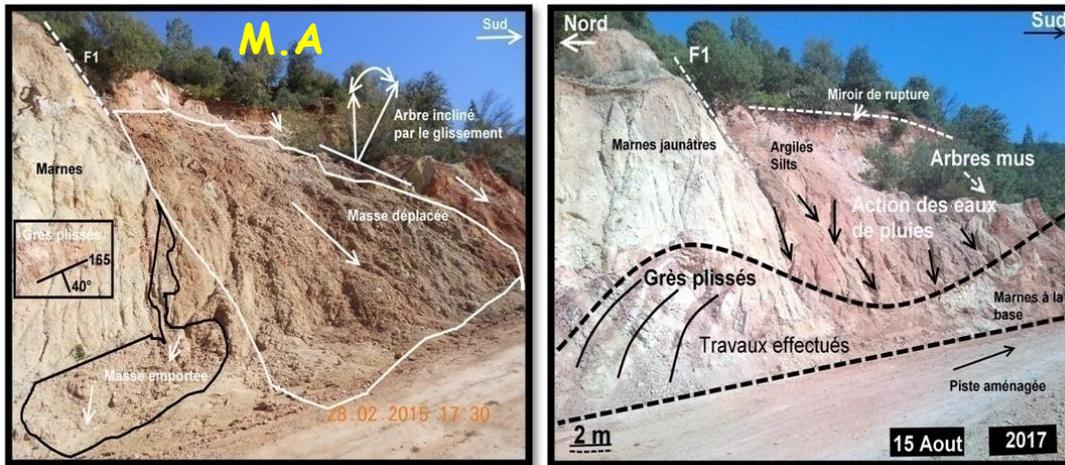


Figure 70: Impact direct des travaux d'aménagement de la Piste sur l'instabilité

6.1. IDENTIFICATION DU RISQUE

La pente est un élément capital dans les mouvements de terrains. La descente moyenne du présent talus 1 est de 65% avec un pendage de 45° à 55° mesuré par la boussole, entre le miroir et le bourrelet de pied, favorise une instabilité des matériaux après rupture de la cohésion [©] des particules surtout après les fortes précipitations. Fig.71.

La nature géologique et le type de sédiments sont deux facteurs déclencheurs capitaux. Dans notre cas les séries marno-silteuses et les basaltes altérés perméables favorisent un mauvais comportement du sol par migration du bourrelet vers la piste amenant quelques arbres à faibles racines.

La coulée boueuse se développe pendant les mois pluvieux suite à un sur poids des particules causé par la teneur en eau qui diminue la force interstitielle [μ].

Les précipitations et leur répartition dans le temps jouent un rôle primordial dans la plupart des mouvements de masse. Les pluies des 16 ans collectées montrent l'impact direct sur la géomorphologie de quelques structures notamment des failles.

Le drainage des eaux de pluies à 1080 m d'altitude convergent vers le cœur du talus par ruissellement en averses et par infiltration des pluies douces [Real, 2012] engendre un mécanisme d'instabilité nette par une évolution des miroirs et une augmentation du volume en mouvement sous forme de coulée boueuse.



Figure 71: Relation entre racines d'arbres et comportement des sols glissants

À 1700 m d'altitude une forêt de chêne vert de bonnes racines qui maintiennent les terres, à 1100 m une forêt à arbustes variés est en instabilité continue suite au mauvais comportement du sol, les arbres inclinés est un indice de mouvement. Fig71.

Les essais de mécanique du sol (Tableau 8), dans ce cas l'indice de plasticité [IP] dépasse 12% donc le sol est plastique. Le bleu de méthylène [BM] est compris entre [1.8 et 1.9] nous renseigne sur l'existence d'une fraction argileuse importante dans ces sédiments. En se basant sur la limite de liquidité WL et la limite de plasticité [WP] pour en déduire le [IP] par la formule suivante :

$$(6) \quad IP = WL - WP \rightarrow IP = 38 - 25 = 13\% \quad [\text{Cas de l'échantillon N}^\circ 1]$$

Limite de plasticité LP=25%, on passe à une limite de liquidité LL=38%, cela veut dire que notre sol est visqueux ce qui augmente le risque de fluage au niveau du talus N°1, bien sûr, l'indice de plasticité IP oscille entre [12% et 13%], soit disant une moyenne de 12.5% donc le matériau ici est de type plastique.

Pour la valeur [MB] comprise entre [1.5 et 2.5], le type de sol de ce terrain est sablo-argileux donc gonflant, ce qui favorise le risque de glissement de terrain G1.

$$[1,5 \leq V_{BS} \leq 2,5] \rightarrow \text{sol est sablo- argileux}$$

La valeur [BM], varie entre [1.8 et 1.9] donc notre sol est limono-argileux, plastique type [Montmorillonite] de formule $[(Na, Ca) 0,3(Al, Mg) Si_4O_{10}(OH)_{2n} H_2O]$ et appartenant au groupe des smectites, de la famille des phyllosilicates. (Il s'agit d'une argile gonflante).

Le facteur sismique, peut aggraver indirectement la situation d'un tel aléa selon la fréquence des magnitudes dans le temps et dans l'espace. Selon la carte nationale de sismicité, cette zone appartient au secteur à faibles magnitudes. De temps en temps des valeurs s'enregistrent comme celle vécue le 31 Mai 2013 à 4.5 Km au Sud-ouest du site.



Figure 72: Situation de la zone du séisme par rapport à la zone d'instabilité G1

L'action de l'Homme est visiblement net, certes les travaux de la piste réalisée par la commune rurale ont fortement mis les talus, où passe le tracé de la piste, en mouvement des matériaux vers le bas. La dégradation de la forêt, surtout par un usage domestique et économique [Charbon et bois] a pu influencer sur la qualité des inter-fleuves et ou les lignes de partage des eaux en favorisant un ruissellement intense ce qui aggrave l'aléa. Le glissement G1 après le séisme de 2013 et avant les inondations de Novembre 2014.

Les 1500 m^3 (7), par estimation, sont mobilisées par un régime géologique caractérisé par une pente globale moyenne de 65%, un pendage mesuré qui dépasse 45° , et un aquifère, même en été, à la base du talus favorisant la décohéssion des matériaux et augmentant la viscosité du bourrelet en pieds.

$$V = L \times l \times h \rightarrow V = 50 \times 20 \times 1.50 \rightarrow V = 1500 \text{ m}^3 \quad (7)$$

Durant les trois années d'expertise dans cette zone, l'état de la piste ne présente et ne présentait plus de fissurations, d'où la surface de rupture est limitée juste le long du glissement à 1.50 m d'épaisseur ou semi-profond [Benouis, 2010], donc on peut qualifier notre glissement du non profond. A cet égard, l'implantation d'un inclinomètre s'avère

inutile pour détecter la profondeur de la déformation et d'en déduire la vitesse absolue du déplacement par un suivi de mesures. Mansouri, Mehdi, Alaoui 2012.

Le présent cas de mouvement du talus N°1 est une coulée boueuse active, surtout, en périodes pluvieuses de l'année. Le système racinaire de la flore existante est incapable de maintenir le sol en stabilité permanente. Le système de drainage effectué par la commune, séguia en béton, en amont est insuffisant pour une collecte efficace des eaux de pluies loin du talus en péril pour éviter tout retour des eaux de ruissellement au cœur du talus.

Dans le cas des glissements de terrains, les techniques actives sont privilégiées aux méthodes passives. En effet, une fois qu'un glissement de terrain mettant en jeu de grandes quantités de matériaux est amorcé, il est difficile d'en maîtriser les conséquences, à titre d'exemple les coulées boueuses de la Colombie en Avril 2017.

Puisqu'il s'agit d'un transport de matériaux non profond, donc les solutions adéquates seront peu coûteuses et efficaces pour un tel risque. Un bon drainage au niveau aquifère s'avère primordial, notamment par des drains subhorizontaux. Un enrochement des zones à fluage, surtout par des gabions renforcés, est un remède adéquat en périodes critiques. La vitesse relative des miroirs varie entre 7mm et 14 mm par mois, il s'agit d'un glissement lent d'après le tableau N°7 des vitesses en mm/mois). Guide LCPC.

Dans le souhait d'avoir une idée sur le facteur de sécurité [FS] il est recommandé de réaliser d'autres essais géotechniques surtout le Triaxial, afin d'en déduire l'angle de frottement interne Φ , la contrainte de cisaillement τ , la cohésion C et la contrainte normale σ . Ce site reste non documenté de point de vue géologie et géotechnique, la beauté des attraits naturels telles les grottes et sources et collines à verdure annuelle attire un nombre très important de touristes randonneurs ce qui augmente le trafic sur cette piste et le mauvais usage de son environnement, notamment, durant les vacances et les week-ends.

On peut faire une modélisation mathématique pour avoir un modèle schématique du Talus en se basant sur la contrainte de cisaillement [T] l'angle de frottement [Φ] déduit du cercle de Mohr (Christian .1882). Logiciel : Plaxis.

L'équation ci-dessous (8) peut nous aider à calculer le facteur de sécurité [FS] qui doit être supérieur ou égale à la valeur de 1 ou soit disant 100/100. Dans tous les cas ce facteur tend vers 1,4 ou bien 140/100.

$$\tau = \frac{c}{F_{sol}} + (\sigma - u) \cdot \frac{\tan \phi}{F_{sol}} \text{ avec } F_{sol} \geq 1 \quad (8)$$

Où on a :

T : Contrainte De Cisaillement

Σ : Contrainte Normale Totale

μ : Pression Interstitielle

C : Cohésion

Φ : angle de frottement

F_{sol} : coefficient de sécurité sur le sol

A fin de réaliser ladite tâche il faut faire des sondages pressiométriques à la base du glissement, alors que ce dernier est superficiel, donc il est inutile. Une étude géophysique s'avère indispensable pour un diagnostic intrinsèque du sous-sol. L'approche hydrogéologique suivie d'une étude sur la perméabilité du sol par la loi de Darcy va nous donner une idée sur l'origine des eaux notamment en périodes sèches de l'année.

Pour une prévention efficace, la conception d'une carte régionale de susceptibilité des risques de mouvements de terrains sera d'un grand intérêt économique et social pour les collectivités territoriales notamment celles en montagnes et en piémonts de la chaîne de l'Atlas de la région Béni Mellal-Khenifra.

Une sensibilisation pour la société civile auprès des collectivités locales notamment contre l'usage excessif des ressources naturelles telles le bois et les matériaux de constructions acheminées des carrières au niveau des piémonts.

Pour les mouvements de terrain présentant des enjeux importants, des études approfondies doivent être faites telles la recherche des conditions géologiques et hydrogéologiques et des mécanismes avec, si besoin est, reconnaissances in situ (sondages géophysiques).

On s'efforce ensuite de faire un pronostic sur l'extension du mouvement dans l'espace et dans le temps, par un suivi des mesures de pression d'eau dite "Pression Interstitielle" notée (μ) [Lacroix, 2010] et des mesures de déplacements en surface et en profondeur par des inclinomètres. Fig.73.

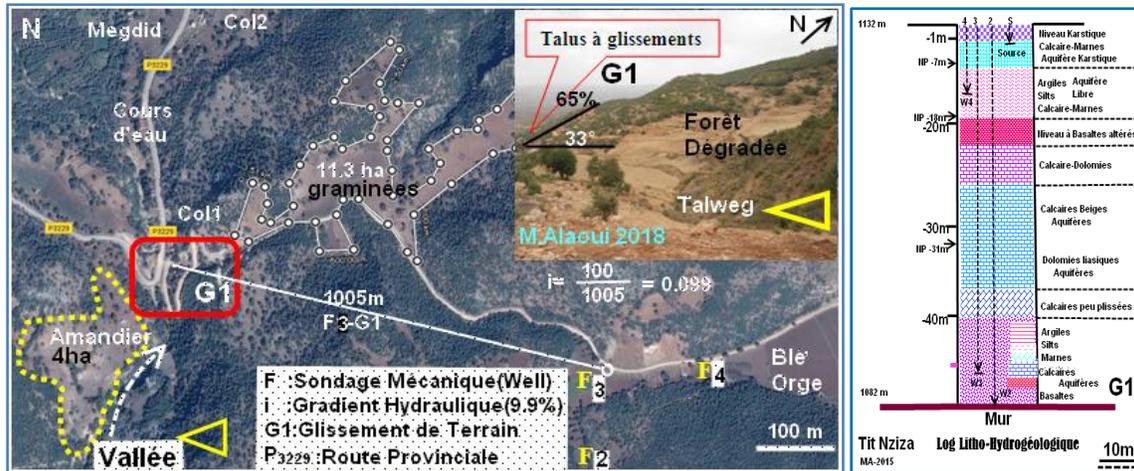


Figure 73 : Coupe et profil géomorphologique simplifiée en 3D de la zone à risques d'instabilité



Figure 74: Traces d'eau au niveau du talus durant toutes les périodes de l'année

Les arrivées d'eau au niveau du talus est prouvée par l'amas d'abeilles en fin d'été, qui lèchent cet eau durant la période sèche, donc la problématique est persiste toute l'année.

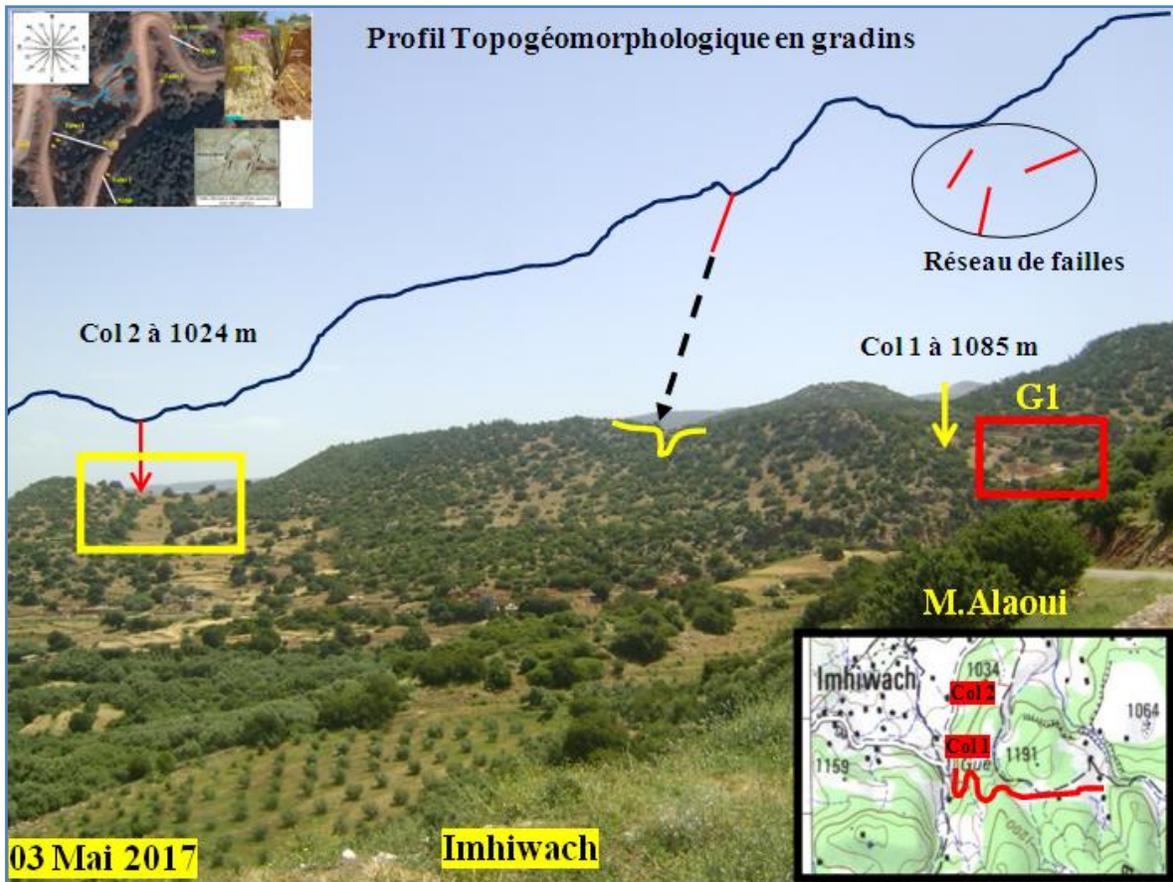


Figure 75: Profil géomorphologique des gradins des deux cols Nord-Sud

Le Col N°1 où passe l'actuelle piste est en instabilité permanente avec un réseau de failles jouant de véritable précurseur. Le Col N°2 présente une stabilité avec une légère dégradation de la forêt par l'action des partages des eaux. La direction générale du gradin est [NNW-SSE] à Nord-Sud et parallèle au sens du chevauchement atlasique. Fig75.

