RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE POPULAIRE ET DÉMOCRATIQUE
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou

Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Civil

Laboratoire de Géomatériaux, Environnement et Aménagement
(LGEA)

THÈSE DE DOCTORAT

Spécialité : Génie Civil **Option : Géotechnique**

THÈME

Caractérisation et modélisation du glissement de terrain de Tigzirt sous l'effet du signal sismique de Boumerdes

Présentée par

GUIROUS Lydia

Composition du jury de la soutenance :

BAHAR Ramdane	Professeur, USTHB	Président
MELBOUCI Bachir	Professeur, UMMTO	Rapporteur
NECHNECH Ammar	Professeur, USTHB	Examinateur
BOUZELHA Karima	Professeur, UMMTO	Examinateur
DJEMAI Mohammed	Maitre de conférences A, UMMTO	Examinateur

Soutenue le …….

Résumé : *Le présent travail constitue une contribution à la caractérisation et à la modélisation numérique du glissement de terrain affectant le versant côtier du centre-ville de Tigzirt (Algérie). Ce versant est caractérisé par une pente relativement faible (de 13° à 15°), composée de deux formations géologiques principales (un substratum marneux surmonté par des dépôts quaternaires récents). Plusieurs facteurs ont agi conjointement et expliquent l'activité de ce glissement : il s'agit de l'effet des contextes géologique, morphologique et hydrogéologique du site combiné à des facteurs déclenchants d'origines diverses (anthropiques, climatiques et sismiques). Ce glissement de terrain est caractérisé par une surface de rupture plane qui mobilise un mécanisme de déformation global en translation vers la mer.*

Les résultats des calculs numériques avec le code plaxis^{2D}, tant statique que dynamique confirment l'état de stabilité précaire du versant. En effet, l'influence de l'effort sismique sur la stabilité du versant a engendré une augmentation du déplacement maximal d'environ 50% par rapport au cas statique. La surcharge et l'effet de la nappe ont une grande influence sur la réponse dynamique du versant. En effet, l'instabilité du versant s'est accentuée avec la présence de l'urbanisation particulièrement lorsque la nappe est en surface. L'action combinée (surcharge + séisme) mobilise davantage le versant avec un taux de déplacements qui augmente de 84% et la zone remaniée s'élargit sur tout le long du versant. Ce taux de déplacements et l'effet de la zone remaniée diminuent en fonction de la profondeur de la nappe.

Mots clés *: mouvement de terrain, caractérisation, SIG, modélisation, sollicitation statique, sollicitation dynamique.*

Abstract: This *work is a contribution to the characterization and the numerical modeling of the landslide affecting the coastal hillside of downtown of Tigzirt (Algeria). This hillside is characterized by a relatively low slope (13° to 15°), consisting of two main geological formations (a marly substratum surmounted by recent Quaternary deposits). Several factors have acted jointly and explain the activity of this slip: it is about the effect of the geological, morphological and hydrogeological contexts of the site combined with triggering factors of various origins (anthropic, climatic and seismic). This landslide is characterized by a plane rupture surface which mobilizes a mechanism of global deformation in translation towards the sea.*

The results of the numerical calculations with the plaxis^{2D} code, both static and dynamic, confirm the precarious state of stability of the Coastal hillside. Indeed, the influence of the seismic force on the stability of the hillside generated a maximum displacement increase of about 50% compared to the static case. The overload and the effect of the water table have a great influence on the dynamic response of the hillside. Indeed, the instability of the Coastal hillside was accentuated with the presence of the urbanization especially when the groundwater is on the surface. Combined action (overload + earthquake) mobilizes more the hillside with a displacement rate that increases by 84% and the disturbed zone expands along the entire Coastal hillside. This rate of displacement and the effect of the disturbed zone decrease as a function of the depth of the water table.

Key words: landslide, characterization, GIS, modeling, static stress, dynamic stress.

REMERCIEMENTS

A l'issue de la rédaction de cette recherche, je suis convaincue que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de « l'apprenti-chercheur ».

En premier lieu, je tiens à remercier mon directeur de thèse, monsieur ***MELBOUCI Bachir****, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, pour ses multiples conseils et pour toutes les heures qu'il a consacrées à diriger cette recherche. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande disponibilité et son respect sans faille des délais serrés de relecture des documents que je lui ai adressés. Enfin, j'ai été extrêmement sensible à ses qualités humaines d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail doctoral.*

Mes remerciements s'adresseront à Mr ***DUBOIS Laurent chef d'unité au Centre d'études Techniques de l'équipement (CETE) de Lyon(France), pour l'intérêt particulier qu'il porte aux études des instabilités qui affectent la Wilaya de Tizi-Ouzou, ainsi pour son aide lors de la rédaction de l'article de publication.***

je veux adresser tous mes remerciements aux personnes avec lesquelles j'ai pu échanger et qui m'ont aidées à réaliser ce travail parmi elles mes amies - chercheurs qui m'ont aidées de manière bénévole à noter le temps passés : DJERBAL Lynda ; KHOUDI Ibtissame ; WARDA Belhassani ; BOUZABOUDJA Aldjia ; CHABOUT Samia ; ET BAIDI Fouzia, ainsi que toutes les personnes qui ont intervenues de près ou de loin au bon déroulement de cetteThèse.

Merci à Mr Melbouci et Mr Bahar qui nous ont créé une bonne ambiance au sein du laboratoire (LGEA) Laboratoire de Géomatériaux Environnement et Aménagement de l'Université Mouloud Mammeri et qui m'ont poussé à ne jamais abandonnée et à persévérer.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille : Mes parents, mes sœurs et frères tous mes proches et amis, qui m'ont accompagnés, aidés, soutenus et encouragés tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Ces remerciements seraient incomplets si je n'en adressais pas à l'ensemble des MEMBRES du jury : ***Mr BAHAR Ramdane,*** *Professeur à l'USTHB;* ***Mr NECHNECH Ammar*** *; Professeur à l'USTHB;* ***M^{me} BOUZELHA Karima,*** *Professeur à l'UMMTO et* ***Mr DJEMAI Mohammed*** *Maitre de Conférences A à l'UMMTO, pour avoir accepté à juger ce modeste travail.*

TABLE DES MATIERES

Remerciements

Liste des figures.

Liste des tableaux

Liste des principaux symboles et notations

Introduction générale 1

CHAPITRE I : MOUVEMENTS DE TERRAIN ET SEISMES 4

I-INTRODUCTION 5

II- LES MOUVEMENTS DE TERRAIN 5

II-1. DEFINITIONS 5

II-2. LES PRINCIPAUX TYPES DE MOUVEMENTS DE TERRAIN 6

II-2-1-LES MOUVEMENTS EN PENTE 7

II-2-1-1. LES ECROULEMENTS 7

II-2-1-2. LES GLISSEMENTS 8

II-2-1-3. LES COULEES DE BOUE 10

II-3- LES GLISSEMENTS DE TERRAIN EN KABYLIE 11

III-LES RISQUES SISMIQUES 12

III-1. LES EFFETS DU SEISME SUR LES SOLS 13

III-2. LES EFFETS DE SITE 15

III-3. LIQUEFACTION DES SABLES 17

III-4. GLISSEMENT DE TERRAIN 18

III-5. L'EROSION LITTORALE 19

III-6. CONTEXTE GEODYNAMIQUE DU NORD DE L'ALGERIE 19

IV- RELATION ENTRE LES SEISMES ET LES MOUVEMENTS DE TERRAIN 22

IV-1. EBOULEMENTS ET ECROULEMENTS ROCHEUX 22

IV-2. LIQUEFACTION..... 23

IV-3. GLISSEMENT DE TERRAIN.....23

V-CONCLUSION.....26

CHAPITRE II : PRESENTATION DU GLISSEMENT DE TIGZIRT : HISTORIQUE CINEMATIQUE ET STRUCTURE INTERNE.....28

I-INTRODUCTION 29

II-PRESENTATION DU SITE ETUDIE.....30

II-1.Description du site.....31

II-1-1.Géomorphologie.....31

II-1-2.Climatologie 33

II-1-2-1.Hydrologie.....34

II-1-3.Cadre géologique..... 31

II-1-4.Cadre hydrogéologique.....37

II-1-5.Cadre géotechnique.....38

II-5-6.Cadre anthropique.....42

II-1-7. Indices d'instabilité.....42

II-2.L'évolution Du Glissement De Tigzirt Entre 2011 et2012.....46

II-2-1. Solutions d'urgence mise en œuvre par les pouvoirs publics.....48

III. CONCLUSION.....50

CHAPITRE III : CARTOGRAPHIE ET ZONATION DE L'ALEA DU GLISSEMENT DE TIGZIRT.....51

I-INTRODUCTION.....52

II-CHOIX DU LOGICIEL MAP-INFO COMME SYSTEME SIG.....53

II-1. Le calage de l'image raster et l'étude thématique 54

III- DESCRIPTION DU GLISSEMENT DU CENTRE-VILLE DE TIGZIRT 54

IV-LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE REALISE POUR TIGZIRT SOUS MAP-INFO..... 55

IV-1. La couche vectorielle des courbes de niveaux du centre-ville de Tigzirt 56

IV-2. Couche vectorielle de l'hydrologie de la zone d'étude 56

IV-3. Couche vectorielle des sondages (2009 Geomica) 57

IV-4. La couche vectorielle de la morphologie du mouvement.....59

IV-6. Géoradar.....60

IV-5. Tomographie électrique 60

IV-7. Suivi inclinométrique.....62

IV-8. Suivi piézométrique 63

IV-9. Suivi Topométrique.....64

V-LES COUPES LITHOLOGIQUES DU SITE DU CENTRE-VILLE 64

VI-ETUDE DU RISQUE POUR LE GLISSEMENT DE TERRAIN DE TIGZIRT 66

VI-1.Potentiel du risque au niveau du site de Tigzirt 66

VI-1-1.La carte du facteur géomorphologique 67

VI-1-2. La carte du facteur pentes..... 68

VI-1-3.Le paramètre lithologique 70

VI-1-5.Carte d'interprétation du risque.....71

VI-1-6.Carte des classes du risque (Figure 18) 72

V-CONCLUSION..... 74

CHAPITRE IV : REVUE DES METHODES DE CALCUL DE STABILITE SOUS SOLLICITATIONS STATIQUES ET DYNAMIQUES.....75

I-INTRODUCTION 76

II-LE CALCUL DE LA STABILITE D'UNE PENTE.....77

III-LES METHODES DE CALCUL DE STABILITE SOUS SOLLICITATION SISMIQUE 78

III-1. Méthodes reposant sur des observations.....78

III-2. Méthodes reposant sur la modélisation.....79

III-2-1. Approche de calcul pseudo-statique.....79

III-2-2. Méthode en déplacement de Newmark (1965).....81

III-2-3. Méthode de Seed et Makdisi 81

III-2-4. Méthode de Sarma (1973).....82

III-2-5. Approche de calcul dynamique direct.....83

IV. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL PLAXIS 84

V-1. Modélisation aux éléments finis du glissement de terrain de Tigzirt 85

IV-1-1. Principe de la méthode numérique évolutive 86

III. CONCLUSION.....91

CHAPITRE V : MODELISATION NUMERIQUE DU GLISSEMENT DE TIGZIRT SOUS SEISME.....92

I-INTRODUCTION 93

II-CHOIX DU CODE DE CALCUL PLAXIS^{2D} 95

III- MODELISATION AUX ELEMENTS FINIS DU GLISSEMENT DE TERRAIN DE TIGZIRT 95

III-1. Choix de la méthode de Mohr Coulomb 95

III-1-1. Principe de la méthode numérique évolutive……..96

III-1-2. Présentation du modèle……....97

III-2. Le paramètre hydraulique..... 98

III-2-1.Cas statique du versant 98

IV-RESULTATS DES CALCULS 98

IV-1.Cas statique 98

IV-1-1. Cas d'une nappe sub-affleurante (à 3 m de profondeur) 98

IV-1-2. Cas d'une nappe à 12 m de profondeur 100

IV-1-3. Interprétation et Commentaires 102

IV-1-4. Effet de la surcharge (urbanisation).....102

IV-1-4-1. Cas statique sous l'effet de l'urbanisation…….. 102

IV-1-4-2. Résultats et commentaires …… 103

IV-2. Cas dynamique.....105

IV-2-1. Etude paramétrique du versant de Tigzirt (cas dynamique).....105

IV-2-2.Le versant de Tigzirt sous l'effet de l'excitation sismique.....106

IV-2-3. Nappe à 6m de profondeur 110

IV-2-4.Nappe à 9m de profondeur 111

IV-2-5.Nappe à 12m de profondeur 113

IV-2-6. Synthèses des résultats.....115

IV-2-7. Cas dynamique avec une surcharge 116

IV-3. Synthèse des résultats 125

V-CONCLUSION.....126

V-CONCLUSION GENERALE 128

VI-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 131

Listes des Figures

CHAPITRE I :

FIGURE 1 : ECROULEMENT DU MONT GRANIER EN SAVOIE QUI FIT DES MILLIERS DE VICTIMES EN 1248 8

FIGURE 2 : GLISSEMENT ROTATIONNEL DE TALA-TEGANA – TIZI-OUZOU, 2012 9

FIGURE 3: COULEE BOUEUSE D'ILLILTEN - TIZI-OUZOU 2012 10

FIGURE 4 : ENREGISTREMENT DU MOUVEMENT DU SOL 14

FIGURE 5 : DECOMPOSITION DE L'ACTION 14

FIGURE 6 : SITUATIONS DONNANT LIEU A UN EFFET DE SITE TOPOGRAPHIQUE QUI AMPLIFIE LES OSCILLATIONS DU SOL. 16

FIGURE 7 : IMPLANTATION A LA FRONTIERE ENTRE LE ROCHER ET DES SOLS MOUS : ACTION SISMIQUE PLUS IMPORTANTE 17

FIGURE 8 : VOLCANS DE SABLE DUS A LA LIQUEFACTION DANS LES ALLUVIONS DE L'OUED CHELIFF (SEISME D'EL-ASNAM) (KAABECHE ET MEBRAK 2010) 17

FIGURE 9 : CONSTRUCTIONS EMPORTEES PAR LE GLISSEMENT DE TERRAIN.....18

FIGURE 10 : SECTATRICES POUVANT DONNER LIEU A UN GLISSEMENT DE TERRAIN DECLENCHE PAR UNE ACTION SISMIQUE 19

FIGURE 11 : CONTEXTE GEODYNAMIQUE DE L'AFRIQUE DU NORD (ARGUS ET AL. 1991 20

FIGURE 12 : GEOLOGIE DE L'ALGERIE (MINISTERE DE L'ENERGIE ET DES MINES ALGERIEN : WWW.MEM-ALGERIA.ORG) 21

FIGURE 13 : EXTRAIT DE L'ESQUISSE TECTONIQUE DE L'ALGERIE (KIEKEN, 1962 CITE PAR AFPS, 2003) 21

FIGURE 14 : FAILLE DE THENIA ET LOCALISATION DU SEISME DU 21 MAI 2003 (MEGHRAOUI, ANNEE) 22

CHAPITRE II :

FIGURE 1 : CARTE DE LOCALISATION DE LA VILLE DE TIGZIRT 30

FIGURE 2 : ÉVOLUTION DU TRAIT DE COTE AU NIVEAU DE LA ZONE INSTABLE DE TIGZIRT ENTRE 2006 ET 2011 (EN TRAIT ROUGE LA POSITION DU TRAIT DE COTE EN 2006 ET EN TRAIT JAUNE LA POSITION DU TRAIT DE COTE EN 2011) 31

FIGURE 3: CARTE GEOLOGIQUE DES FACIES RENCONTREE A TIGZIRT SELON (SAADALLAH (1992)).....34

FIGURE 4 : STRUCTURE DU MOUVEMENT DE TERRAIN DE TIGZIRT 34

FIGURE 5 : CADRE STRUCTURAL DE LA REGION D'ALGER (YELLES-CHAOUCHE A. ET AL., (2006)).....35

FIGURE 6 : L'EVOLUTION DE LA PROFONDEUR DE LA NAPPE PAR RAPPORT AU TERRAIN NATUREL PERMETTANT D'OBTENIR F=1 EN FONCTION DE L'ANGLE Φ **.....40**

FIGURE 7 : TROTTOIR EN BETON SOULEVEE AU SUD DE RN24 42

FIGURE 8 : FISSURES SUR UNE VILLA (R+1).....42

FIGURE 9: BASCULEMENT D'UNE MAISON INDIVIDUELLE PRISE DU COTE BAS DE LA RN24 43

FIGURE 10 : FISSURATION ET AFFAISSEMENT DE L'AVENUE AHMED CHAFAI SUR LA RN24 44

FIGURE 11 : ARRACHEMENT AU PIED DU GLISSEMENT D'ORDRE DE 1 M.....44

FIGURE 12 : AVANCEMENT DU TRAIT DE COTE (PRISE EN NOVEMBRE 2011) AU PIED DU VERSANT.....45

FIGURE 13 : BOMBEMENT DU TRAIT DE COTE (PRISE EN MAI 2012) AU PIED DU VERSANT 45

FIGURE 14 : EVOLUTION DES FISSURES SUR LE SOL (PRISE EN NOVEMBRE 2011) 45

FIGURE 15 : EVOLUTION DES FISSURES SUR LE SOL, ELLES S'ELARGISSENT (PRISE EN MAI 2012) 46

FIGURE 16: POTEAU CISAILLE DU BUNGALOWS 46

FIGURE 17 : ARBRE INCLINE 46

FIGURE 18 : PAS D'APPARITION DE FISSURE SUR LA ROUTE APRES AVOIR REFAIT LA CHAUSSEE (PRISE EN AVRIL 2011) 46

FIGURE 19: APPARITION DE FISSURE SUR LA ROUTE (PRISE EN JANVIER 2011) 47

FIGURE 20 : FISSURE AU NIVEAU DU MUR DE SOUTENEMENT (PRISE EN 2011).....47

FIGURE 21 : ELARGISSEMENT DE LA FISSURE AU NIVEAU DU MUR DE SOUTENEMENT (PRISE EN 2012).....47

FIGURE 22 : L'IMPLANTATION AU PIED DU VERSANT DES ARBUSTES 48

FIGURE 23 : ABONDANCE DE L'EAU (PAR LA PRESENCE DU ROSEAU).....48

FIGURE 24 : IMPLANTATION DES PUITS DRAINANTS DANS DES TERRAINS DE PARTICULIER 49

CHAPITRE III :

FIGURE 1 : REPERE DE LA CARTE DE « TIGZIRT »....53

FIGURE 2 : LOCALISATION DU GLISSEMENT DE TERRAIN DU CENTRE-VILLE DE TIGZIRT 54

FIGURE 3: LES COURBES DE NIVEAUX DU VERSANT DE TIGZIRT 55

FIGURE 4 : HYDROLOGIE DE LA VILLE DE TIGZIRT 56

FIGURE 5 : LOCALISATION DES SONDAGES ET DES PROFILS 57

FIGURE 6 : MORPHOLOGIE DU GLISSEMENT DU VERSANT DE TIGZIRT**.....59**

FIGURE 7 : REPERES DES PROFILS GEO-RADAR 60

FIGURE 8 : COUPES DE RESISTIVITE ELECTRIQUE 61

FIGURE 9: LOCALISATION DU PROFIL ELECTRIQUE TOMOGRAPHIQUE 62

FIGURE 10 : RESULTATS DE L'INCLINOMETRE (SC01) DU 21-12- 2009ANTEA-HYDRO-ENVIRONNEMENT-TTI) 62

FIGURE 11 : LOCALISATION DES PIEZOMETRES AU NIVEAU DES (SC02) ET (SC05) AVEC UN INCLINOMETRE (SC01) 63

FIGURE 12 : COUPE TRANSVERSALE REALISEE SELON LES SONDAGES SC05-SC04 (PROFIL 1DE LA FIGURE 5) 64

FIGURE 13 : PROFIL GEOLOGIQUE REALISE SELON LES SONDAGES SC05-SC03-SC02 (PROFIL 2 DE LA FIGURE 5). 65

FIGURE 14 : STRUCTURE DU MOUVEMENT DE TERRAIN DE TIGZIRT (PROFIL 3 DE LA FIGURE 5) 66

FIGURE 15 : CARTE DE SIMULATION DU RISQUE LIE A LA GEOMORPHOLOGIE.....68

FIGURE 16: CARTE DE SIMULATION DU RISQUE LIE A LA PENTE 70

FIGURE 17 : CARTE DE SIMULATION DES RISQUES LIES A LA LITHOLOGIE 72

FIGURE 18 : CARTE DE LA COMBINAISON DES FACTEURS DU MODELE D'EVALUATION DU RISQUE SOUS MAP-INFO SELON LA METHODE DE (FARES ET AL., 1994).....74