L'instabilité de la majorité des talus est liée à ces trois principaux facteurs selon les caractéristiques de chaque domaine d'étude :

- Les travaux d'équipement changent la géomorphologie des talus
- Les conditions météorologiques
- La nature géologique du site

La pente moyenne du talus G1 est de 65%, donc l'angle α de la tangente est de 33° calculé d'après la formule mathématique utilisée dans les calculs Arctangente.

2. ETUDE GÉOLOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE DU GLISSEMENT DE TABAROUCHT G2

C'est un versant orienté Nord-Sud, présentant une pente variable de 55% à 70%, une végétation moins dense formée essentiellement d'Amandier, de Genévrier et quelques arbustes, traversé par un torrent qui draine les eaux à l'amont, on a deux types de sol :

- Un sol brunâtre en amont avec éboulis calcaires où apparaît le grand miroir M1 de glissement qui devient faible en allant vers l'Ouest.

- Un sol jaunâtre à grisâtre à cassures et brèches présentant un aquifère dans un niveau violacé et d'un débit varie entre 36m³/J et 40m³/J à 240 m³/J en 2018.

- La pente moyenne du talus est de 57%, donc l'angle α de la tangente est de 31°, calculé d'après la formule mathématique utilisée dans le cas du glissement G1.

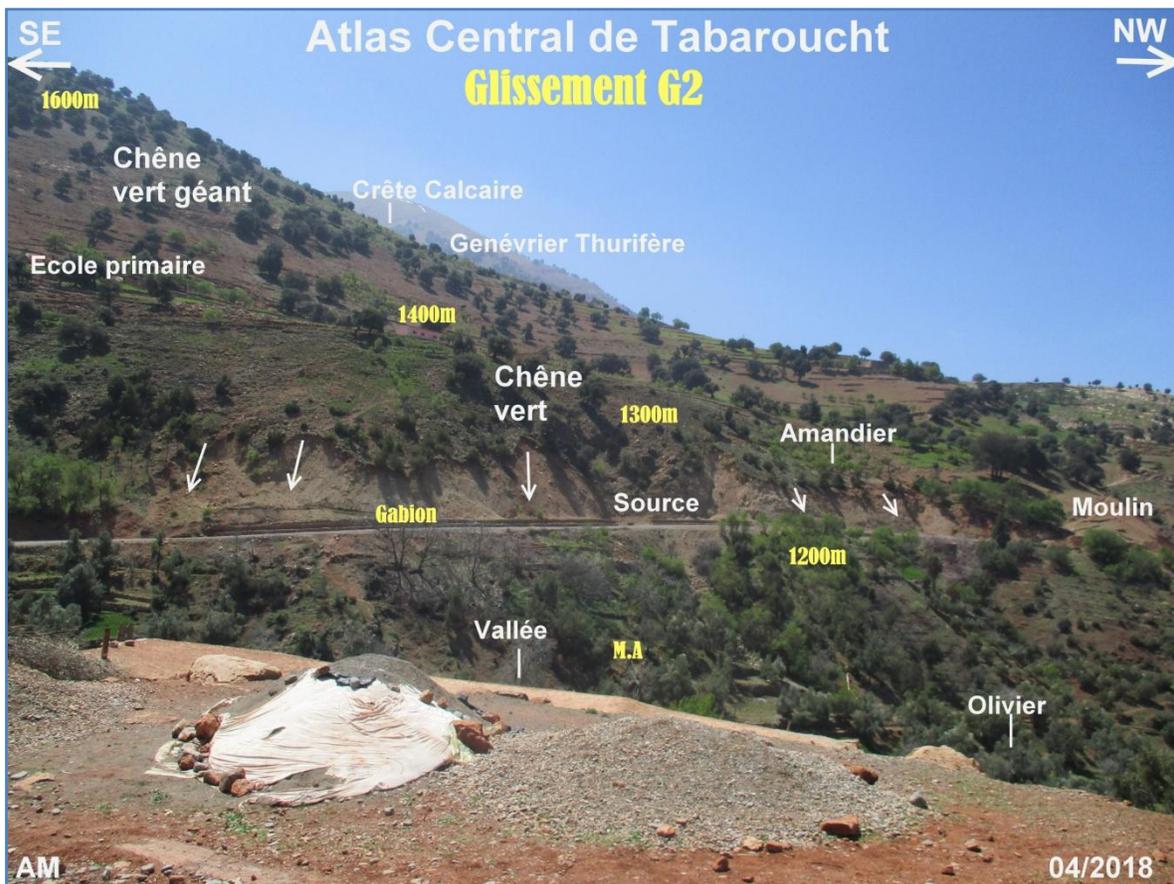


Figure 76: Vue panoramique du versant à glissement de terrain G2

Intervalle (m)	[0-20]	[20-40]	[40-60]	[60-80]	[80-100]
Miroir1 (cm)	260	230	190	150	85
Miroir2 (cm)	190	145	80	60	45

M.A

Tableau 9: Mesure des variations des plans de miroirs en intervalles de 20 mètres

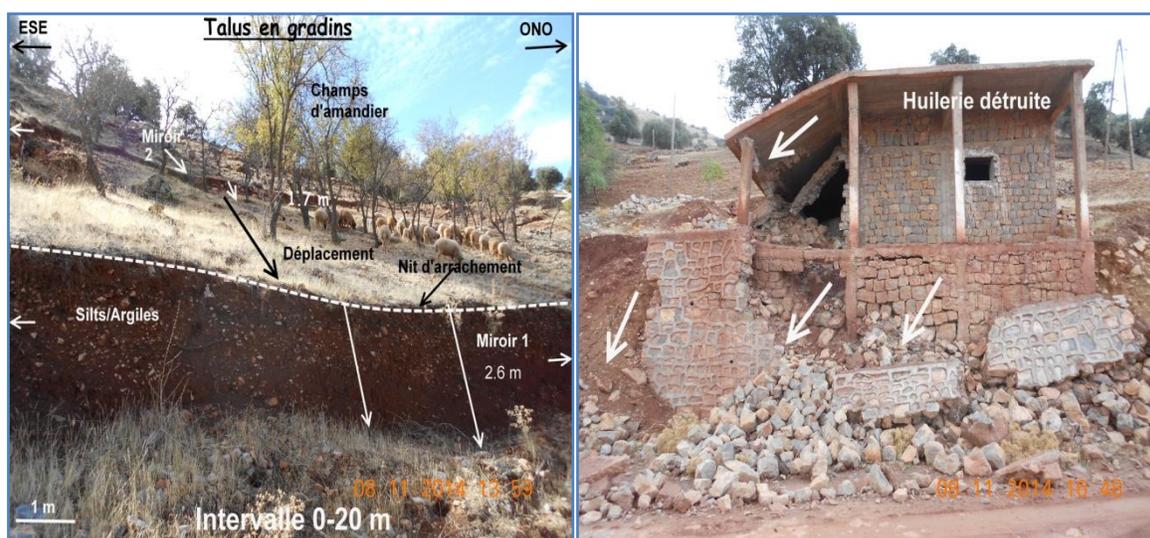


Figure 77: Dégâts matériels d'infrastructures liés à l'ampleur du glissement

Ces changements climatiques sont dus aux migrations des nuées [Nimbo-cumuls] pleines de pluies vers les zones arides et subsahariennes, par conséquent les infrastructures n'étaient pas adaptées à ces précipitations ce qui a mis les habitants et leurs biens en péril, [Karouq, TV.2014]. Les intervalles de mesures des plans en allant de l'Est vers l'Ouest, montre que la partie où pousse l'amandier est très endommagée, quant qu' à la partie Ouest, les miroirs deviennent de plus en plus petits ce qui a stabilisé le talus . Fig.77 et Fig.78.

Le glissement en question a touché un champ d'amandier, le flan droit de la piste aménagée, une huilerie, et la partie avale de la piste, les fissures ont dépassé 0.55m, par endroits, les déplacements relatifs des miroirs varient entre 0.45 m et 2.6 m. La piste risque d'être en péril notamment avec les précipitations du mois de novembre 2014 qui ont été généralisées sur tout le Royaume, vu les inondations qui ont touché le Sud [Goulmim et

Taroudant] suite aux changements climatiques qu'a connu notre pays ces dernières années, et à nos jours, le moulin traditionnel est complètement ruiné suite aux fortes pluies.

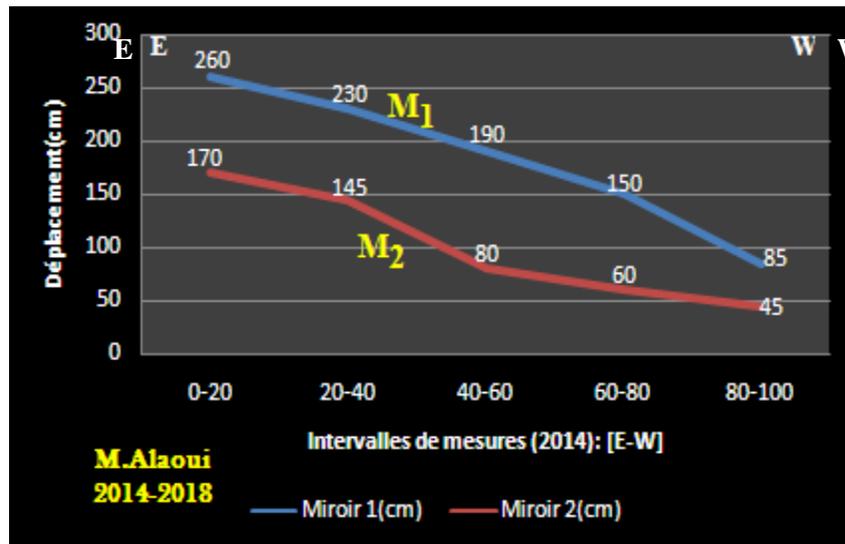
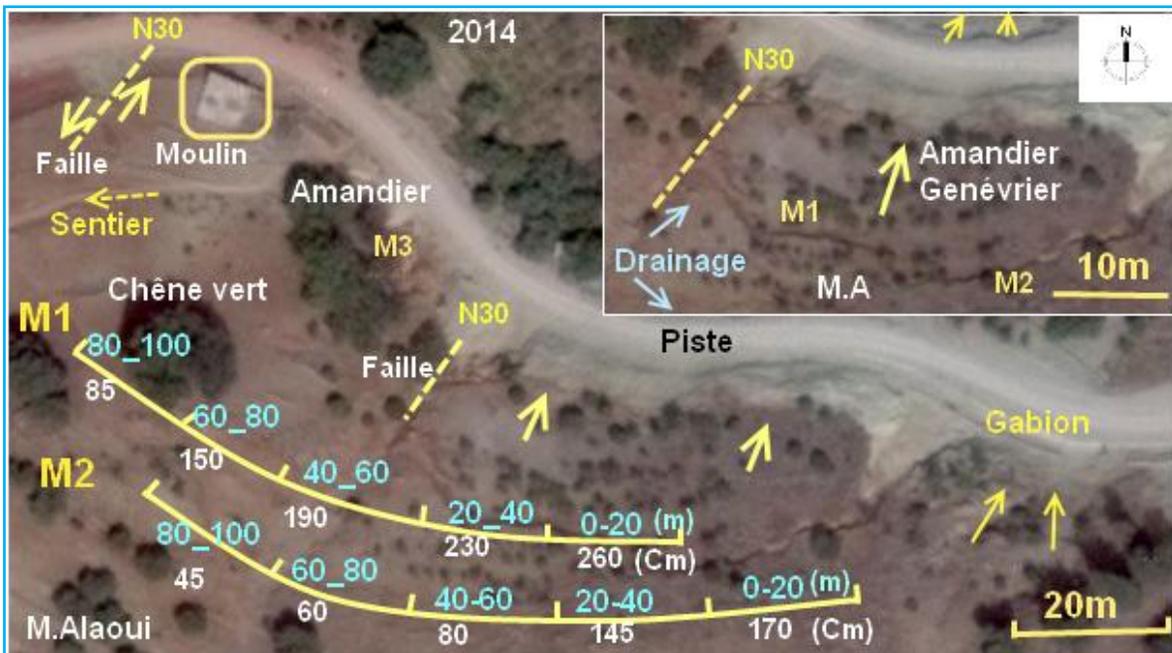


Figure 78: Variation des plans de miroirs dans l'espace

Le chêne vert géant maintient les terres en stabilité permanente par son système racinaire très développé, il est qualifié du ciment de l'Atlas.



La partie où pousse le chêne vert est plus stable que celle implantée d'amandier. On a trois miroirs de glissement selon la longueur de rejet, et deux failles qui dévient les miroirs.

La faille F1 a décalé le miroir M1, alors que la faille F2 a entré en jeu avec le glissement pour détruire le moulin d'huile traditionnel. Le miroir M3 était le résultat des deux miroirs M1 et M2 par une surcharge d'un volume de terre très important. Fig.79.

1.2. ORIGINE DU MOUVEMENT DE TERRAIN

Les principaux déclencheurs de ce glissement sont les travaux d'équipement, les vibrations des travaux miniers à l'Ouest du site, l'aquifère à la base et la pluviométrie.