CHAPITRE IV:

FIGURE 1 : METHODE PSEUDO STATIQUE(TERZAGHI1960) 81

FIGURE 2 : COURBE INTRINSEQUE DU MODELE DE MOHR COULOMB 86

FIGURE 3: PROFIL U GLISSEMENT DE TERRAIN DE TIGZIRT 89

CHAPITRE V:

FIGURE 1 : COURBE INTRINSEQUE DU MODELE DE MOHR COULOMB 96

FIGURE 2 : PROFIL DU GLISSEMENT DE TERRAIN DE TIGZIRT 99

FIGURE 3: CHAMPS DE DEPLACEMENTS TOTAUX CAS D'UNE NAPPE EN SURFACE ‖U‖=1.14 M 100

FIGURE 4 : COURBE DE LA VARIATION DU COEFFICIENT DE SECURITE EN CAS D'UNE NAPPE SUB-AFLEURANTE 100

FIGURE 5 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS D'UNE NAPPE EN SURFACE 101

FIGURE 6 : COURBE DE LA VARIATION DU COEFFICIENT DE SECURITE AVEC LA NAPPE A 12M DE PROFONDEUR. **.....102**

FIGURE 7 : CHAMPS DE DEPLACEMENTS TOTAUX : CAS D'UNE NAPPE A UNE PROFONDEUR DE 12M ‖U‖=0.35 M**.** 102

FIGURE 8 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS D'UNE NAPPE 12 M DE PROFONDEUR 103

FIGURE 9: CHAMPS DE DEPLACEMENTS TOTAUX SOUS L'EFFET DE L'URBANISATION**.** 105

FIGURE 10 : COURBE DE VARIATION DU COEFFICIENT DE SECURITE SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET UNE NAPPE SUB-AFFLEURANTE 105

FIGURE 11 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS D'UNE NAPPE EN SURFACE ET SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE 106

FIGURE 12 : LE SIGNAL SISMIQUE DE BOUMERDES DU 21-05-2003 107

FIGURE 13 : REPARTITION DES DEGATS DU SEISME DE BOUMERDES (SOURCE : HTTP://AZURSEISME.FREE.FR/INDEX.HTML).....107

FIGURE 14 : LOCALISATION DES STATIONS D'ENREGISTREMENTS SISMIQUES DU 21-05-2003 DE BOUMERDES ...108

FIGURE 15 : CHAMPS DE DEPLACEMENTS TOTAUX CAS DYNAMIQUE AVEC UNE NAPPE EN SURFACE ‖U‖=2.145 M 109

FIGURE 16:LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS DYNAMIQUE AVEC UNE NAPPE EN SURFACE. 109

FIGURE 17 : DESAMPLICATION DU SIGNAL SISMIQUE DE BOUMERDES DE 21-05-2003 110

FIGURE 18 : CALCUL DU COEFFICIENT DE SECURITE DYNAMIQUE CAS D'UNE NAPPE EN SURFACE.....110

FIGURE 19:CHAMPS DE DEPLACEMENTS TOTAUX CAS DYNAMIQUE AVEC UNE NAPPE A 6M DE PROFONDEUR ‖U‖=0.377 M.....111

FIGURE 20 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS DYNAMIQUE AVEC UNE NAPPE A 6M DE PROFONDEUR.....111

FIGURE 21 : CALCUL DU COEFFICIENT DE SECURITE DYNAMIQUE : CAS D'UNE NAPPE A 6M DE PROFONDEUR**.**

.....112

FIGURE 22 : CHAMPS DE DEPLACEMENTS TOTAUX CAS DYNAMIQUE AVEC UNE NAPPE EN SURFACE ‖U‖=0.368M113

FIGURE 23 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS DYNAMIQUE AVEC UNE NAPPE A 9M DE PROFONDEUR.....113

FIGURE 24 : CALCUL DU FS DYNAMIQUE CAS D'UNE NAPPE A 9M DE PROFONDEUR.....114

FIGURE 25 : CHAMPS DE DEPLACEMENTS TOTAUX CAS DYNAMIQUE AVEC UNE NAPPE A 12M DE PROFONDEUR ‖U‖=0.368 M 115

FIGURE 26 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS DYNAMIQUE AVEC UNE NAPPE A 12M DE PROFONDEUR 115

FIGURE 27:CALCUL DU FS DYNAMIQUE : CAS D'UNE NAPPE A 12M DE PROFONDEUR 116

FIGURE 28 : CHAMPS DE DEPLACEMENTS TOTAUX ‖U‖=12.92M SOUS L'EFFET D'URBANISATION ET EXCITATION SISMIQUE 118

FIGURE 29 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS D'UNE NAPPE AU NIVEAU DU TERRAIN NATUREL ET SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET UNE EXCITATION SISMIQUE.....119

FIGURE 30:AMPLIFICATION DU SIGNAL SISMIQUE AU NIVEAU DE LA COUCHE REMANIEE EN-DESSOUS DE LA SURCHARGE 120

FIGURE 31 : COURBE DE VARIATION DU COEFFICIENT DE SECURITE SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET D'UN SEISME A UNE NAPPE QUI AFFLEURE LE NIVEAU DU TERRAIN NATUREL 120

FIGURE 32 : CHAMPS DE DEPLACEMENTS‖U‖=0.6067M DU VERSANT SOUS L'EFFET D'EXCITATION SISMIQUE ET UNE NAPPE A 6M DE PROFONDEUR AVEC SURCHARGE.....121

FIGURE 33 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS D'UNE NAPPE A 6M DE PROFONDEUR ET SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET UNE EXCITATION SISMIQUE.....121

FIGURE 34 : COURBE DE VARIATION DU COEFFICIENT DE SECURITE SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET D'UN SEISME.....122

FIGURE 35: CHAMPS DE DEPLACEMENTS‖U‖=0.386M DU VERSANT SOUS L'EFFET D'EXCITATION SISMIQUE ET UNE NAPPE A 6M DE PROFONDEUR AVEC SURCHARGE. 123

FIGURE 36:LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS D'UNE NAPPE A 9M DE PROFONDEUR ET SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET UNE EXCITATION SISMIQUE 123

FIGURE 37 : COURBE DE VARIATION DU COEFFICIENT DE SECURITE SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET D'UN SEISME POUR UNE NAPPE DE PROFONDEUR 9M.....124

FIGURE 38:CHAMPS DE DEPLACEMENTS‖U‖=0.386M DU VERSANT SOUS L'EFFET D'EXCITATION SISMIQUE ET D'UNE NAPPE A 12M DE PROFONDEUR.....125

FIGURE 39 : LOCALISATION DES ZONES PLASTIFIEES DU VERSANT POUR LE CAS D'UNE NAPPE A 12M DE PROFONDEUR ET SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET UNE EXCITATION SISMIQUE. 125

FIGURE 40 : COURBE DE VARIATION DU COEFFICIENT DE SECURITE SOUS L'EFFET D'UNE SURCHARGE ET D'UN SEISME POUR UNE NAPPE DE PROFONDEUR DE 12 M.....126

Listes des Tableaux

CHAPITRE I :

TABLEAU 1 : HISTOIRE DE CERTAINS SEISMES QUI ONT INDUITS DES GLISSEMENTS DE TERRAIN, [KEEFER, 2002].

.....24

TABLEAU 2 : VALEURS DES ACCELERATIONS MAXIMALES ENREGISTREES PAR LE CGS (AFPS, 2003) : OU G=10 M/S² DESIGNE L'ACCELERATION DE LA PESANTEUR. 26

CHAPITRE II :

TABLEAU 1 : ÉVOLUTION DE LA PLUVIOMETRIE DANS LA REGION DE TIGZIRT D'APRES L'ANRH DE TIZI-OUZOU (RESULTATS DE LA STATION EL AZAIEB MIZRANA EN MM).....32

TABLEAU 2 : CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES MATERIAUX QUI COMPOSENT LE VERSANT DE TIGZIRT.. 39

TABLEAU 3 : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES MATERIAUX QUI COMPOSENT LE VERSANT DE TIGZIRT. 39

CHAPITRE III :

TABLEAU 1 : VALEURS DES INDICES EN FONCTION DES SECTEURS GEOMORPHOLOGIQUES FARES ET AL., (1994). .67

TABLEAU 2 : CLASSEMENT DES INDICES EN FONCTION DU FACTEUR DE RISQUE. 68

TABLEAU 3 : CLASSEMENT DES INDICES EN FONCTION DES PENTES DES VERSANTS. 69

TABLEAU 4 : CLASSEMENT DES PENTES DES VERSANTS EN FONCTION DU FACTEUR DE RISQUE.....69

TABLEAU 5 : INDICES DE RISQUE ATTRIBUES AUX DIFFERENTES CLASSES DE PENTES EN FONCTION DE LA LITHOLOGIE.....70

TABLEAU 6 : VALEURS DES INDICES ATTRIBUEES AUX DIFFERENTS FACIES GEOLOGIQUES**.**. 71

TABLEAU 7 : CLASSEMENT DES FACIES GEOLOGIQUES EN FONCTION DU FACTEUR DE RISQUE**.** 71

TABLEAU 8 : PRESENTATION DES DOUZE ZONES DES SOMMES INDICIAIRES 73

TABLEAU 9 : LES CLASSES DE DANGERS GENEREES PAR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN DANS LA VILLE DE TIGZIRT SELON LA METHODE DE FARES ET ALL, (1994). 73

TABLEAU 10 : CLASSES DE DANGERS GENEREES PAR LES GLISSEMENTS DE TERRAIN DANS LA VILLE DE TIGZIRT VU SUR LE TERRAIN.....74