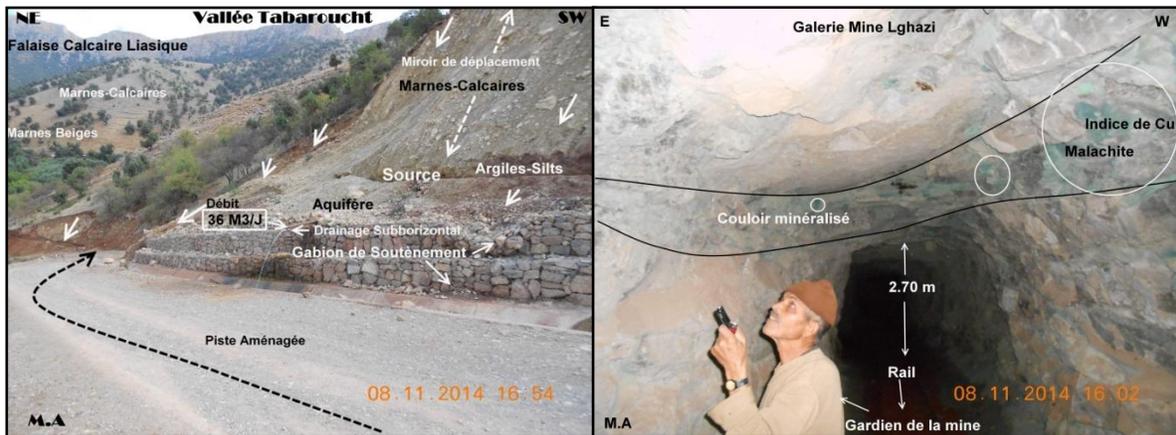


Figure 80: L'aquifère à la Base du Talus et une Galerie de l'ancienne Mine

La nature géologique, la pente, la couverture végétale, l'hydrogéologie et l'hydrologie sont les facteurs naturels majeurs d'un tel glissement, on peut aussi inclure la magnitude sismique régionale, qui influence d'une manière indirecte. Lacroix, 2010.

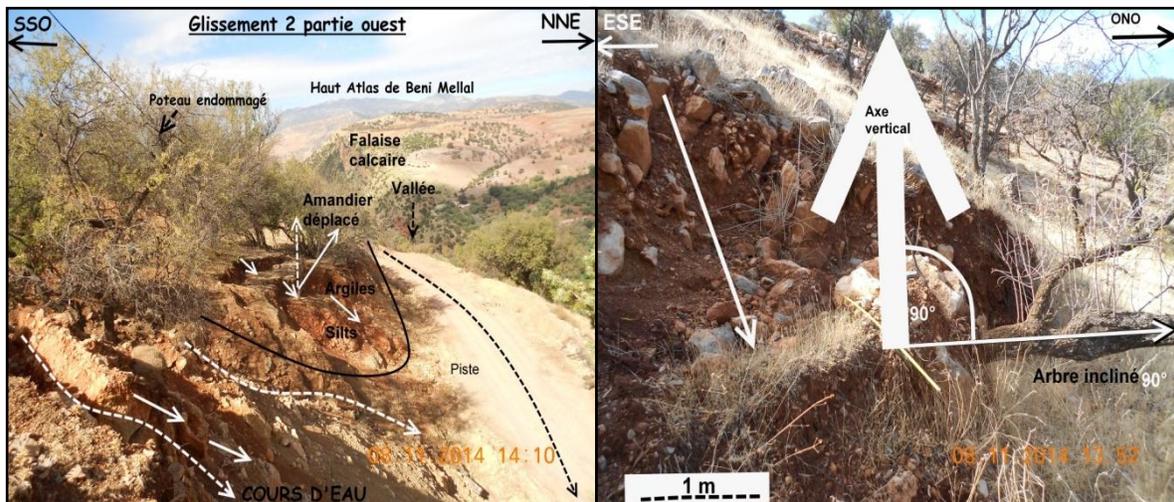


Figure 81: Types d'indices des instabilités sur terrain G2

Le degré d'instabilité d'un talus est traduit par l'angle que fait l'arbre avec l'horizontal (85°-90°) Fig.81.

Le système racinaire joue un rôle très important dans la stabilité, ici l'amandier possède des racines à profondeurs limitées et à faible action pour maintenir des masses de terre glissées. Dans notre actuel cas, les principaux facteurs sont :

- Travaux d'une ancienne mine Ghazi de Cuivre et de Plomb (Cu /Pb)
- Travaux d'aménagement de la piste réalisée par la commune territoriale
- Présence d'un aquifère à la base du talus
- Dégradation des forêts de chêne vert et replantation par d'autres espèces
- Substrat, nature géologique et type de sol caractérisant le talus.

Le versant abritant une dizaine de maisons, une école primaire, et une huilerie, le tout est affecté par le mouvement d'une masse de terre vers le Nord, en créant un système de miroirs de glissement variant selon la pente de la partie en déplacement, ce qui a engendré des fissurations dans la piste, et qui a aussi endommagé le moulin à la base.

2.2.ÉTUDE GÉOLOGIQUE

De point de vue géologie, la zone est caractérisée par des dépôts jurassiques à crétacés avec des formations rouges continentales à la base et des séries calcaires liasiques dominant le bassin versant de Tabaroucht en allant vers le bassin de Ouauizerht au NW.



Figure 82: Lithologie explorée d'après un ancien carottage minier (Mine Ghazi)

Le secteur d'étude a fait l'objet de plusieurs études géologiques, notamment, celles liées aux prospections minières au cours des années 70 et 80 par des marocains et aussi par des géologues experts étrangers.

D'après les débris de carottes minières rencontrées aux alentours des galeries, le fond est caractérisé par des roches dures telles des quartzites et des roches ignées tels Gabbro et

Basalte. En surface la dominance des roches sédimentaires telles les pélites, les argiles, les marnes et les calcaires affleurant en épaisseur variable. Fig82.

D'après cette carte, et les travaux de terrain, le Dogger occupe les zones des hautes montagnes formant l'axe de la chaîne atlasique centrale, tandis que le Lias et le Trias ont une extension du Sud-ouest vers le Nord-est occupant la zone de chevauchement du secondaire sur le tertiaire et le quaternaire orienté Nord-Ouest-Sud-est.

Le Tertiaire forme le cœur des synclinaux, dont l'Eocène occupe une partie importante de ces dépressions géologiques telles que la région d'Aghbala, synclinal de Bencharou, et d'Ait Aâtab.....etc. Fig.83.

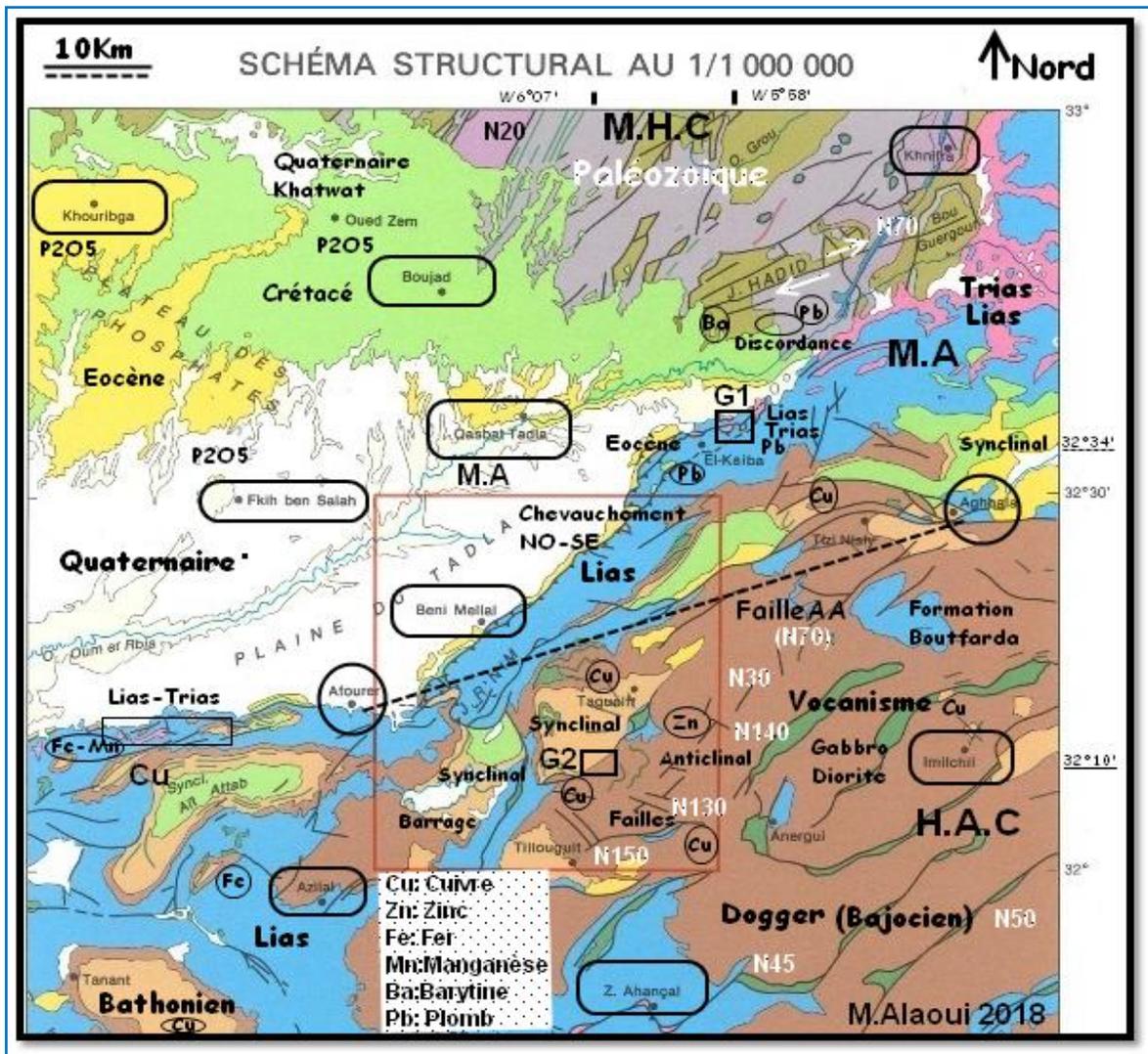


Figure 83: Carte géologique régionale-modifiée [Carte Béni Mellal - 1/1000000-1982]

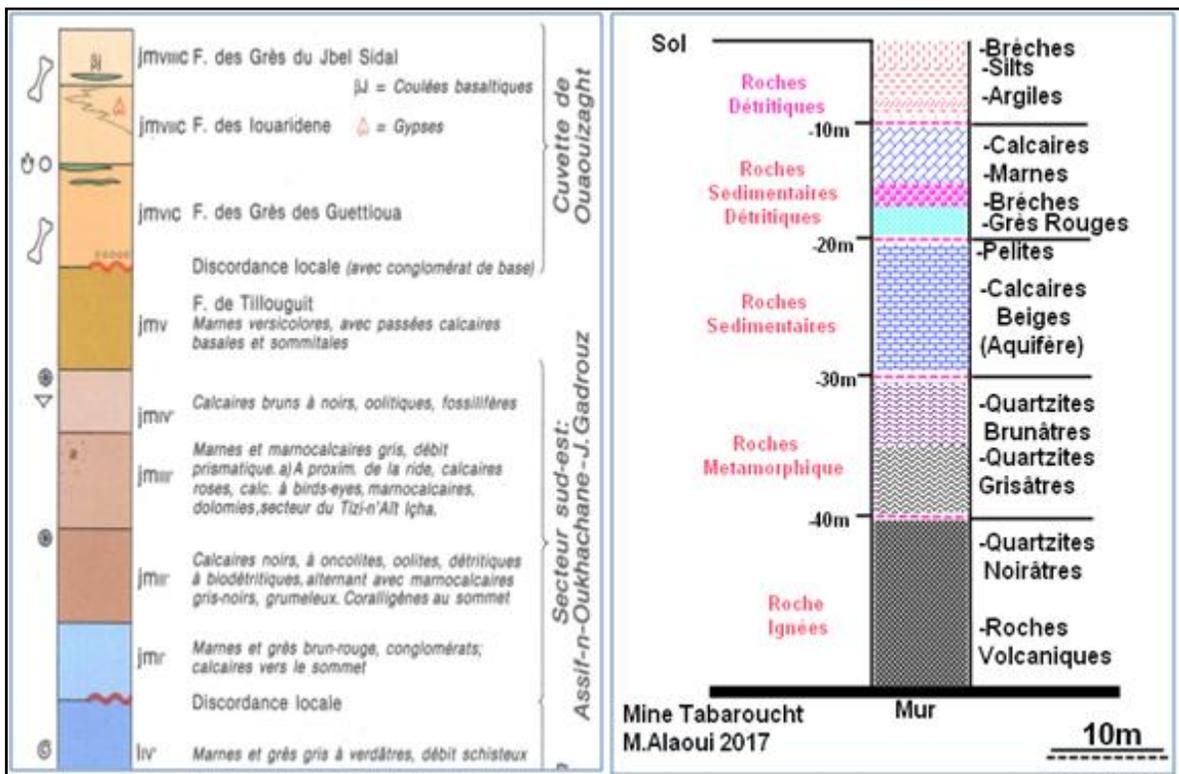
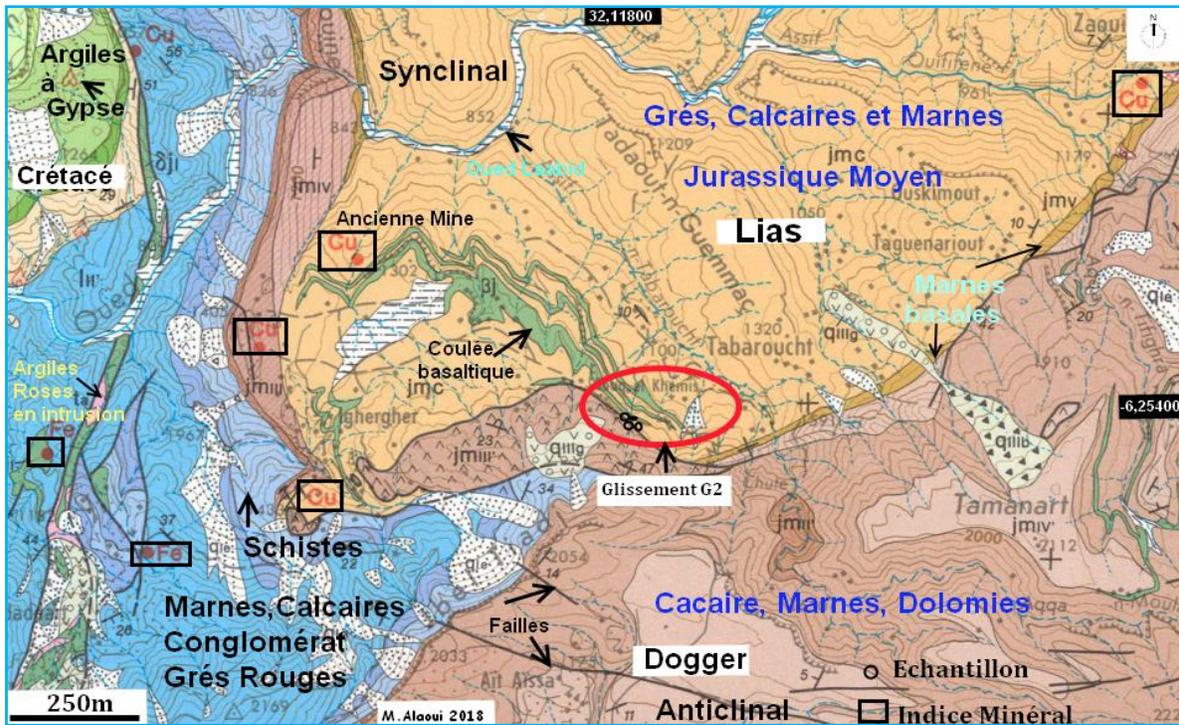


Figure 84: Géologie et lithologie de la zone d'étude par carottages miniers

De point de vue tectonique, la zone montre un réseau de failles, et des légers plissements par endroits. La phase orogénique a mis en place un basalte d'âge jurassique, et

des dykes en allant vers Tagleft. La tectonique et le basalte ont favori la mise en place de maintes minéralisations telle la mine de cuivre ‘‘Ghazi’’ ainsi que d’autres indices de minéralisation dans la région tel le Plomb, le Zinc (Calamine de Taghya à l’Est), et la fluorine dans les crêtes de Tilouguit au Sud, avec aussi du cuivre dans un volcanisme entre la cathédrale et Anergui, précisément au village Adendoune, à la base des calcaires jurassiques plissés de Zaouiïa Ahensal vers le Sud.