LISTE DES PRINCIPAUX SYMBOLES ET NOTATIONS

Notation	**Définition**
Ű(t)	Accélération à l'instant t.
Ú(t)	Vitesse à l'instant t.
U(t)	Déplacement à l'instant t.
γ_d (kN/m^3)	Poids volumique sec
γ_{sat} (kN/m^3	Poids volumique saturé
C (kPa)	Cohésion
φ	Angle de frottement interne du matériau
E (MPa)	Module de Young
ν	Coefficient de Poisson
(SC0 i)	Sondage carotté avec son numéro
Ig	Indice du risque lié à la géomorphologie
Ip	Indice du risque lié à la pente
Il	Indice du risque lié à la lithologique
I_{risk}	Indice du risque
a_h	Accélérations pseudo-statiques horizontale
a_v	Accélérations pseudo-statiques verticale
k_h	Coefficient sismique horizontal
k_v	Coefficient sismique vertical
δ	Déplacement relatif
A'	Valeur limite d'une accélération
Am	Accélération moyenne induite
$K_{rupture}$	Accélération de rupture
σ_n	Contrainte normale
τ	Contrainte de cisaillement
ΣMsf ou Fs	Coefficient total de sécurité
c_m	Cohésion mobilisée du critère de Mohr-Coulomb
φ_m	Angle de frottement interne mobilisé du critère de Mohr-Coulomb

INTRODUCTION GENERALE

Les glissements de terrain dans les formations meubles sont répandus en Algérie et particulièrement en Kabylie. En effet, la morphologie du Nord algérien, caractérisée essentiellement par des montagnes de pentes raides, donne souvent lieu à des mouvements de terrains d'intensité variable. Les cas de désordre liés à cet aléa sont de plus en plus nombreux et leurs conséquences de plus en plus lourdes. Les facteurs à l'origine de ces glissements sont principalement liés à la structure géologique, aux conditions hydro-climatologiques et à la topographie de la région, ainsi qu'au facteur sismique. Mais leurs mécanismes d'évolution ne sont pas totalement connus, d'où il est difficile d'établir des prévisions fiables.

Notre étude est basée sur la ville de Tigzirt fondée dans des terrains marneux surmontés par des dépôts quaternaires récents fissurés. Cette ville balnéaire est affectée par plusieurs instabilités de terrain. Elle a subi et elle continue de subir des déformations importantes. Ce mouvement est actif et étendu ; il affecte une grande superficie couvrant la majeure partie de la ville et s'étend sur une grande longueur d'ordre de 1,5 Km. Ce versant côtier d'une inclinaison d'environ 13°se déforme avec un mouvement lent et progressif vers le Nord (la mer) et il s'effectue à l'interface entre le substratum marneux et les couches superficielles. De nombreux indices de glissement ont été observés : fissurations des constructions, inclinaisons de certaines constructions, endommagement des conduites d'eaux ; l'ouverture centimétrique de joints de rupture ; des niches d'arrachement, des affaissements et des dégradations au niveau des routes.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux causes du déclenchement du mouvement du versant sous sollicitations sismiques. En effet, les phénomènes d'effets de site seraient responsables du déclenchement de nombreux glissement dans le monde. Cependant la caractérisation de ce site a nécessité d'étudier tous les aspects : caractéristique géomorphologique, géologique, hydrologique, anthropique, géotechnique ainsi que l'aspect géodynamique : la cinématique et la structure interne de ce mouvement.

Cette étude se concentre aussi sur l'évaluation des niveaux de risque de l'amorce et la réactivation du glissement de terrain de Tigzirt ainsi que les dangers causés par ces instabilités pour la population et l'environnement bâti. Une cartographie de ce glissement et

les risques liés à ces mouvements sont également menés dans le cadre de ce travail. De plus, cette étude a permis de classer une grande zone de la ville en zone dangereuse.

L'objectif de cette thèse est de contribuer à mieux connaître les causes de ce glissement puis d'étudier, par la modélisation numérique avec le code de calcul par éléments finis Plaxis, l'influence du signal sismique sur l'instabilité et les caractéristiques du mouvement du versant sous sollicitations sismiques.

Pour mener à bien ce travail, nous avons réparti la thèse en cinq chapitres :

Dans le **premier chapitre**, quelques généralités ont été rappelées sur les mouvements de terrain ainsi sur les phénomènes géodynamique et leur induction des effets de site et la liquéfaction. Il y a différents types de mouvements de versant qui varient en fonction, de leur fréquence et de leur impact sur les populations et l'environnement. L'analyse des bases de données mondiales a montré que l'étude de la stabilité dynamique de pentes argileuses a fait l'objet relativement de peu d'études jusqu'à présent.

Le **deuxième chapitre** Constitue une contribution à l'étude des causes, et à la caractérisation du glissement de terrain affectant le versant côtier du centre ville de Tigzirt. Plusieurs facteurs ont agi conjointement et expliquent l'activité de ce glissement : il s'agit de l'effet des contextes géologique, morphologique et hydrogéologique du site combiné à des facteurs déclenchant d'origines diverses (anthropiques, climatiques et sismiques). Ce glissement est caractérisé par une surface de rupture plane qui mobilise un mécanisme de déformation global en translation vers la mer.

Le troisième chapitre présente toutes les informations recueillies sur le site de Tigzirt permettant de réaliser des études thématiques sous forme de couches vectorielles à l'aide d'un système géographique Map-info. Ceci nous a facilité l'établissement des coupes lithologiques. En outre, le risque (ou la probabilité d'occurrence), la réactivation et l'activation que pose l'instabilité du versant dans cette région a été évalué, ce qui permet de prédire son évolution dans le temps sur un plan géo-spatial.

Le **quatrième chapitre** décrit les méthodes d'analyse dynamique des glissements des massifs de sol en pente sous séisme. En effet, les méthodes traditionnelles utilisées pour traiter le problème de stabilité des pentes reposent sur des approches statiques simples (calcul en équilibre limite par la méthode des tranches). Ces approches, quoique pratiques, ne sont pas rigoureuses puisqu'elles ne tiennent pas compte de l'action sismique sur les terrains en

pente. Les progrès récents réalisés dans les domaines de l'informatique et du calcul conduisent à une meilleure maîtrise du problème de stabilité sismique des pentes.

Le **cinquième chapitre** comporte la modélisation numérique de la stabilité du versant de Tigzirt par le code de calcul Plaxis. Dans cette étude, trois paramètres ont été variés: la profondeur de la nappe phréatique, la surcharge représentant l'urbanisation, et l'effet de la sismicité représenté par le signal sismique de 21-05 -2003 de Boumerdes. Un calcul de stabilité du versant a été réalisé tant avec la méthode statique qu'avec la méthode dynamique. La comparaison des résultats obtenus a été discutée en fonction du coefficient de sécurité, des déplacements, de la localisation des zones plastifiées et des trois paramètres (nappe, surcharge et sismicité).

CHAPITRE I

MOUVEMENTS DE TERRAIN ET SEISMES

I-INTRODUCTION

De nombreuse région dans le monde sont confrontées à des phénomènes naturels susceptibles de provoquer des catastrophes. Ces phénomènes sont d'origines très variées : les séismes et les éruptions volcaniques, hydro-météorologique et les inondations, ou bien encore géomorphologique avec les mouvements de terrain. Ces phénomènes naturels se répartissent un peu partout. En Afrique, leur fréquence et leur intensité sont relativement faibles par rapport à certaines régions du monde telles que le Japon ou la Chine.

Ces risques naturels majeurs sont la combinaison d'un aléa (le phénomène naturel) et d'une vulnérabilité liée à la présence humaine (personnes, habitations, activités économiques, infrastructures, etc.) car des zones urbaines ont progressé au pied ou sur les flancs de versants de stabilité précaire.

D'une grande diversité, les mouvements de terrain se rencontrent principalement en zones de montagnes (instabilité de versants et de falaises) mais aussi en plaines, plateaux ou côte. Ils sont responsables de dommages et de préjudices importants et coûteux. Ils peuvent être à l'origine d'enjeux socio-économiques et humains qui dépassent largement les possibilités de prévention des collectivités concernées.

La prédiction des mouvements de terrains pendant un séisme est un challenge très important dans le domaine de la géotechnique. Beaucoup de facteurs prédisposant, déclenchant ou révélateurs tels que les caractéristiques géotechniques, les conditions de site et le séisme, influencent le comportement des pentes (naturelles ou artificielles). Ainsi, le séisme est un facteur déclic qui affecte fortement la stabilité des pentes.

II- LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

II-1. Définitions

Un mouvement de terrain est un déplacement plus ou moins brutal du sol ou du sous-sol. Il est fonction de la nature et de la disposition des couches géologiques, qui sont représentées sous différents aspects :

En plaine :

- Un affaissement plus ou moins brutal de cavités souterraines naturelles ou artificielles (mines, carrières...) ou un effondrement en « fontis »,

- Un phénomène de gonflement ou de retrait lié aux changements d'humidité de sols argileux (à l'origine de fissurations du bâti),

- Un tassement des sols compressibles (vase, tourbe, argile...) par surexploitation.

En montagne :

- Des glissements de terrain par rupture d'un versant instable,

- Des écroulements et chute de blocs,

- Des coulées boueuses et torrentielles.

Sur le littoral :

- Des glissements ou écroulements sur les côtes à falaises,

- Une érosion sur les côtes basses sablonneuses.

Dans leur principe, ***les mouvements de terrain*** sont bien compris : ils surviennent lorsque la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs qui peuvent être : dû à l'effet de la gravité, de l'eau, des séismes ou des actions anthropiques. Leur dynamique répond naturellement à des lois de la mécanique.

Ces mouvements de terrain présentent une typologie très variée en terme de :

• Forme (glissement plan, rotationnel, solifluxion...),

• Ampleur (quelques mètres cubes jusqu'à plusieurs millions de mètre cubes),

• Cinématique (entre quelques millimètres par an et plusieurs mètres par seconde).

II-2. Les principaux types de mouvements de terrain

Les mouvements de terrain sont des phénomènes géologiques qui évoluent dans le temps avec des phases de mouvements lents, des phases catastrophiques ou des périodes de rémission. Parmi les principaux types de mouvements de terrain liés à la vitesse du mouvement, on distingue deux catégories :

- ***Les mouvements lents et continus tels que*** **:** les tassements et affaissements Le retrait-gonflement des argiles et Les glissements de terrain.
- ***Les mouvements rapides et discontinus tels que*** **:** les effondrements et les écroulements et les chutes de blocs.

II-2-1-Les mouvements en pente

Ils constituent la classe la plus vaste d'aléas. Ce sont des mouvements obliques, qui affectent les pentes tant naturelles qu'artificielles, écroulements, coulées, glissements …. Les causes de ces mouvements sont nombreuses ; les principales sont d'ordre :

- Hydrogéologique : altération de matériau, accumulation d'eau souterraine…
- Mécanique : vibrations, suppression de butée, affouillement en pied de pente et/ou accroissement de poussée, surcharge en tête…

Les mouvements de pente peuvent être activés par : un séisme ; des précipitations excessives ; des ruptures de canalisations d'eau ou d'assainissement ; un défaut de drainage ; une construction mal implantée ou mal conçue ou un soutènement inadapté.

II-2-1-1.Les écroulements

Les écroulements rocheux occupent une place prépondérante dans la morpho-dynamique des parois de haute montagne et représentent des risques pour les hommes et les infrastructures. Ces risques sont aujourd'hui probablement accrus du fait de la dégradation accélérée de la paroi rocheuse, conséquence du réchauffement climatique actuel. En dégradant ces joints de glace, le réchauffement climatique pourrait ainsi être en partie responsable du déclenchement des écroulements rocheux en haute montagne. Les autres facteurs d'instabilité tels que les fortes précipitations ou les séismes ne doivent pas être négligés, tout comme les caractéristiques (topographie, géologie) des versants.

« Les écroulements sont considérés comme toute chute soudaine d'une masse rocheuse qui tombe en se désorganisant (Flageollet, J.C. 1989) » ; l'écroulement a un volume supérieur à plusieurs dizaines de mètres cubes, ce qui le distingue des chutes de pierres ou de blocs d'après Flageollet J.C. 1989 et Ravanel et al, 2003.

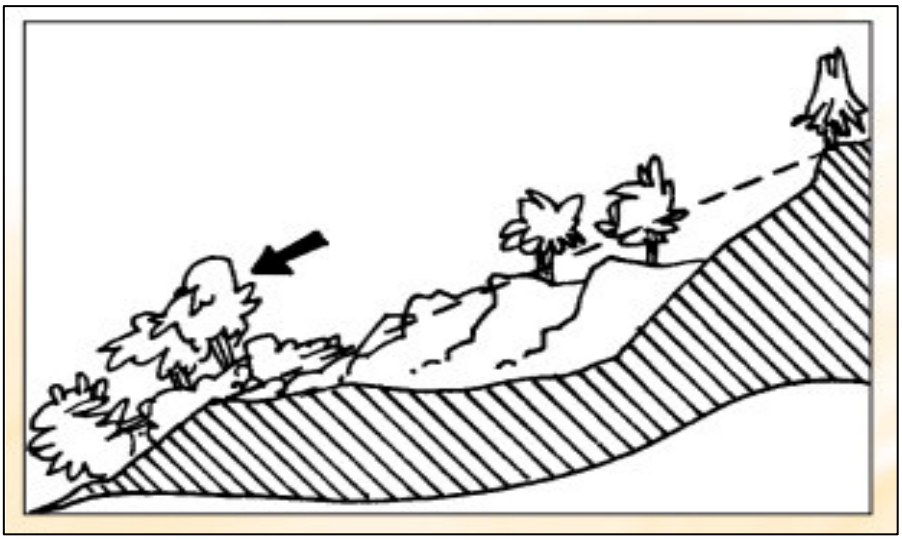


Figure 1 : Ecroulement du Mont Granier en Savoie qui fit des milliers de victimes en 1248.

II-2-1-2. Les glissements

Un glissement de terrain correspond à un déplacement généralement lent (de quelques millimètres par an à quelques mètres par jour) sur une pente, le long d'une surface de rupture ***dite surface de cisaillement***, d'une masse de terrain cohérente, de volume et d'épaisseur variables : quelques mètres cubes dans le cas du simple glissement de talus ponctuel à quelques millions de mètres cubes dans le cas d'un mouvement de grande ampleur pouvant concerner l'ensemble d'un versant. Pour mieux comprendre le fonctionnement d'un glissement, il est nécessaire d'étudier les quatre points suivants :

* La caractérisation de la structure interne du terrain à l'aide de données géophysiques, géotechniques et géomorphologiques ;

* Les spécificités hydrologiques et hydrogéologiques du versant et la caractérisation des paramètres hydrodynamiques des corps aquifères qui le composent ;

* La caractérisation de la cinématique du versant en surface et en profondeur à partir d'un réseau de surveillance et la mise en évidence des variabilités spatiales et temporelles des déplacements actuels ;

* L'identification de seuils piézométriques ou pluviométriques qui expliqueraient le déclenchement des instabilités brusques et saisonnières ;

Un manque ou une mauvaise interprétation d'un des quatre points va générer des conséquences de la gestion du risque suite aux différentes crises d'accélération et d'évaluation

du risque actuel à partir des conséquences potentielles et des scénarios d'extension du glissement.

Trois types de glissement sont distingués en fonction de la géométrie de la surface de rupture :

- Glissement plan translationnel le long d'une surface plane ;
- Glissement circulaire ou rotationnel, le long d'une surface convexe ;
- Glissement quelconque ou composite lorsque la surface de rupture est un mélange des deux types.

***Glissement plan* :** il se produit suivant un plan, le plus souvent au niveau d'une zone de discontinuité entre deux matériaux de nature différente. La ligne de rupture suit une couche mince de mauvaises caractéristiques sur laquelle s'exerce souvent l'action de l'eau. Une telle couche est appelée « couche savon ».

***Glissement rotationnel* :** ce type de glissement est très fréquent. Le terrain glisse le long d'une surface concave ayant la forme d'une cuillère. La partie supérieure affaissée se scinde en blocs surmontés d'escarpement de failles. La partie inferieure évolue en une coulée plus ou moins développée.

Glissement quelconque : Le mouvement est très semblable au précédent dans son allure externe, mais la (ou les) surface (s) de rupture est (sont) de forme générale convexe et passe (nt) au travers de différents niveaux de faiblesse du massif. Les mouvements complexes sont par définition l'association de plusieurs types de mouvements qui se déclenchent, soit ensemble, soit successivement.

Figure 2: Glissement rotationnel de Tala-Tegana – Tizi-Ouzou, 2012.

II-2-1-3. Les coulées de boue

Ce phénomène affecte principalement les régions tropicales, favorisé par une pluviométrie intense et un complice l'homme, responsable de la déforestation. Outre la stratigraphie, l'eau joue un rôle important dans le déplacement des matériaux. Ces coulées sont composées d'au minimum 30 % d'eau et 50 % de limons, vases et autres matériaux argileux, elles coulées se distinguent par la disparition des structures de la roche ou du sol, par une vitesse de déplacement plus grande (jusqu'à 80 km/h), par une consistance plus ou moins pâteuse des matériaux mélangés et transportés, tantôt grossiers, plus souvent hétérogènes. Elles naissent principalement sur des versants à de fortes précipitations, après un séisme ou une éruption volcanique.

Une coulée peut se déplacer sur des pentes très faibles, de quelques degrés, même quand les fragments solides représentent 80 à 90 % du poids de sa masse totale. La vitesse et la distance parcourue dépendent de la nature des matériaux, la quantité d'eau, la viscosité du mélange eau-matériau, la topographie, la saturation en eau des sols sur lesquels elle se déplace. Une coulée de boue se caractérise presque toujours par la présence :

- d'une zone supérieure élargie (rassemblement de matériaux par exemple au pied d'un glissement, zone de départ de la coulée) ;
- d'un chenal d'écoulement beaucoup plus étroit et de longueur extrêmement variable (zone de transfert) ;
- d'un lobe terminal (zone d'accumulation) élargi en une sorte de cône de déjection mais de profil convexe.

Figure 3: Coulée boueuse d'Illilten - Tizi-Ouzou 2012.

II-3- Les Glissements de terrain en Kabylie

La géomorphologie du nord algérien étant caractérisée essentiellement par des montagnes de pentes raides et abruptes, les mouvements de terrain constituent l'un des risques naturels les plus répondus. Ce phénomène est observé dans plusieurs wilayas du pays : Alger, Constantine, Mila, Média, Tizi-Ouzou, etc. La région de la Kabylie connait ces dernières années une activité intense de cet aléa ; plusieurs versants naturels connaissent des mouvements de terrain plus au moins étendus et actifs, notamment des glissements de terrains et des coulées boueuses. Plusieurs versants de la région de la Kabylie connaissent et/ou ont connu des mouvements de terrain plus au moins importants, certains sont actifs depuis quelques années et engendrent des dommages et des pertes considérables qui pèsent sur l'économie des communes concernées. Les facteurs à l'origine de ces glissements sont principalement liés à la structure géologique, aux conditions hydro-climatologiques et à la topographie de la région. Mais leurs mécanismes d'évolution ne sont pas totalement connus, d'où il est difficile d'établir des prévisions fiables.

En outre, l'évaluation de la stabilité d'une pente constitue l'un des problèmes les plus complexes de la géotechnique Plusieurs facteurs interviennent généralement simultanément et leur évaluation (quantification) est souvent très difficile et très variable d'une part, et d'autre part, il faut les déceler et déterminer leur influence tout en considérant que chaque cas est un cas particulier. En fait, les causes pouvant déstabiliser un versant initialement stable ou réactiver une ancienne instabilité découlent de plusieurs origines. Il est donc nécessaire de connaître la structure du versant, sa morphologie, les conditions climatiques et hydriques de la région, et surtout l'activité de l'homme. Tout en sachant que L'une des principales causes du déclenchement des glissements de terrain étant d'origine hydraulique, la compréhension du fonctionnement hydrologique des pentes instables est nécessaire dans l'étude des mouvements de terrain.

Les incertitudes sur les analyses de stabilité des pentes classiques ne permettent pas de mesurer les déformations et les déplacements accompagnant un glissement de terrain. Les techniques de surveillance et d'évaluation des mouvements constituent un moyen important permettant l'analyse et l'évaluation du potentiel de risque d'un glissement de terrain.
Le secteur littoral Algérien dont la région de Kabylie ainsi que ces zones intérieurs représentent un bon exemple de territoire à risque. Dans cette thèse, on étudiera le glissement de « Tigzirt », où l'on constate ces dernières années une concentration croissante

des populations et des activités largement rassemblées sur les franges côtières. Ces populations sont alors fortement exposées à diverses problématiques comme le recul du trait de côte, les inondations par submersions marines, et les effondrements de falaises ou les glissements de terrain.