En ce qui concerne le contexte structural, la zone d’étude fait partie du synclinal de Tagleft qui remonte au Jurassique moyen continental et le synclinal de Ouauouzerht à dépôts Crétacés et Jurassiques moyen continental argilo-silteuses formant les rives rouges du Barrage Bine El Ouidane à l’Ouest de Tabaroucht.

L’épaississement des strates et des formations sédimentaires orienté [E-W]. Les deux synclinaux sont compris entre l’anticlinal de Taçmit-Ghnyayne au NW et celui de Gadrouz au SE du Dogger carbonaté selon la carte Béni Mellal [Esquisse Tectonique : 1/400000].Moussa Saâdi 1985.



Figure 85: Faciès et structures géologiques en relation avec la stabilité des deux Talus [G1-G2]

La vallée de Tabaroucht est caractérisée par des dépôts et faciès qui remontent au Lias inférieur jusqu’au Quaternaire alluviale actuel. Les brèches sédimentaires à silts ont une épaisseur très importante entre le site de la mine et le lieu à glissement de terrain.

La dégradation, surtout, du chêne vert géant et son remplacement par les graminées et l’amandier ont favori de bonnes conditions pour l’apparition des fissures de tensions en qualité de deux principaux miroirs en gradins.

Les marnes grisâtres occupent une place importante avec un aquifère à débit variable selon les saisons, leur mauvais comportement en présence d'eau a engendré des zones à glissement permanent. Les zones où affleurent les basaltes et Gabbro jurassiques présentent une véritable stabilité, les calcaires plissés à pendage subvertical jouent le rôle de piliers par endroits. Fig85.

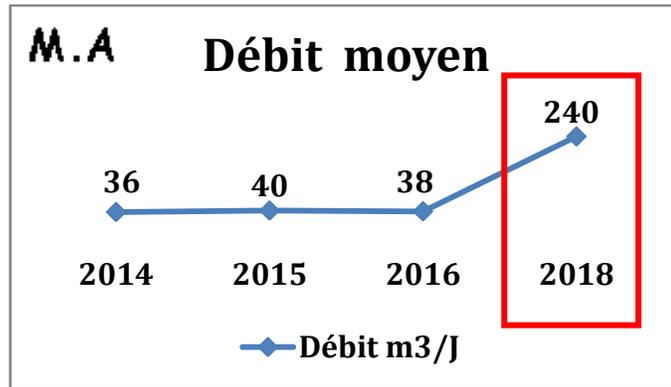


Figure 86: Évolution du débit selon la pluviométrie régionale [2014-2018]



Figure 87: Indices d'instabilité du Versant par destruction et Ruine Totale du Moulin à l'huile

Entre 2014 et 2018 l'ampleur du glissement a augmenté ce qui a entraîné la destruction totale du bâtiment. L'aquifère de la nappe à la base du talus est, presque, multiplié par 6 ce qui a abouti à un débit de $240 \text{ m}^3/\text{J}$. Les missions du 08 Novembre 2014 et celle du 03 Avril 2018, étaient axées sur un suivi intensif dans le temps et l'espace.

Les images satellitaires entre 2014 et 2018 ont montré une anomalie au niveau du talus, et ce par la totale destruction et nette du moulin d'olive, comme la montre les photos prises en 2014 et en 2018 depuis le même angle. Fig. 86 et Fig. 87.

Le facteur sismique intervient d'une manière indirecte dans l'instabilité des talus et des pentes en influençant sur l'aspect géomorphologique.

Le degré d'activité des différents mouvements peut également être classé à travers une échelle de vitesse de déplacement de la masse mise à contribution. L'intensité d'un glissement varie alors dans l'espace en allant de l'amont vers l'aval sur l'axe de déplacement du glissement de terrain selon une surface de cisaillement bien définie.

Ces paramètres peuvent être exprimés quantitativement, notamment en utilisant une fonction de distribution spatiale, ou en appliquant les classements d'intensité qualitatifs relatifs telles que lent, modéré et rapide, ou faible, modéré et élevé.

Du fait des fissures, des déformations et des déplacements en masse, les glissements peuvent entraîner des dégâts importants aux infrastructures et aux constructions. Dans certains cas, ils peuvent provoquer leur ruine complète (formation d'une niche d'arrachement d'ampleur plurimétrique, poussée des terres incompatible avec la résistance mécanique de leur structure), cas du moulin d'olive à Tabaroucht Fig87.

Outre les dégâts humains et matériels qui surviennent parfois, ces évènements peuvent modifier (parfois significativement) le paysage, créer des lacs ou petites retenues d'eau, plus ou moins durables ou instables, affecter des infrastructures et modifier le fonctionnement de la circulation locale de l'eau et des sédiments, ce qui affecte aussi les écosystèmes. CRUDEN ET VARNES 1996.

Les statistiques mondiales des glissements de terrain étudiés par le Professeur D. P. Wilson de l'Université de Dunham en Angleterre, montrent que les régions les plus exposées en termes de pertes en vie humaines suite aux phénomènes de mouvement de masse et d'instabilité gravitaire se situent principalement en Asie du sud, en Amérique centrale et quelque peu en Afrique.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire est une approche sur la compréhension du comportement mécanique de glissements de terrain dans deux régions différentes du Maroc.

Ce thème a été volontairement abordé sur deux types différents de glissements de terrains, le premier est situé dans la zone localisée dans les montagnes du Haut Atlas Central, appartenant à la région d'Azilal l'autre est situé dans les gradins des montagnes de l'Atlas de Béni Mellal dite la zone de transition entre le Haut et le Moyen Atlas, à environ 8Km à l'Est d'El Ksiba, afin d'y reconnaître leurs différences et leurs similitudes.

Pour ces deux exemples de glissement de terrain, nous avons déterminé un ensemble de critères mécaniques, structuraux et hydrogéologiques, qui permet d'avoir au final une meilleure compréhension des mécanismes qui régissent la rupture, mais qui permet surtout d'identifier les facteurs direct et indirect et le risque qui présente celui-là dans le temps, ceci par une approche à la fois quantitative [calculs] et bien entendu qualitative par vérification sur le terrain et validation à partir de données historiques.

1. COMPORTEMENTS MÉCANIQUES DE LA RUPTURE

Dans le cas de l'étude du glissement de terrain de Tabaroucht, plusieurs avancées ont été obtenues sur le plan tant de la géologie, du comportement mécanique du massif que de la compréhension des données hydrogéologiques sur la circulation des eaux.

Alors que dans le cas de l'étude du glissement de terrain de Tit N'Ziza, plusieurs avancées ont été obtenues tant sur le plan géologique, mécanique du sol, géotechnique, ainsi que minéralogique.

La géologie des deux sites est caractérisée par le substratum capital de tout glissement, qui est le complexe Marne-Argile-Silt, sauf que les marnes du G2 sont brunâtres alors celles du G1 virent au jaunâtre.

Le contexte structural est tout à fait différent, pour le G1, ici le glissement de terrain s'est manifesté dans les collines appartenant au grand chevauchement S.E de l'Atlas de Dir El Ksiba, quant à G2 les mouvements de terrain ont affecté les limites entre le synclinal jurassique continental de Tagleft et la crête calcaire ou l'anticlinal du Dogger calcaire plissé au Sud.

Le contexte hydrogéologique est presque différent de point de vue affleurement, pour le G1 le talus présente des suintements toute l'année, notamment en durée de sécheresse qui devient inaperçus en périodes pluvieuses. Concernant le G2, l'aquifère est manifesté en source à la base du talus, ce qui draine les eaux, par conséquent la force interstitielle augmente en milieu peu poreux.

Au niveau de Tit N'Ziza les mesures piézométriques entre 2015 et 2016 ont montré qu'il y a trois niveaux d'aquifère sis au cœur du bassin à l'Est avec présence d'aquifères karstiques superficiels (Source Tit N'Ziza).

L'approche géotechnique des deux sites est bien définie au niveau du G1 avec des analyses en mécanique des sols de deux échantillons qu'au niveau du G2.

Le comportement des sols en présence des eaux et en pente raide nous laisse à penser aux systèmes [argiles-marnes-silts] des deux sites, donc les indices géotechniques sont presque les mêmes, telles les fentes de fissuration ou de tension, les plans de miroirs, et on peut inclure, aussi, l'inclinaison des arbres. Schweingruber, 1993.

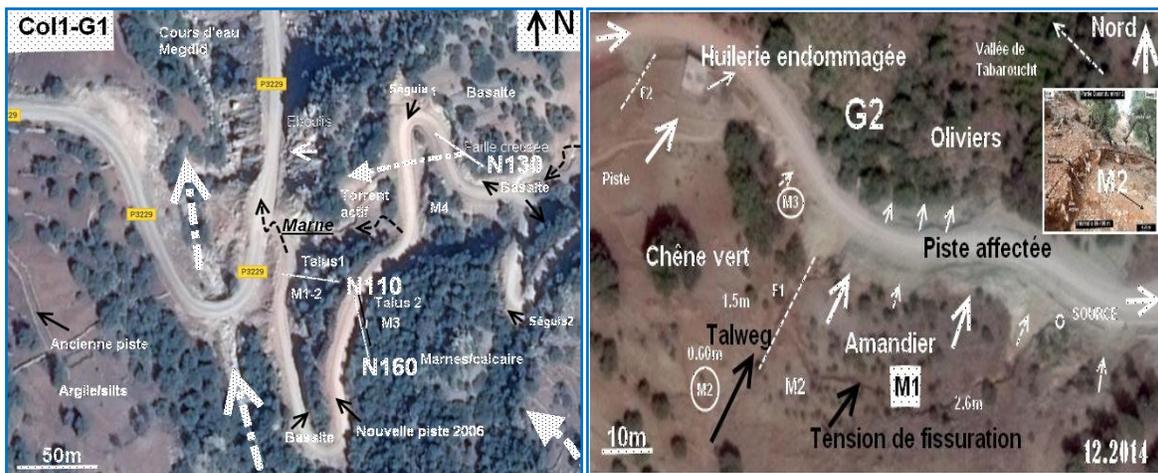


Figure 88: Localisation des structures affectant les deux versants [G1-G2]

Les deux zones n'ont jamais été l'objet des études concernant les géorisques naturels face aux changements climatiques, excepté quelques recherches minéralogiques, structurales, métallogéniques et sédimentologiques concernant le potentiel minier régional et ou national.

Les deux sites étaient deux cas riches de point de vu indices d'instabilité, et géomorphologie favorisant ce type de mouvements de terrains. Fig.89.

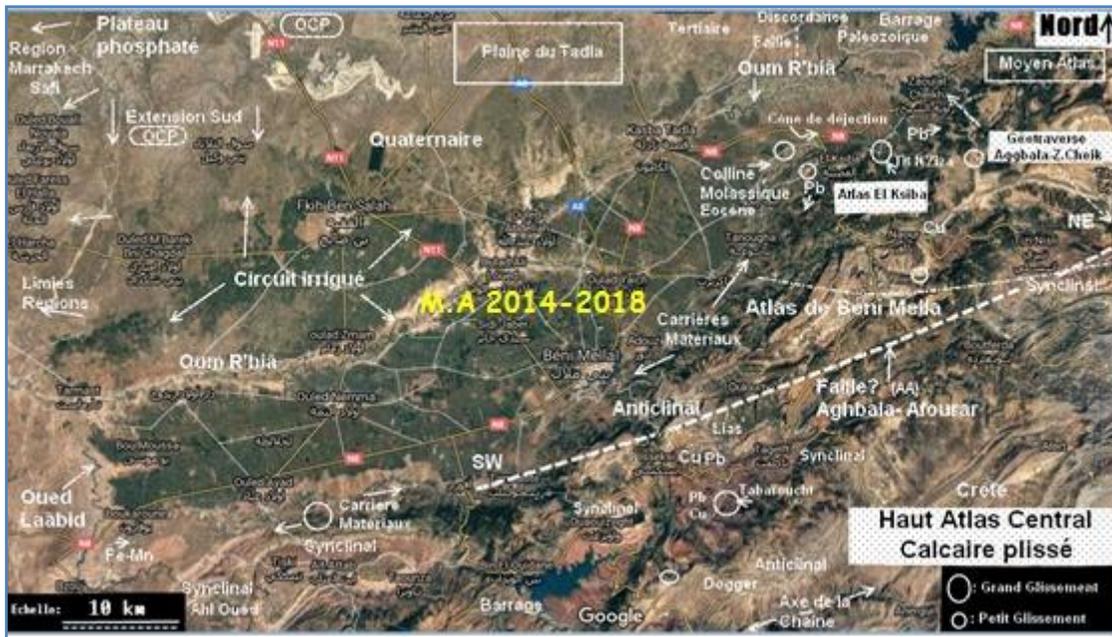


Figure 89: Carte de situation globale de glissements de terrain et de Carrières-Mines

2. FACTEURS DIRECTS ET INDIRECTS QUI RÉGISSENT LA RUPTURE DES GLISSEMENTS DE TERRAINS

Les facteurs majeurs d'un glissement de terrain ça différent d'une zone à l'autre, dans les deux cas de glissement de notre étude, les agents déclenchant de ces aléas sont devisés en deux catégories, des facteurs directs et indirects.