III-LES RISQUES SISMIQUES

On appelle tremblement de terre ou séisme toute secousse (vibration de la surface de la Terre) ou série de secousses plus ou moins violentes du sol. Le séisme se traduit essentiellement par une rupture brutale au sein de l'écorce terrestre selon différents types de failles et de mécanismes, et par une émission d'ondes élastiques (longitudinales ou de cisaillement) dont l'énergie mise en jeu est évaluée par la magnitude. Par conséquent, les mouvements de la croûte terrestre génèrent des ruptures ayant pour conséquence la mise en vibration du sol.

Les conséquences de ces effets seront prises en compte dans les calculs (choix des spectres par exemple), puisqu'ils entraînent des effets directs (effets de site) sous forme de mouvements forts (à proximité de l'épicentre) ou de mouvements faibles (loin de l'épicentre), et des effets induits sous forme de grandes déformations conduisant à des liquéfactions et des mouvements de terrain (glissements, éboulements, tassements et affaissements….).

Quand l'énergie du séisme est supérieure à la capacité de vibration du terrain, alors celui-ci devient instable et se rompt. D'où la création de nouvelles fractures qui peuvent engendrer des glissements de terrain.

Selon l'origine du séisme, on distingue les séismes d'origine tectonique et ceux d'origine non-tectonique.

- Les séismes ***d'origine tectonique*** sont directement liés aux mouvements de l'écorce terrestre le long de failles. C'est les plus importants (95 % des séismes enregistrés), les plus destructeurs et peuvent affecter de grandes superficies.
- Les séismes ***d'origine non-tectonique*** peuvent être provoqués par des éruptions volcaniques, l'effondrement de cavités souterraines naturelles ou par de gros glissements de terrain. Ces séismes sont en général de faible intensité et concernent des superficies limitées.

Dans la plupart des régions sismiques du monde, les séismes de magnitude supérieure à 4 sont susceptibles de déclencher des glissements de terrain. Dans le courant du 20^{ième} siècle, Keefer (1984) puis Rodriguez et al (1999) ont dénombré entre 100 000 et 1 000 000 de mouvements

de versant générés par des séismes : ce sont essentiellement les chutes de blocs, les glissements rotationnels des sols et les glissements de masses des sols fragmentés ou déstructurés.

En Algérie, Durant les dernières années, l'accroissement régulier des secousses dans la région ainsi que l'apparition de phénomènes dynamiques ont conduit à fragiliser les couches superficielles. En outre, La présence de nombreuses failles et discontinuités tectoniques majeures dans la région soulève l'hypothèse de mécanisme de séismes induits, pouvant jouer un rôle important dans le chargement dynamique des couches superficielles.

III-1. Les effets du séisme sur les sols

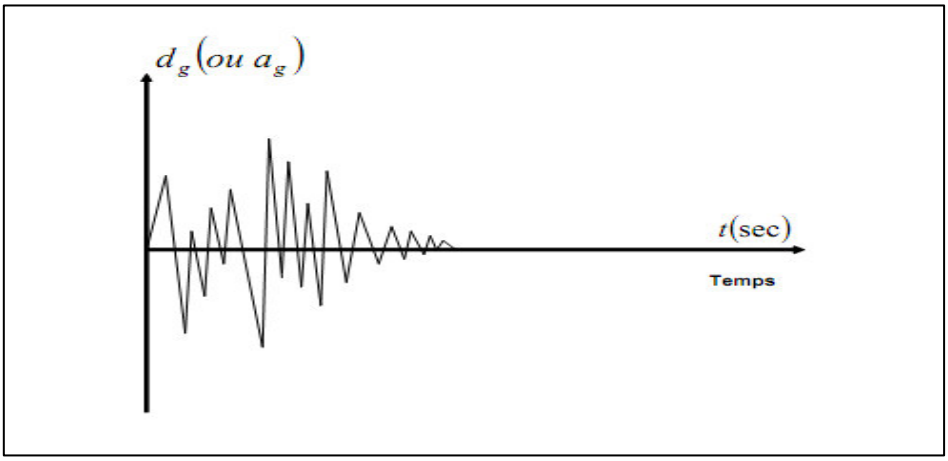
Lorsqu'une onde sismique se propage dans le sous sol, ses effets en surface sont amplifiés ou décroissent en fonction de plusieurs facteurs :

- La distance au lieu de rupture (le foyer du séisme ou épicentre) ;
- Les effets du site dus au comportement souvent non linéaire des ondes dans les couches géologiques superficielles peu consolidées ;

Les ondes sismiques générées lors du séisme sont responsables des effets destructeurs. La connaissance des caractéristiques de ces différents types d'ondes et de leurs conditions de propagation permet de prévoir leur action sur un sol. Parmi les principales ondes sismiques, les ondes P (les premières arrivées, les plus rapides) soumettent le sous sol à la compression et des dilatations successives. Les ondes S (les secondes arrivées) font bouger le sous sol suivant un mouvement cisaillant. Comme, elles se propagent dans tout le milieu, on les appelle les ondes de volume. D'autres ondes se propagent uniquement à la surface de la terre. De ce fait, elles ont une amplitude plus grande que les ondes de volume et provoquent la majorité des dégâts. Ce sont les ondes de Rayleigh et les ondes de love : on les appelle les ondes de surface.

L'action d'un tremblement de terre se traduit par un déplacement du sol, variable dans le temps $d_g(t)$, qui implique des composantes de translation U(t) et de rotation $\theta(t)$ alternées. L'action sismique peut être aussi déterminée à l'aide de l'accélération du sol (ou accélérogramme) $a_g(t)$ en translation et en rotation. Les composantes de rotation ont généralement des effets négligeables. La composante de translation verticale est plus faible que les composantes horizontales. Le principal effet du tremblement de terre est donc un mouvement horizontal du sol (Garcia 2007).

Pour les ingénieurs, les paramètres les plus utiles sont soit les lois de déplacements du sol $d_g(t)$ et des accélérogrammes $a_g(t)$ (Fig. 1), soit des données plus globales, appelées spectres de réponse, établies à partir de ces accélérogrammes.



4

Figure4 : Enregistrement du mouvement du sol.

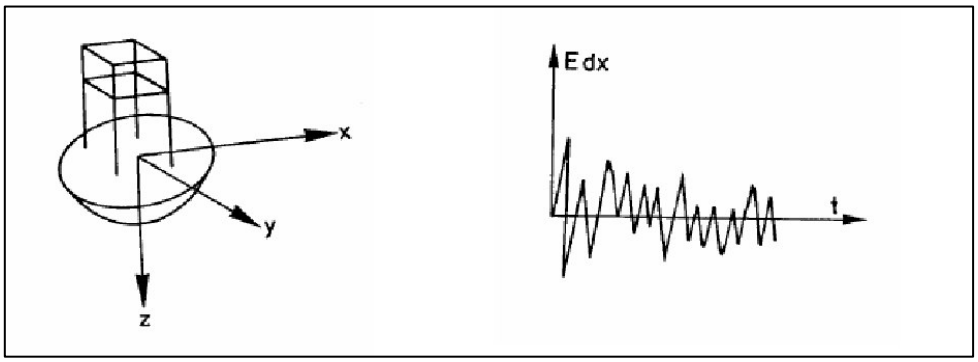


Figure 5 : Décomposition de l'action.

Lorsqu'on applique à un système un séisme sous forme d'un accélérogramme $a_g(t)$, l'équation de mouvement d'oscillations forcées est la suivante (Principe fondamental de la dynamique) :

$M\ \ddot{U}(t)+C\ \dot{U}(t) + K\ U(t)=-M\ a_g(t)$……(1)

Où $\ddot{U}(t)$, $\dot{U}(t)$ et $U(t)$ sont respectivement l'accélération, la vitesse et le déplacement de l'oscillateur simple à l'instant t.

L'oscillateur simple est caractérisé par sa période propre $T=2\pi(M/K)^{1/2}$ (sa fréquence d'oscillation $f=1/T$ ou sa pulsation $\omega=2\pi f$) et par son amortissement relatif $\xi=C/C_0$, avec C_0 étant l'amortissement critique tel que si $C>C_0$ l'oscillateur retourne au repos sans oscillation (amortissement important), si $C<C0$ l'oscillateur s'amortit avec des oscillations périodiques

sinusoïdales ;Le comportement des oscillateurs est considéré comme élastique linéaire et est déterminé pour un amortissement relatif ξ constant et égal à 5% (art. 3.4 et art. 5.2.3.3 note (a) du RPA. 2003). L'équation (1) peut donc être résolue (détermination de Ű(t), Ú(t) et U(t)) soit analytiquement (intégrale de Duhamel) soit numériquement.

D'abord il faut chercher l'amplitude maximale de la réponse de l'oscillateur simple en accélération, en vitesse ou en déplacement. Les résultats sont ensuite reportés dans un graphique en fonction de la période T ou de la fréquence f ; Ce calcul est ensuite appliqué à de multiples oscillateurs simples, en faisant varier leurs périodes propres T. La série de valeurs discrètes S(Ti) obtenues représente le spectre de réponse d'une variable physique donnée S correspondant à l'accélérogramme $a_g(t)$. Lorsque la variable S est une accélération, on note A(T).

Si l'oscillateur est infiniment rigide ($K\rightarrow\infty$, $T=0$) : l'oscillateur subit alors l'accélération maximale du sol A_{max} sans déformation. Si l'oscillateur est infiniment flexible ($K=0$, $T\rightarrow\infty$), l'oscillateur ne subit aucune accélération mais subit exactement le déplacement maximal du sol D_{max} (mouvement d'un corps rigide).

III-2. Les effets de site

Les sismologues parlent d'effet de site, lorsque les ondes sismiques se trouvent fortement modifiées par les caractéristiques géologiques ou topographiques qui peuvent amplifier ou atténuer les secousses :

- La ***nature du sous-sol*** joue par exemple un rôle fondamental. Un substrat meuble va amplifier considérablement les mouvements par rapport à un socle rocheux.
- Les secousses sont également amplifiées par la ***topographie locale***. Les mouvements sont alors beaucoup plus forts sur le haut d'une colline, d'une butte ou sur le rebord d'une falaise

Cependant, en ce qui concerne la nature du sol et les effets liés au site, l'avis d'un géotechnicien peut être nécessaire ; cela revient à connaitre les caractéristiques et la constitution du sol in situ.