La nature géologique, la pente, la couverture végétale sont les facteurs indirects du glissement de terrain, mais aussi l'impact de changement climatique sur l'hydrogéologie et l'hydrologie locale sont les facteurs directs naturels majeurs de tels glissements, on peut aussi inclure la magnitude sismique régionale et l'action anthropique qui influencent la stabilité des versants en phase des travaux d'équipement ou des exploitations minières et des carrières à matériaux.

1.2.FACTEURS MAJEURS DU GLISSEMENT DE TIT N'ZIZA

1.1.2. Facteurs directs

La pluviométrie : L'altitude des 1100 m a favori durant ces dernières 16 années, des pluies avec une moyenne variant entre 300 mm et 1400 mm par an. Les crêts enneigés entre

Novembre et Avril conditionnent l'alimentation, par une lente infiltration, des aquifères et des sources du bassin en amont du glissement.

La géologie : Les formations entre le Trias et le Quaternaire, caractérisées, notamment, par les marnes, les argiles et les silts favorisent les bonnes conditions pour l'instabilité des talus, ainsi que la présence d'un réseau de faille à différentes directions qui a engendré des zones de faiblesse pour le drainage des eaux de crues en aval.

Les eaux souterraines : La présence d'un système d'aquifères en bassin à l'Est du talus aggrave la situation, surtout, après la sursaturation des nappes. L'irrigation des surfaces à cultures favorise aussi un écoulement vers le talus à risque.

La pente : C'est le facteur primordial d'un déplacement de masse vers l'aval, surtout quand le talus appartient à la grande pente d'une ligne de partage des eaux de pluies, comme le cas de glissement de terrain G1.

L'action anthropique : Dans le but d'améliorer les conditions des habitants lointains, et encourager le géotourisme rural le passage des pistes s'avère indispensable. Le passage de la piste entre la route provinciale P3229 et Tit N'Ziza a provoqué des zones de rupture et qui a pu réagir en mouvement.

2.1.2. Facteurs indirects

La sismicité : Cette région appartient à la zone de faible amplitude vue que le seuil au-delà du degré 4° Richter l'impact est positif sur un glissement de terrain (4.2 Richter le 31-Mai- 2013 à 4.5 Km au Sud-ouest du glissement G1).

Dégradation de la flore : L'utilisation du bois par la population est un fléau qui ravage les forêts marocaines, ce qui engendre une énorme perte d'arbres et leur système racinaire. Par conséquent une instabilité gravitaire des terres meubles est fortement probable, ce qui rend ces zones plus vulnérables aux risques naturels.

Le trafic des véhicules : Le trafic par des véhicules à moyen poids, notamment, celle des transports pour les souks hebdomadaires, à un impact indirect sur l'évolution des fissurations de tension au niveau des nids d'arrachement d'un tel glissement. Chaque week end la région reçoit une masse très importante de visiteurs durant toute l'année pour des circuits géotouristiques ce qui augmente le trafic.

2.2. FACTEURS MAJEURS DU GLISSEMENT DE TABAROUCHT

En ce qui concerne le glissement de Tabaroucht, les agents déclenchant le mouvement du talus sont nombreux et différents, comme pour G1, on a deux types de facteurs déclenchant :

1.2.2. Facteurs à impact direct

La pluviométrie : Elle reste, toujours, en tête d'affiches, l'altitude [1400m] du site joue un rôle principal dans la réception d'une quantité très importante de pluies et de neige entre Novembre et Avril, avec aussi des averses pendant l'été entre Juin et Septembre ce qui aggrave les tensions des fissurations par l'action des eaux et diminue la cohésion entre les grains, par conséquent une augmentation de la pression interstitielles (μ) et la valeur du cisaillement (σ) et le mouvement aura le jour et se déclenche.

La pente: C'est l'unique facteur qui entre en direct dans les enjeux, par poids des grandes masses de terres l'aléa aura lieu. Dans G2 la pente varie entre 55% et 70%, par endroit, favorise le déclenchement du glissement.

La géologie : C'est un élément très important dans le mouvement en question, vu la présence des faciès purement instables surtout en parallèle avec d'autres facteurs. La lithologie locale du Lias inférieur jusqu'au quaternaire abritant les marnes, les argiles, les dolomies, leur faible pendage de 20° vers le Sud favorise le bon déplacement des terres en direction du Nord à NNE.

Les eaux souterraines: La présence d'un aquifère conditionne la circulation des eaux capillaires ce qui favorise une chute de la cohésion des matériaux et par conséquent le glissement se déclenche. Les habitations des agglomérations et l'école en amont du talus ; l'utilisation des puits perdus et non les fosses septiques par les habitants favorise un drainage des eaux vers le cœur du versant et rend le talus géologiquement instable par une forte circulation des eaux capillaires.

L'action de l'Homme: Le facteur anthropique a influencé d'une façon directe, surtout après le passage de la piste (actuellement goudronnée), sur l'instabilité des fronts des talus, en créant des zones à faible résistance à la stabilité par une perte de l'agencement des grains ce qui augmente le cisaillement et la rupture en tête des versants surtout après intercalation des précipitations durant l'année.

2.2.2. Facteurs à impact indirect

Le séisme: Ce facteur entre en jeu indirectement, par des secousses variant entre 3.6 et 4.4 Richter en 2003 à Ouaouizerht et entre 2014- 2016 à Tilouguit et de 4.4 à Tagleft. Le jeu de la faille Aghbala-Afourar orientée NE-SO est capital dans les secousses régionales par son activité à tout moment de l'année.

La dégradation de la forêt: Le besoin de la majorité des habitants à des terres nues et fertiles, les a poussés à dégrader la flore locale, surtout le chêne vert. Une culture des arbustes et les graminées a conditionné la rupture et création des miroirs de glissement, ce qui a pu emporter des arbres et déraciner la flore.

Secousses des explosifs miniers: L'exploration et aussi l'exploitation de l'ancienne mine « Ghazi » a, probablement, créé des fissurations dans les zones à matériaux meuble, qui ont joué actuellement en fente de fissuration et nids d'arrachement au même temps que les autres facteurs directs pour activer cet aléa.

3. SOLUTIONS POUR LA STABILITÉ DES VERSANTS

Le choix d'une méthode de stabilisation d'un glissement de terrain passe par le jugement, l'expérience et la réflexion du géotechnicien traitant. Ainsi il nous a été possible de déterminer la solution de confortement optimale en vue des contraintes qui nous ont été imposées. On a donc pensé à des simples solutions impliquant la réalisation des méthodes classiques, vu le type de glissement semi-profond (<2m) [Benouis 2010].

Ces solutions peuvent nous permettre d'atteindre un facteur de sécurité assurant la stabilité des versants ainsi de stopper les arrivées de terres des talus à usage socio-économique et touristique.

À signaler que d'autres solutions de confortement auraient pu être envisagées bien avant la mise en place de la piste. Mais, étant donné que la piste est en service, une telle intervention ne pourrait être envisagée actuellement.

Par conséquent, la solution proposée est celle qui convient le mieux. Aussi avons-nous pu mieux connaître la région de notre zone d'étude que ce soit du point de vue géologique mais aussi de celui géomorphologique et géographique de toute la région à gradins et pentes instables.

La complexité géologique de la région étant ce qu'elle est, nous recommandons une étude géologique plus poussée des zones à problématique d'instabilité, étant donné les

accidents tectoniques qui parcourent le substratum jurassique dans la région et qui peuvent induire des failles au sein même de l'interface. Ces failles ne peuvent pas être facilement localisées car le faciès marneux plastique de la région ne nous permet pas d'observer précisément les jeux des accidents tectoniques.

Cependant la disposition anormale des couches de marnes jaunâtres et des marnes verdâtres laisse entrevoir la possibilité de l'existence de failles traversant le versant de part en part à l'endroit même où les fissurations sont apparues, les risques auront lieu quand l'angle [α] de la pente dépasse 30°.

L'activité de quelques failles, telle celle dite "Aghbala-Afourar" influence d'une façon indirecte sur l'instabilité des versants, surtout, celui de Tabaroucht, où la magnitude dépasse, parfois les 4 degrés sur l'échelle Richter.

4. PERSPECTIVES ET TENDANCES

Les événements évoqués illustrent à quel point les pluies intenses peuvent non seulement provoquer le déclenchement des glissements en coulées de saturation en eau, mais aussi les mouvements de masse très complexes et de grande ampleur.

Nous avons montré, pour les années 2014-2018, qu'il existe une relation nette entre la distribution spatiale de la pluviométrie et la répartition de ces glissements de terrain observés et leur variation de forme. Dans le 2^{ème} cas des constructions et des champs ont été détruits, des pistes et poteaux électriques emportés.

Ainsi, le cas de Tit Nziza, elle apparait comme une zone rurale représentative des risques encourus par les populations vivant dans les montagnes de l'Atlas de Béni Mellal souvent être frappées par des fortes précipitations.

Il est impérieux de tenir compte de ce type d'aléa dans le Plan National de Gestion des Risques et des Désastres [P.N.G.R.D], vu les incidences néfastes qu'un tel phénomène peut avoir sur l'économie du pays. Concernant quelques recommandations, une lutte efficace passe par :

- La cartographie des zones exposées aux risques
- La prévision régionale et locale dans le temps
- La protection des versants : Drainage, reboisement, reforestation et terrassement
- Un système de surveillance et d'alerte efficace.

En définitive, pour une étude efficace concernant un tel projet, il est recommandé de concevoir une carte de risques englobant toutes les données nécessaires à savoir :

-Carte géotechnique et carte géophysique : FS, modèle intrinsèque du fond.....

-Carte géologique : Failles, chauvechement, nappes de charriage.....

-Carte de situation régionale des risques majeurs : Projection des zones vulnérables.

Bien sur, une superposition de ces cartes peut mener les experts à de bonnes solutions pour les aléas rencontrés sur terrain.

Des études ont été faites sur le mode de précipitation de la calcite dans les stalagmites afin de reconstituer le paléoclimat d'une région donnée (Périodes pluviales et glaciales), pour avoir une idée précise sur les changements climatiques qui ont affecté cette région dans le passé profond, on peut établir une étude sur les spéléothèmes des grottes karstiques et des travertins qui 'y existent.

Une analyse des stries constituant ces formations calcaires peut nous donner l'évolution d'un minéral issu de l'érosion tel le Fer (Fe+) caractérisant les périodes interpluviales, par conséquent on va déterminer les changements du climat à travers le temps (Etude d'un cas aux Bahamas 2017).

Une étude peut être réalisée sur les séries de températures maximales et minimales et des précipitations dans les régions du piémont ce qui va permis de calculer, à l'échelle situationnelle de différentes localités, les variations climatiques enregistrées au cours de ces 16 dernières années, entre 2003 et 2018.

Chaque localité présente ses propres variations climatiques, cependant, on peut mettre en évidence un élément commun pour, presque, toutes les stations analysées, à savoir une augmentation graduelle des températures et une diminution des précipitations cumulées. Fratianni Simona 2010 Université de Torino.

5. RÉPERTOIRE DE QUELQUES GLISSEMENTS

-Glissements dans l'Atlas de Béni Mellal 2014: Tit N'Ziza Commune Dir El Ksiba

-Glissements dans le Haut Atlas Central 2014: Tabaroucht- Ouaouizerht-Azilal

-Glissements dans le Haut Atlas Occidental 2013 : Imi N'Tanout Argana PK 380 A7

-Glissements dans le Rif interne 2016 : Douar Tazarane-Ghafsai (Deux victimes)

-Glissements dans le Rif externe 2010 : A₂ Fès –Taza : Dégâts Économiques PK274

-Glissement dans l'Atlas Dir El Ksiba 2012:Collines Molassiques Fom-Taghzout

- Glissement dans l'Atlas Dir El Ksiba 2017: Collines Liasiques Sidi Bendaoud
- Glissement dans l'Atlas de Béni Mellal 2017 : Collines Liasiques des Oulad Ayyad
- Glissement de la Costa Verde 2013-2014 : Lima-Pérou- La Cote Pacifique



Figure 90: Photo panoramique du glissement de la Costa Verde au Pérou

Plus généralement, on considère trois types de mouvements de terrain: les mouvements lents et continus, les mouvements discontinus et rapides, ainsi que l'érosion littorale. CHLOE LARRE 2015.

Les glissements de terrain dans les sols argileux sont très fréquents, de l'ordre de quelques centaines par année. Ces sols se retrouvant souvent dans les régions les plus densément habitées, ils peuvent causer de très grands dommages, voire des catastrophes.

Les 2 sites ont les mêmes caractéristiques géomorphologiques qui favorisent le risque du glissement de masse, la présence des roches ignées peut donner une stabilité par endroits.

Pluies abondantes, tremblements de terre et activités humaines peuvent tous être à l'origine de glissements de terrain. Mais saviez-vous que la déforestation joue souvent un rôle déterminant dans le déclenchement de telles catastrophes. D.D.E.F.P Québec.