Lorsque les sols sont hétérogènes ou de faibles caractéristiques, on observe que les dommages sismiques au sol sont particulièrement élevés. D'une part, ces sols subissent des mouvements plus importants que les sols fermes et, d'autre part, ils donnent souvent lieu à des tassements

différentiels non négligeables. Par conséquent, pour une évaluation de la vulnérabilité d'une construction aux séismes, il est important de s'informer de la nature du sol de fondation.

Les sols particulièrement dangereux sont les alluvions molles, les sables lâches, les argiles molles ou silteuses et les remblais peu consolidés (Zacek, (2014)).

La quantification du rôle des effets de site dans le déclenchement des mouvements de versant sous sollicitations dynamiques ne peut se faire que si l'on a une bonne connaissance de l'évolution des propriétés mécaniques des sols (Bourbeau, 2005). En outre, d'après bourbeau, l'étude des effets de site topographique et lithologique combinés au sein des versants a montré qu'un signal sismique à basse fréquence produit des amplifications fortes et pérennes sur un plus grand volume sous la crête des versants qu'un signal sismique de haute fréquence.

Selon de nombreux auteurs (Bourdeau 2005; Del Gaudio&Wasowski, 2007; Havenith et al. 2003), les effets du site, phénomène conduisant à la modification des caractéristiques spectrales, spatiales et temporelles du signal sismique en fonction des conditions géologiques et topographiques locales, contribuent de façon significative au déclenchement des mouvements des versants sous sollicitations dynamiques.

Certaines caractéristiques de site peuvent considérablement amplifier les oscillations du sol. Cette amplification se produit essentiellement :
- sur les reliefs et en haut d'une brisure de pente (fig. 2).
- à la frontière entre des sols rocheux et des sols mous (fig. 7).

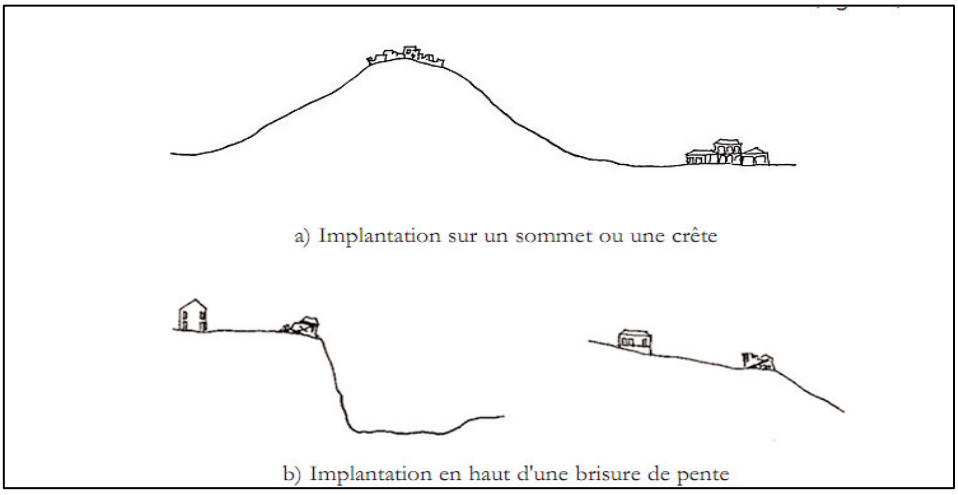


Figure 6 : Situations donnant lieu à un effet de site topographique qui amplifie les oscillations du sol.

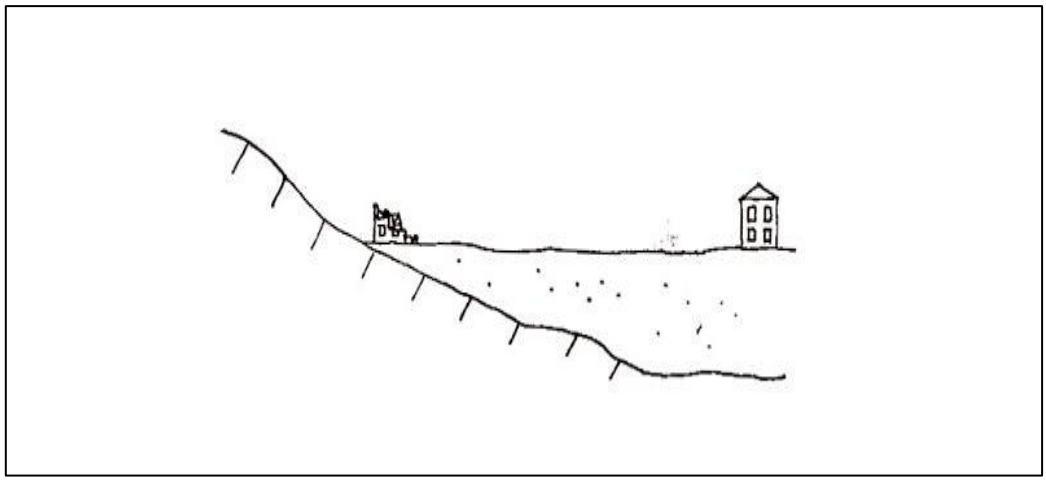


Figure 7 : Implantation à la frontière entre le rocher et des sols mous : action sismique plus importante.

III-3. Liquéfaction des sables

Les sables fins saturés d'eau, que l'on trouve fréquemment près des cours d'eau et sur le littoral, peuvent perdre presque toute leur capacité portante sous l'effet de secousses sismiques. Les constructions qui y sont fondées s'enfoncent alors dans le sol ou basculent (fig.4). La susceptibilité de liquéfaction peut être déterminée facilement in situ par des essais SPT (standard pénétration test) ou au pénétromètre statique. Le recours à un géotechnicien spécialisé est nécessaire.

Figure 8 : Volcans de sable dus à la liquéfaction dans les alluvions de l'oued Cheliff (séisme d'El-Asnam) (KAABECHE et MEBRAK 2010).

III-4. Glissement de terrain

Sur les versants, les glissements de terrain déclenchés par un tremblement de terre ne sont pas rares. En général, ils entraînent la perte totale des ouvrages exposés (fig.4). Le danger est parfois visible sur le terrain. Les pentes présentant des bourrelets ou des arbres inclinés sont souvent la proie d'un glissement lent, pouvant être précipité par un séisme (fig. 5a). De même, des terres retenues par un mur de soutènement non parasismique ou sans barbacanes (fig. 5b), ou des terrains surchargés (fig. 24c), peuvent devenir instables sous l'action sismique.

D'une manière générale, l'avis d'un géotechnicien ou géologue sur le risque de glissement est souhaitable.

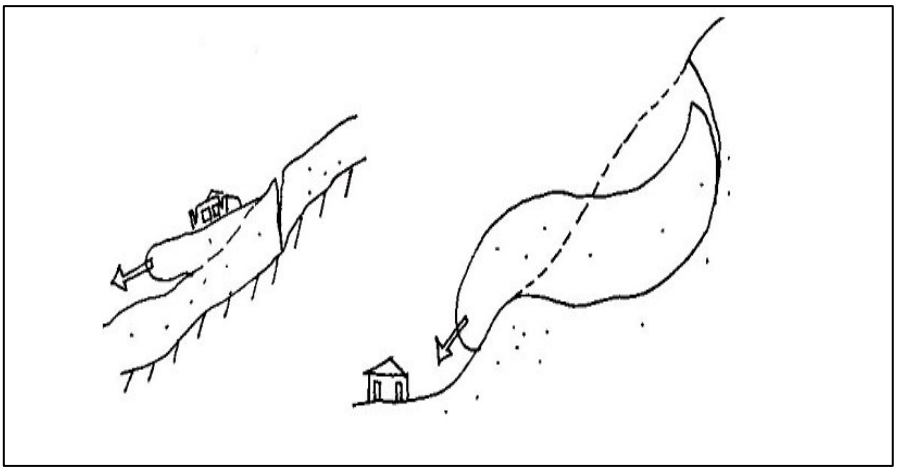


Figure 9 : Constructions emportées par le glissement de terrain.

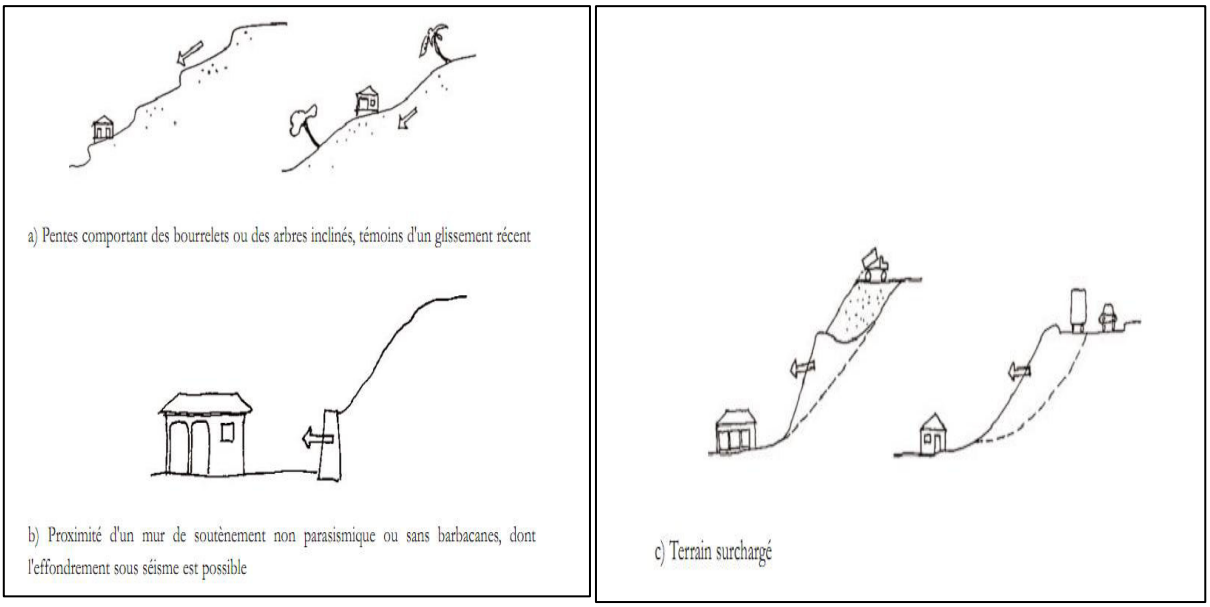


Figure 10 : Sectatrices pouvant donner lieu à un glissement de terrain déclenché par une action sismique.