Figure 91 : Cartographie et situation des principaux glissements Dir El Ksiba

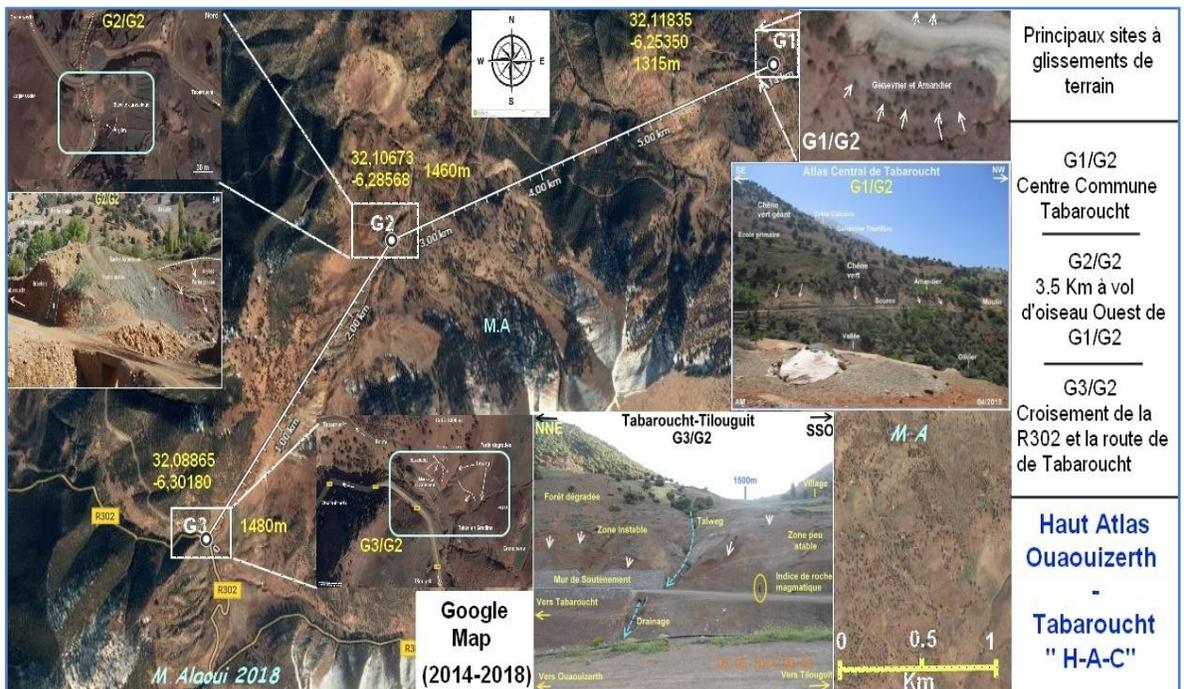


Figure 92: Cartographie des principaux points à risque de glissement de terrain Tabaroucht

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABDELOUAFI**, (2014) La composition du domaine forestier marocain
- AGS-LRM**, (2002) Australian Geomechanics Society-Sub- Committee on Landslide Risk Management Landslide Risk Management Concepts and Guidelines, Australian Geomechanics, March 2000, 49-92.
- ALAOUI, OUHAMMOU, A.BOULI, FSSM** (1985-1995) Etude écologique des espèces végétales dans les régions montagneuses de l'Atlas Marocain
- ALFONSI, P.** (1997). Relation entre les paramètres hydrologiques et la vitesse dans les glissements de terrains. Exemple de la Clapière et de Séchilienne (France). Revue française de géotechnique,
- ANTOINE P.**, (1977) – Réflexions sur la cartographie ZERMOS et bilan des expériences en cours. Bulletin du BRGM, III, 1-2, p. 9-20.
- ANTOINE P.**, (1992) – Les problèmes posés par l'instabilité des versants de grande ampleur - aspects géologiques. Bulletin AIGI, n° 45, p. 9-24.
- AVENARD J-M.**, (1965) – L'érosion actuelle dans le bassin du Sebou. Rapport de l'Institut National de Recherche Agronomique, Rabat, 114 p.
- AYALA F. J.**, (1995) – Probabilidad y vulnerabilidad en movimientos de ladera. In "Reducción de riesgos geológicos en España". Instituto Tecnológico GeoMinero España, p. 95-113.
- AZZONI A., CHIESA S., FRASSONI A., GOVI M.** (1992). The Valpola landslide. Engineering Geology
- BARROS, V.R., FIELD, C.B., DOKKEN, D.J., MASTRANDREA, M.D., MACH, K.J., BILIR, T.E., CHATTERJEE, M., EBI, K.L., ESTRADA, Y.O., GENOVA, R.C., GIRMA, B., KISSEL, E.S., LEVY, A.N., MACCRACKEN, S., MASTRANDREA, P.R., WHITE, L.L.**, (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate

Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 688 pp.

BAYNES F.J. & LEE M. (1998) –Geomorphology in Landslide Risk Analysis, an interim report. Proceedings of the Eighth Congress of the Int. Assoc. of Engineering Geologists, Balkema, 1129-1136. Les 2 sites ont les mêmes caractéristiques géomorphologiques qui favorisent le risque du glissement de masse, la présence des roches ignées peut donner une stabilité par endroits.

BELLE, P. (2014). Contribution des processus hydrologiques et hydrogéologiques aux glissements de terrain de grande ampleur : application au contexte tropical de la Réunion. Thèse de doctorat de Géologie appliquée. Université de la Réunion, 2014. Récupéré de : <http://www.theses.fr/2014LARE0022>

BENJAMIN LISAN, 2004. Avant-projet de création de haies, bocages, et saulaies, et sauvegarde du genévrier turifère, dans une vallée du Haut-Atlas (Imilchil). Lutte contre la déforestation dans le Haut Atlas Marocain.

BENOUIS, E. (2010). Etude d'un glissement de terrain par différentes méthodes. Algérie

BIENIAWSKI Z.T. (1974) –Geomechanics Classification of rock masses and its application in tunneling. Proc. 3rd Cong. ISRM, Denver, 2A, p.27.

BISHOP A.W. & MORGENSTERN N.R. (1960) - Stability coefficients for earth slopes. Géotechnique, 10, 129-150.

BOUCHAOU, PIERRE CHAUVE(1988). Hydrogéologie du bassin des sources karstiques du complexe calcaire haut-atlasien du Dir de Béni Mellal-Maroc.

BRAAM. 1987 Dendrogeomorphological analysis of mass movement a technical note on the Research method

BRABB E.E.(1984) –Innovative approaches to landslides hazard mapping. Proc. IV Int. Symp. On Landslides, Toronto, 1, 307-324.

- BRAND E., PREMCHITT J. & PHILLIPSON H.** (1984) - Relationship between rainfall and landslides in Hong Kong. In Landslides, Proc. Fourth Int. Symp. On Landslides, Toronto, Canada. Bi Tech Publishers, Vancouver, Canada.
- BROMHEAD E.N.** (1992) - The Stability of Slopes. Blackie Academic & Professional, London. ANUTI P., FOCARDI P., GARZONIO C.A. (1985) Correlation between rainfall and landslides. Proc. 27th I.G.C., Moscow. Bull. IAEG. 32, 49-54.
- CANUTI P. & CASAGLI N.** (1996) Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana. Pubbl. CNR-GNDICI n°846 (in Italian).
- CARRARA A.** (1983) – Multivariate Methods for landslide hazard evaluation. Mathematical Geol. 15(3), 403-426.
- CARRARA A.** (1984) – Landslide hazard mapping: aims and methods. Association Française de Géographie Physique. Colloque de CAEN, 141-151.
- CARRARA A., CARDINALI M., DETTI R., GUZZETTI F., PASQUI V. & REICHENBACH P.** - (1991) - GIS techniques and statistical models in evaluating Landslide hazard. Earth Surface Processes and Landforms, 16, 427-445.
- "Slope Instability", John Wiley & Sons Ltd., Chichester, chp.4, 103-142.
- CARTIER.1985** : Méthodologie d'étude des glissements de terrains, rapport interne du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.
- CHERKAOUI**, 2008. Contribution à l'évaluation de l'aléa sismique du Maroc
- CHRISTIAN CHAPEAU ET JEAN-LOUIS DURVILLE**: L'eau et les risques des glissements
- COE, J.A., GODT, J.W.**, 2012. Review of approaches for assessing the impact of climate change on landslide hazards. In: Eberhardt, E., Froese, C., Turner, A.K., Leroueil, S. (Eds.), Landslides and Engineered Slopes, Protecting Society Through Improved Understanding: Proceedings 11th International and 2nd North American Symposium on Landslides and Engine
- COLLIN. A** 1846 : Recherches sur les glissements spontanés de terrains argileux. Paris

Collectif (1994) : Surveillance des pentes instables

CROZIER M.J. (1986) - Landslides - Causes, Consequences and Environment .Croom Helm, London.

CRUDEN D. M. (1991) - A simple definition of a landslide. IAEG Bull., 43, 27-29.

CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) Landslide types and processes in Turner & Schuster, Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247, National Academy Press, Washington, D.C.

CRUDEN D.M. (1997).Estimating the risks from landslide using historical data. In Cruden & Fell, Landslide risk assessment, A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 277-284.

CRUDEN, D.M., VARNES, D.J., 1996. Landslide types and processes. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247. Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 36–75 ISSN: 0360-859X, ISBN: 030906208X

CVIJIC.J.,SIFFRE.M, (1994) La Formation des Grottes et Gouffres (Livre Manuel)

DE LA CRUZ, S. C. M. (2006). Mesure des constants élastiques du bois d'épinette noire (Piceamariana (Mill.) B.S.P.) Dans des conditions d'équilibre du séchage à basse température. Maîtrise en sciences du bois, Université Laval : Canada.

DIFFENBAUGH, N.S., FIELD, C., 2013.Changes in ecological lycritical terrestrial Climate conditions. Science 341 (6145), 486-492<http://dx.doi.org/10.1126/science.1237123>.

DIKAU R., ET SCHROTT L., (1999) – The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. Geomorphology, Vol. 30 (1-2), p. 1-12.

DIKAU, R., SCHROTT, L., 1999. The temporal stability and activity of landslides in Europe with respect to climatic change (TESLEC): main objectives and results. Geomorphology 30, 1–12. [http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x\(99\)00040-9](http://dx.doi.org/10.1016/s0169-555x(99)00040-9).

- DOE:** (1994) Department of the Environment - Landsliding in Great Britain (edited by D.K.C. Jones and E.M. Lee), HMSO, London.
- DRM-** (1990) Délégation aux Risques Majeurs - Les études préliminaires à la cartographie réglementaire des risques naturels majeurs. Secrétariat d'État auprès du Premier ministre chargé de l'Environnement et de la Prévention des Risques technologiques et naturels majeurs. La Documentation Française. 143pp.
- DSPR,** 2008 Etudes pour la réalisation d'une cartographie d'un système d'information géographique sur les risques majeurs au Maroc.
- EINSTEIN H.H.** (1988) -Special Lecture: Landslide risk assessment procedure. Proc.5th Int. Symp. On Landslides, Lausanne, 2, 1075-1090.
- EINSTEIN H.H.** (1997) Landslide risk – Systematic approaches to assessment management, in Cruden & Fell, Landslide risk assessment, A.A. Balkema, Rotterdam.
- EISBACHER G. H., ET CLAGUE J. J.,** (1984) – Destructive mass movements in high mountains: hazard and management. Geological Society of Canada, Paper 84-16, 230 p.
- EL GHARBAOUI A.,** (1981) – La terre et l'Homme dans la péninsule tingitane. Etude sur l'Homme et le milieu dans le Rif occidental. Travaux de l'Institut Scientifique, série Géologie et Géographie Physique, Rabat, n° 15, 439 p.
- EL KHARIM Y.,** (2002) – Etude des mouvements de versants dans la région de Tétouan (Rif occidental) : Inventaire, analyse et cartographie. Thèse de Doctorat Es-Sciences, Université Abdelmalek Essaadi, Tétouan, Maroc, 250p. Monographie générale Région Béni Mellal-Khenifra: Pages 6, 8, 10, 12, 21 et 22
- ESPOSITO E., PORFIDO S., SIMONELLI A. L., MASTROLORENZO G. ET IACCARINO G.,** (2000) – Landslides and other surface effects induced by the 1997 Umbria-Marche seismic sequence. Engineering Geology, n° 58, p.353-
- FARES, A.**(1994). Essai méthodologique de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. Application à l'aménagement de la ville de Taounate

- FAVRE J.-L., GERVREAU E., DURVILLE J.-L.** (1992). Prévoir l'évolution des mouvements de terrain. Revue française de géotechnique
- FEREGOTTO, M.** (2010). Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon, Lyon, France. Grenoble 7-9 juillet 2010.
- FIELD, C.B., BARROS, V.R., DOKKEN, D.J., MACH, K.J., MASTRANDREA, M.D., BILIR, T.E., CHATTERJEE, M., EBI, K.L., ESTRADA, Y.O., GENOVA, R.C., GIRMA, B., KISSEL, E.S., LEVY, A.N., MACCRACKEN, S., MASTRANDREA, P.R.,** 2014. In: White, L.L. (Ed.), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA 1132 pp.
- GAPAIS, D.** (1987). Les Orthogneiss : Structure, Mécanismes de déformation et analyse cinématique. Thèse de doctorat, université de Rennes I. Rennes, France. Consulté : <https://geosciences.univ-rennes1.fr/IMG/pdf/Gapais.pdf>
- GHENNANI, B.** (2003). Les mouvements de pente-typologie des mouvements de pente .Dynamique du glissement de terrain. Récupéré de: http://dspace.univ.tlemcen.dz/bitstream/112/5110/1/Memoire_Gheneni%20Boubekeur.pdf
- Opérations connexes de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge. (2006). Philippines : glissements de terrain.
- GILLES S., PIERRE P.** : Stabilisation des glissements de terrain,
- GUEZAL, J., EL BAGHDADI ; BARAKAT, A., ET RAIS, J.** (2009). Le magmatisme jurassique-crétacé de Béni-Mellal (Haut-Atlas central, Maroc) : géochimie et signification géodynamique. VIème Colloque International "Magmatisme, Métamorphisme et Minéralisations Associées -3MA Béni Mellal, 23-24 avril 2009 <https://www.researchgate.net/publication/280803555>

- HUNGR, O., LEROUEIL, S., PICARELLI, L.,** 2013. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11 (2), 167–194. <http://dx.doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.
- IPCC–Intergovernmental Panel on Climate Change,** 2014. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Geneva, Switzerland 151 pp.
- LACROIX PASCAL, PERFETTINI HUGO, TAIPE EDU, GUILLIER BERTRAND,** 2013 Coseismic and post seismic Motion of a landslide: Observations, modeling, and
- LARRES, C.** (2015). L'effondrement d'une partie de la montagne dans le lac du Chambon (Isère - France) est imminent, Notre-planète. Info. Consulté de : <https://www.notre-planete.info/actualites/4312-effondrement-lac-du-chambon>
- LESCA.A-M, SOPHAN,** (2007) Géologie du plateau de Valensole, coupes d'ouest en est légendées : bassin molassique, érosion de la chaîne de montagne et chevauchement ; la Durance. <http://commons.wikimedia.org/w/index.php?>
- LOPRESTI, A., CHARLAND, A., WOODARD, D., RANDERSON, J., DIFFENBAUGH, N.S., DAVIS, S.J.,** 2015. Rate and velocity of climate change caused by cumulative Carbon emissions. *Environ. Res. Lett.* 10, 095001. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/095001>.
- MALAMUD, B.D., TURCOTTE, D.L., GUZZETTI, F., REICHENBACH, P.,** 2004. Landslide inventories and their statistical properties. *Earth Surf. Process. Landf.* 29 (6), 687–711. [http:// dx.doi.org/10.1002/esp.1064](http://dx.doi.org/10.1002/esp.1064).
- MAURICE BENZAQUEN,** (1963) : Géologie d'El Ksiba et régions.
- MAYORAZ F. CORNU T. VULLIET L.** (1996). Using neural networks to predict slope movements. *Proc. International Symposium on Landslide (Trondheim)*, Balkema, pp.

MEHDI K, MANSOURI H, ALAOUI M, 2012: Rif méridional externe/Mouvements de terrains entre Taza et Fès/Risque de glissement d'un passage véhicule PV113 de l'Autoroute [A₂] Rabat-Oujda PK 274[1^{er}Congres International de Geotechnique/Lima-Peru]

M. MOUHSSINE, A. TOUZANI, S. ZINOUNE A. MAHTAL 201.Terrassements sur terrains marneux sensibles aux glissements: cas des terrains et remblais autoroutiers entre Oued Amlil et Taza (Rif du Maroc)

MONOGRAPHIE GÉNÉRALE RÉGION BÉNI MELLAL-KHENIFRA: Pages 6, 8, 10, 12,21 et 22.

PALMER J (2017). Nature News, publiée le 23 Août 2017Creeping earth could hold secret to deadly landslides; Scientists investigate why mountain slopes can slip slowly for years and then suddenly speed up, with potentially fatal effects [archive]

PARRY M.L., CANZIANI, O.F., PALUTIKOF, J.P., VAN DER LINDEN, P.J., HANSON, C.E., 2007. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK 976 pp.

Analogy with tectonic faults, *Geophysical Research Letters*, 2014, 41, doi: 10.1002/2014GL061170.

Thématique: Risques naturels et Vulnérabilité - Maca, Arequipa, Peru.

PETLEY, D., 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology* 40 (10), 927–930. <http://dx.doi.org/10.1130/G33217.1>.

PIQUE A. (1994). Géologie du Maroc. Editions PUMAG, Marrakech.284 p.

POIREE, OLLIER, 1962. Etude sur les eaux souterraines et les Réserves Utiles [RU]

POUGET P., LIVET M. (1994). Relations entre la pluviométrie, la piézométrie et les déplacements d'un versant instable (site expérimental de Sallèdes, Puy-de-Dôme). Études et recherches des LPC, GT.

- REAL, B.** (2013).Sols hydromorphes : Raisonner les applications herbicides. Arvalis_infos.fr. Institut du végétal. Consulté de : <https://www.arvalis-infos.fr/view-11966-arvarticle.html?region>
- SALHI. A**(2004) : Etude de la Vulnérabilité à la Pollution des Ressources en eaux souterraines et établissement de la carte de vulnérabilité et la carte de Risque/cas de l'aquifère de l'Oued Laou (Rif septentrional, Maroc)
- SARR BENOIT, ATTA SANOUSI ET KAFANDO LUC.** (2012) Revue des indices climatiques utilisés dans les systèmes d'assurances agricoles indicelles d'Afrique.
- SCHWEINGRUBER,** (1993). Plants and Climate Change, edited by Jelte Rozema
- SEBASTIEN GOMINET,** (200. Des Risques Majeurs des Glissements. Grenoble
- SENEVIRATNE, S.I., NICHOLLS, N., EASTERLING, D., GOODESS, C.M., KANAE, S., KOSSIN, J., LUO, Y., MARENGO, J., MCINNES, K., RAHIMI, M., REICHSTEIN, M., SORTEBERG, A., VERA, C., ZHANG, X.,** 2012. Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (Eds.), Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp. 109–230.
- SIDLE, R.C., OCHIAI, H.,** 2006. Landslides: processes, prediction, and land use. Water Resour. Mono gr. Ser. 18.AGU, Washington DC .<http://dx.doi.org/10.1029/WM018312> pp.
- SOULAIMANI A., HOEPFFNER C., BOUABDELLI M., LAVILLE E., AMRHAR M., CHALOUAN A.** (2007). Géologie du Maroc (nouvelle édition). Editions GEODE, Marrakech, 287 p.
- S. BOMONT** (2001). Le drainage profond pour la stabilisation des glissements de terrain par drains siphons et drains électropneumatiques

S.S.G.M. Société Suisse de Géomorphologie des montagnes

VERONICA OCHOA TEJEDA ET MONIQUE FORT(2011) Relation entre la pluviométrie et le déclenchement des glissements de terrain dans La Soledad, Sierra Norte de Puebla, Mexique

VILLEMIN.GERARD, (<http://villemin.gerard.free.fr/Calcul/Arctg.ht>)

VULLIET.HUTTER K. (1988).Continuum model for Natural slopes in slow movement

V.BASTONE, Y.DE LA TORRE, et Ch. GARNIER. [2010 BRGM] Rapport public
Étude préliminaire de l'impact du changement climatique sur les risques naturels à la Réunion BRGM/RPC-59495-FR Août 2011

ANNEXE

PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Congrès et Géoforums Nationaux

-Géoforum 2014: Animation d'une table ronde intitulée: L'apport de l'ingénieur géotechnicien pour la prospection et la recherche minière.

-Géoforum 2015: Vulnérabilité des infrastructures face aux glissements de terrains

Congres et Symposiums Internationaux: Communications Orales-Posters

-Mustapha Alaoui. 1^{er} Symposium Internacional de Essayos de Campo, de Laboratorio, et Instrumentacion Geotécnica Lima-Perú/ 2013-2014 Hôtel Miraflores

-Confrencia Magistrale: Mouvements de Terrains entre FES et TAZA. Études sur le Glissement d'un Remblai du Passage Véhicules PV113 de l'Axe AutoRoute « A₂ » Rabat-Oujda/Royaume du Maroc- Exposition Orale [Article en Journal International]

-Géomeeting - Exposition: Study on the Stability in Karst Limestone in the Zone of Tazayzrate- CIMAT-Beni Mellal Morocco. CIP Lima-Pérou. Décembre 2013

-Mustapha Alaoui. Housni, F.E. Najine, A. (2017). Impact of Climate Change on Landslide in the Central high Atlas of Morocco: Case of Tabaroucht. EIX Colloquio Internacional de Investigación Universitaria CIU, Centro Universitario del Sur: Ciencias, Exactas, Naturales et Tecnologia, Universidad de Guadalajara – Guzman Jalisco –Mexique.

-Exposition Poster: Impact des Changements Climatiques sur les Glissements de Terrain dans le Haut Atlas Central du Maroc-Cas du Glissement de Tabaroucht/Ouaouizerht. 23/11/2017

-Mustapha Alaoui. Contribution of Sentinel-1 data and geophysical prospecting for lineament mapping .Case of Beni Mellal Atlas and Beni Moussa Plain (Morocco).9th International Symposium on Eastern Mediterranean Geology, Turkey 2018. *I- Boutiram*

Articles et Stages Internationaux

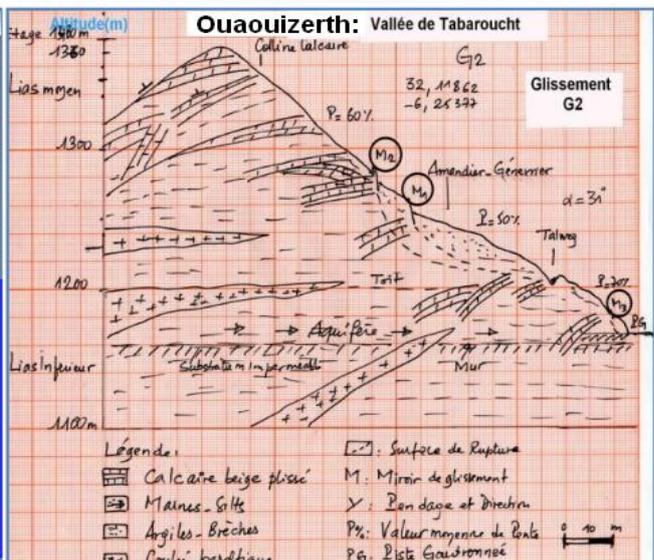
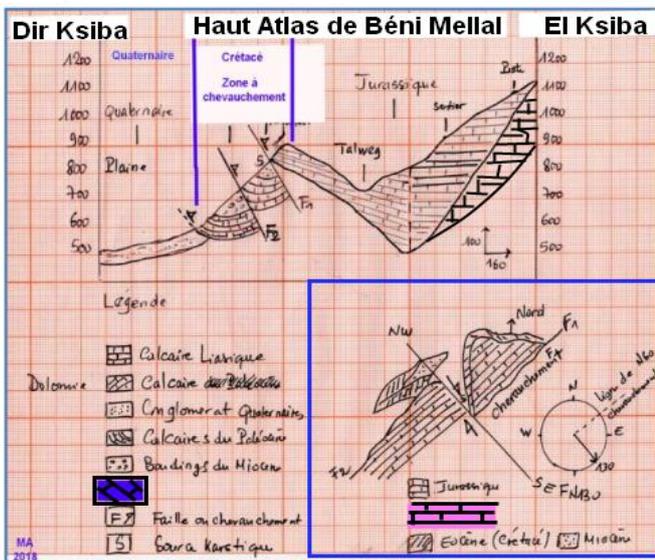
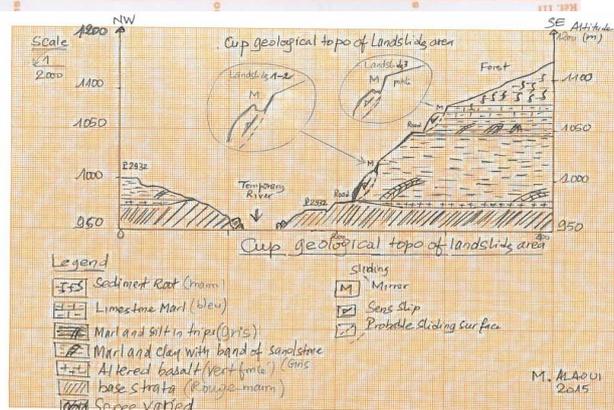
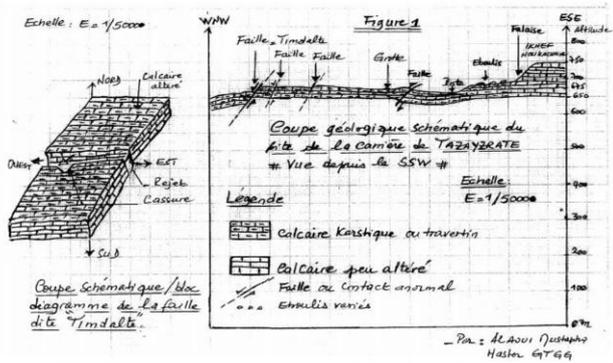
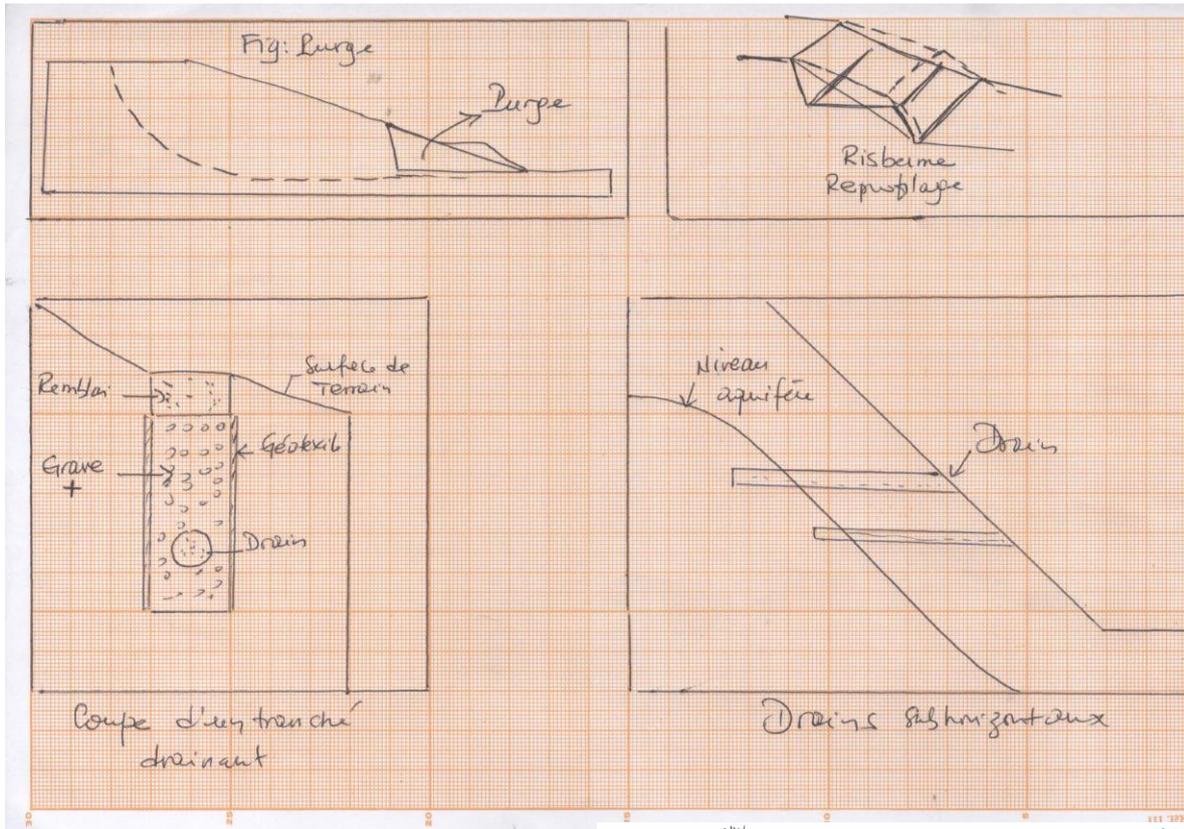
-Alaoui Mustapha. Housni, .Najine, Bracamontes Humberto, Wafik. Impact des Changements Climatiques sur le Glissement de Terrain de Tit N'Ziza Atlas Dir El Ksiba, Environments. Copy Right, IJAR, Décembre 2017

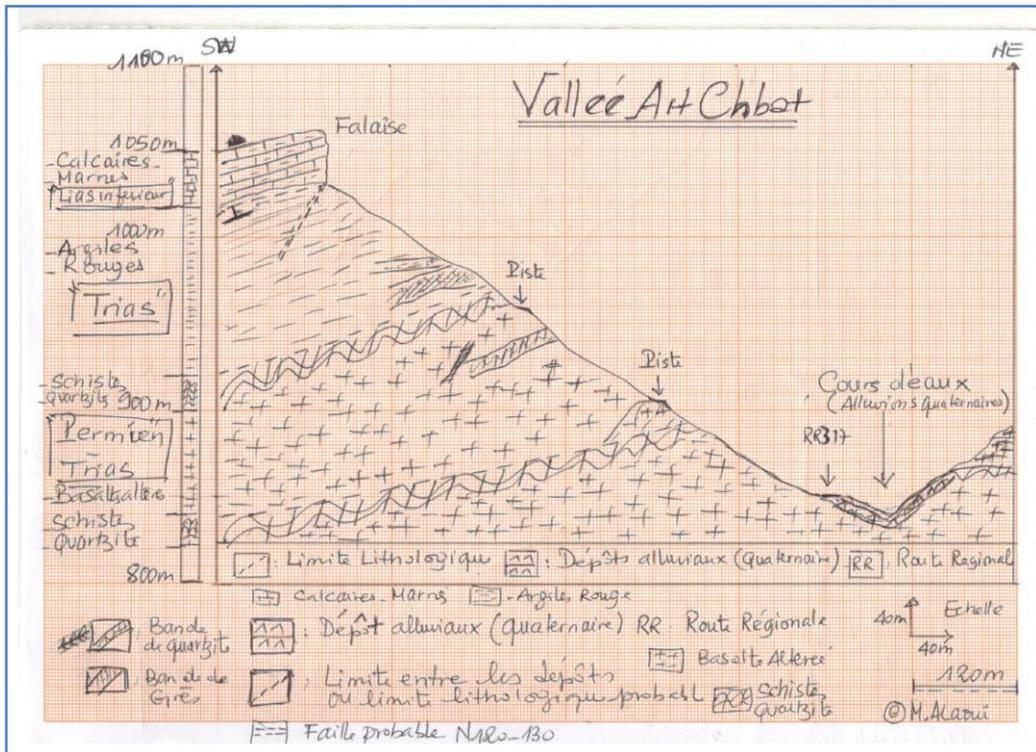
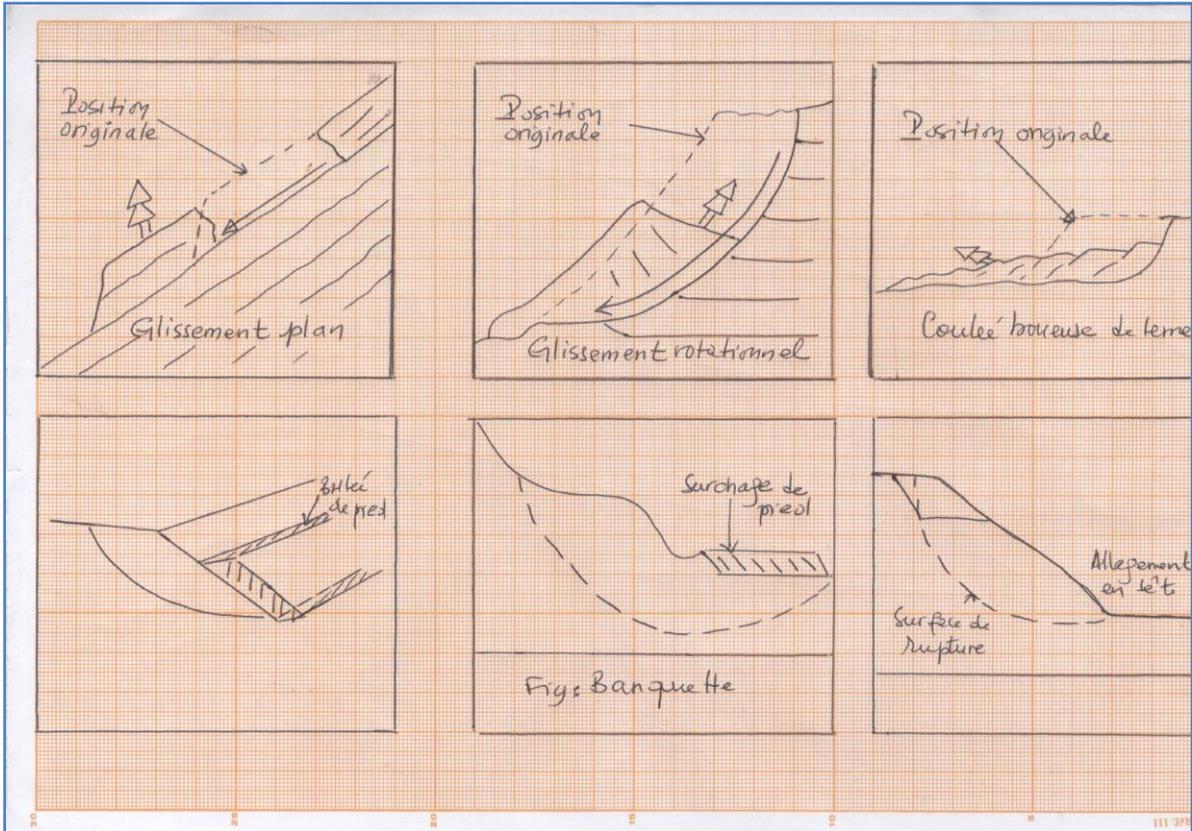
-Alaoui Mustapha. Application of Geophysics for the Detection of Derangement of Phosphate Layers in the Oulad Abdoun Basin in Morocco. Zerouali E. European Scientific Journal October 2018 edition Vol.14, No.30 ISSN: 1857 – 7881 (Print) - ISSN 1857- 7431

-Mustapha Alaoui. Landslides Susceptibility Mapping in the Municipality of Oudka Taounate, North Morocco. Full author [S. Benchalha JISRS], Hasna Chennaoui Aoudjehane.XLII-4/W12.2019

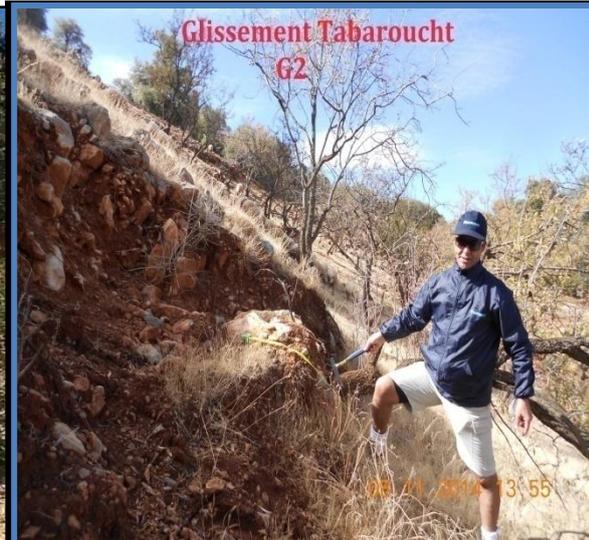
-Mustapha Alaoui. .Contribution of Sentinel-1 data and geophysical prospecting for lineament mapping .Case of Beni Mellal Atlas and Beni Moussa Plain (Morocco).

-Mustapha Alaoui. Stage Pratique International de deux mois dans le Centre de recherche en comportamiento (CICAN), Centro Universitario Del Sur: Departamento de Ciencias, Exactas, Naturales et Tecnologia, CUSUR- Guzman-Universidad de Guadalajara-Mexique.

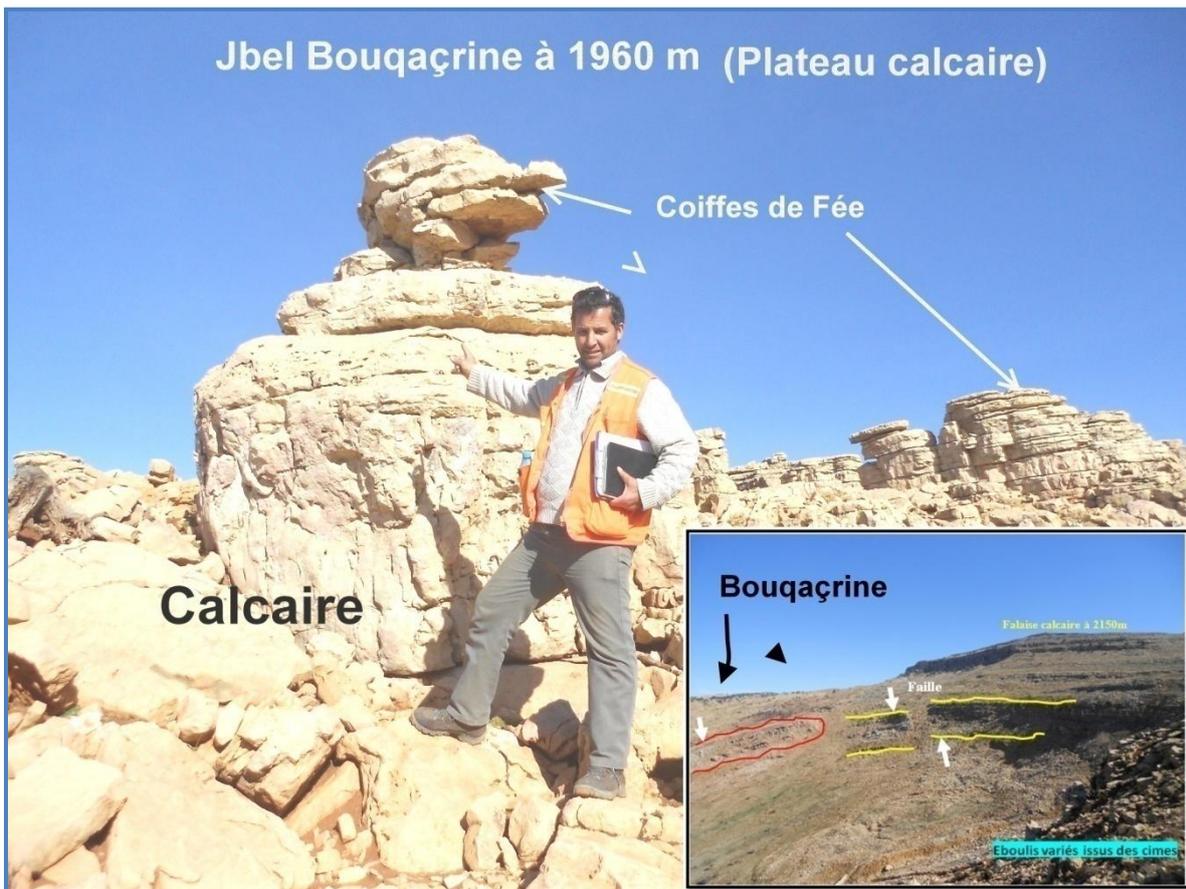




Méthodologie de cartographie des talus et versants sur terrains

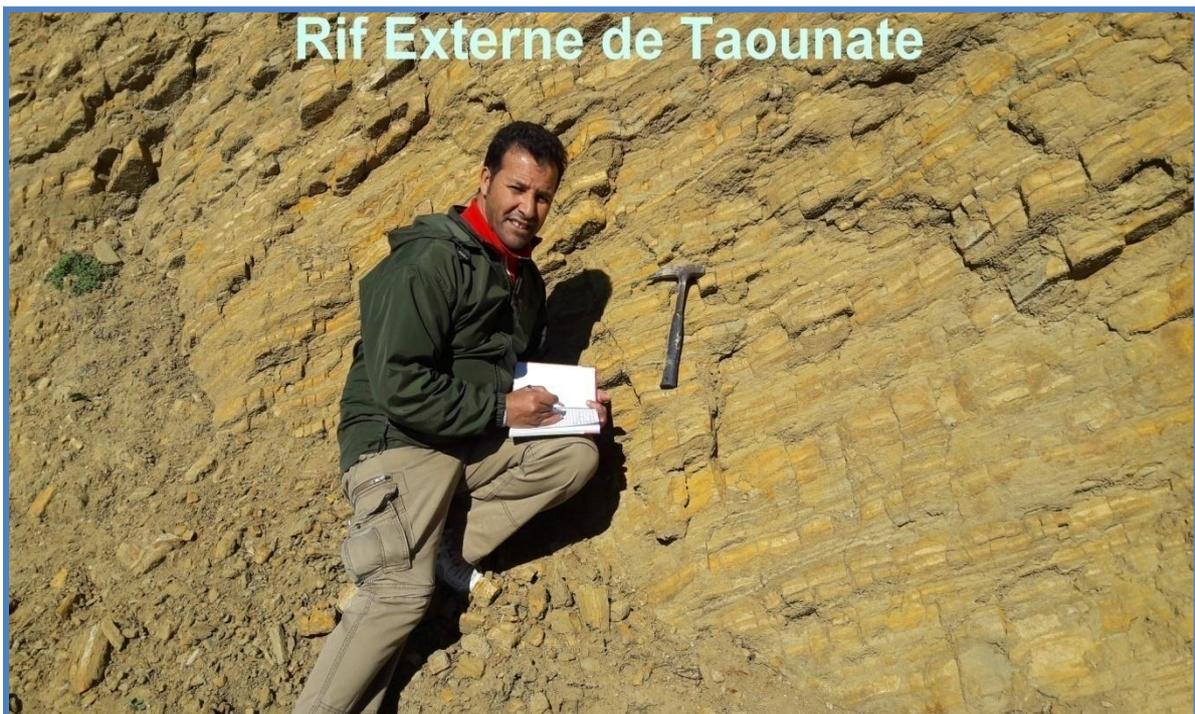


Missions et Excursions d'étude des zones à risque de glissements de terrain





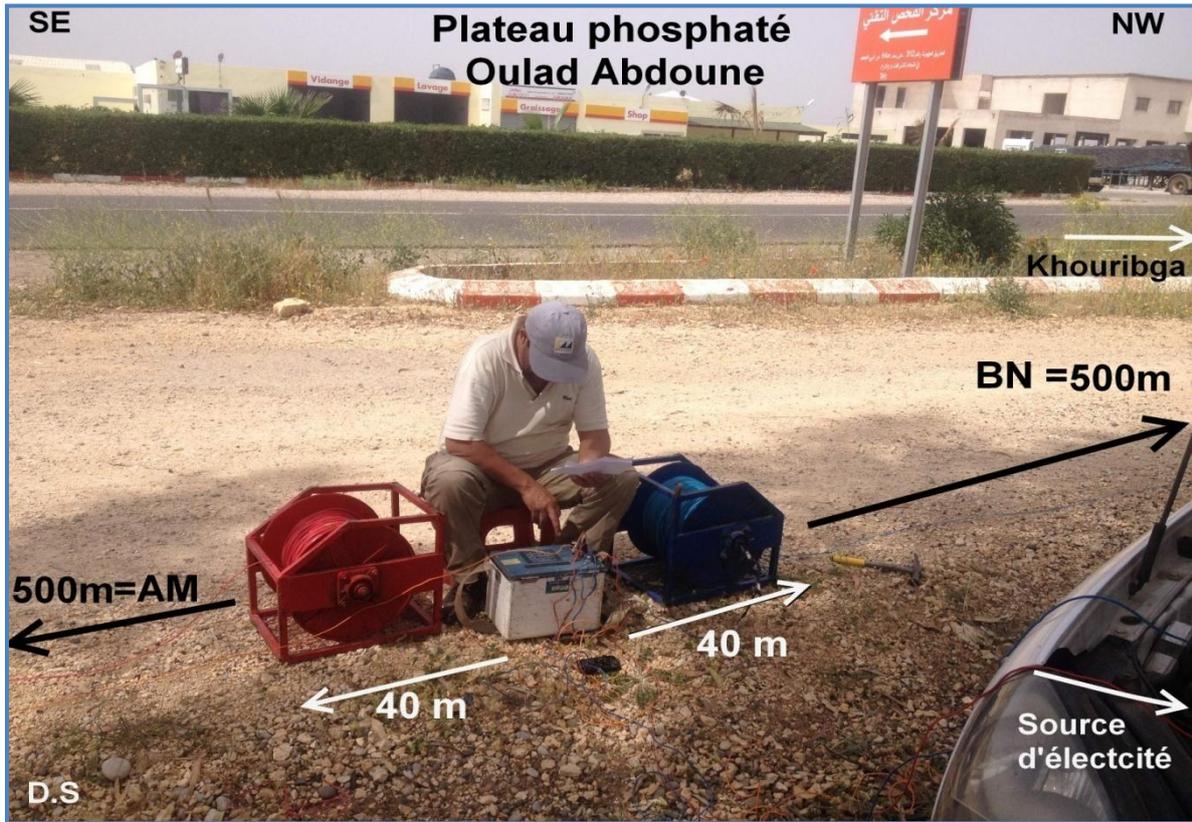
Travaux et Expertise géologique en mission de terrain (Maroc)





Mission géologique et encadrement des étudiants (Pérou-Mexique)





Travaux et Expertise géologique en mission de terrain (Maroc-Pérou)