Les effets induits par les séismes ne se limitent pas uniquement aux glissements, nous pouvons aussi les effets induits comme les tsunamis ; les éboulements rocheux, les écroulements …etc.

III-5. L'érosion littorale

Les zones littorales sont soumises à un recul quasi généralisé : glissements ou effondrements dans le cas de côtes à falaises (Nord-Pas-de-Calais, Normandie, Côte Basque), érosion dans le cas de côtes basses sableuses : chaque année 800 km reculent de 1m et 1000 km reculent de 0,5 m, côte du Sud de l'Europe.

Le plus souvent lente et progressive (inférieure à 0,5 m/an), cette érosion peut être spectaculaire, brutale et très dommageable (de 5 à 10 m en un seul hiver en Vendée, 100 m en 2 heures à la Pointe de la Courbe), sous certaines conditions défavorables (conjonction de fortes marées et de tempêtes).

III-6. Contexte géodynamique du nord de l'Algérie

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique : le Nord du pays porte l'empreinte de la tectonique alpine tandis que le Sud formé par la plate-forme saharienne est relativement stable et la tectonique y est moins prononcée. Par ailleurs, l'Algérie est située sur une limite majeure entre deux plaques tectoniques : la plaque Eurasienne et la plaque africaine. Le séisme de Zemmouri-Boumerdes survenu le 21 mai 2003

est lié à un contexte tectonique compressif créé par la remontée Nord-Ouest de la plaque africaine contre la plaque eurasienne. D'après le modèle global (Argus et al., 1991,FPS,2003), la vitesse de raccourcissement entre les deux plaques est estimée entre 5 et 6 mm/an dans la région d'Alger (Figure 11).

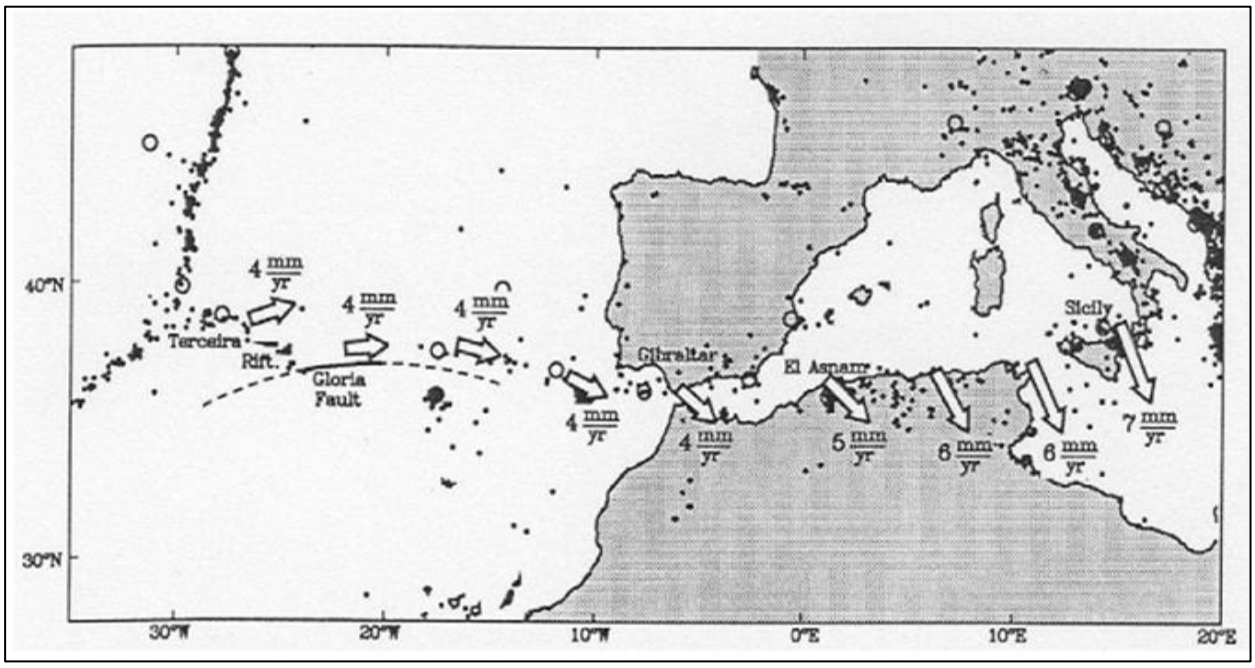


Figure 11 : Contexte géodynamique de l'Afrique du Nord (Argus et al. 1991).

L'affrontement entre les deux plaques a donné naissance notamment à la chaîne de l'Atlas Tellien. Ce massif forme une zone complexe constituée de nappes mises en place au Miocène inférieur (Figure 12) (Seddiki, 2008).

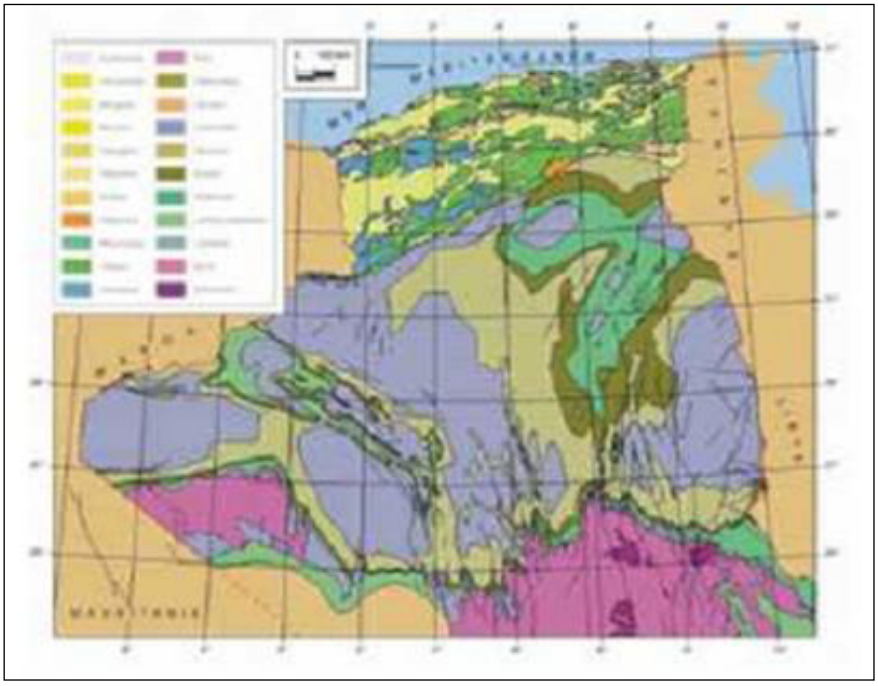


Figure12 : Géologie de l'Algérie (Ministère de l'énergie et des mines Algérien : www.mem-algeria.org).

La tectonique est celle de la collision Afrique-Europe. Le Nord de l'Algérie a été victime de nombreux séismes qui sont majoritairement des séismes en faille inverse en accord avec le mouvement général de compression à la frontière des plaques tectoniques Eurasie et Afrique. La figure 13 présente un extrait de l'esquisse tectonique du Nord de l'Algérie.

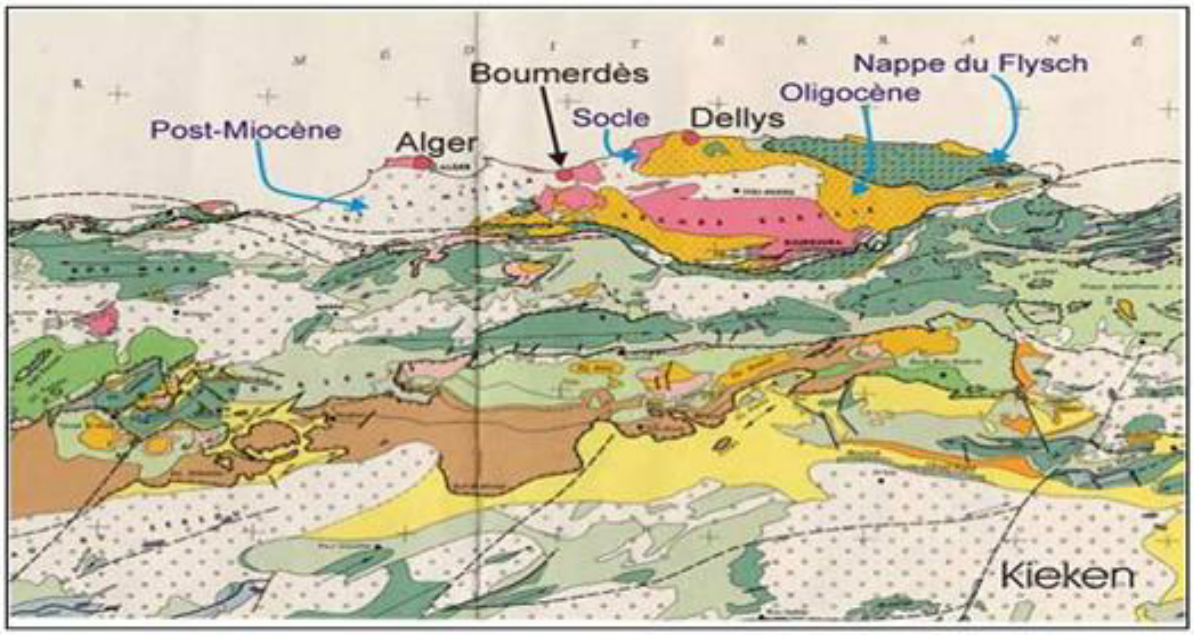


Figure 13 : Extrait de l'esquisse tectonique de l'Algérie (Kieken, 1962 cité par AFPS, 2003).

Les cartes sismo-tectoniques disponibles pour le Nord de l'Algérie font état de deux types de failles. D'une part des failles décrochantes dont la faille de Thénia (Figure 14) et, d'autre part, des failles en compression avec des prolongements marins probables. Ainsi les failles bordant la Mitidja et le Sahel se continueraient en mer au large de la côte entre Boumerdès et Dellys.

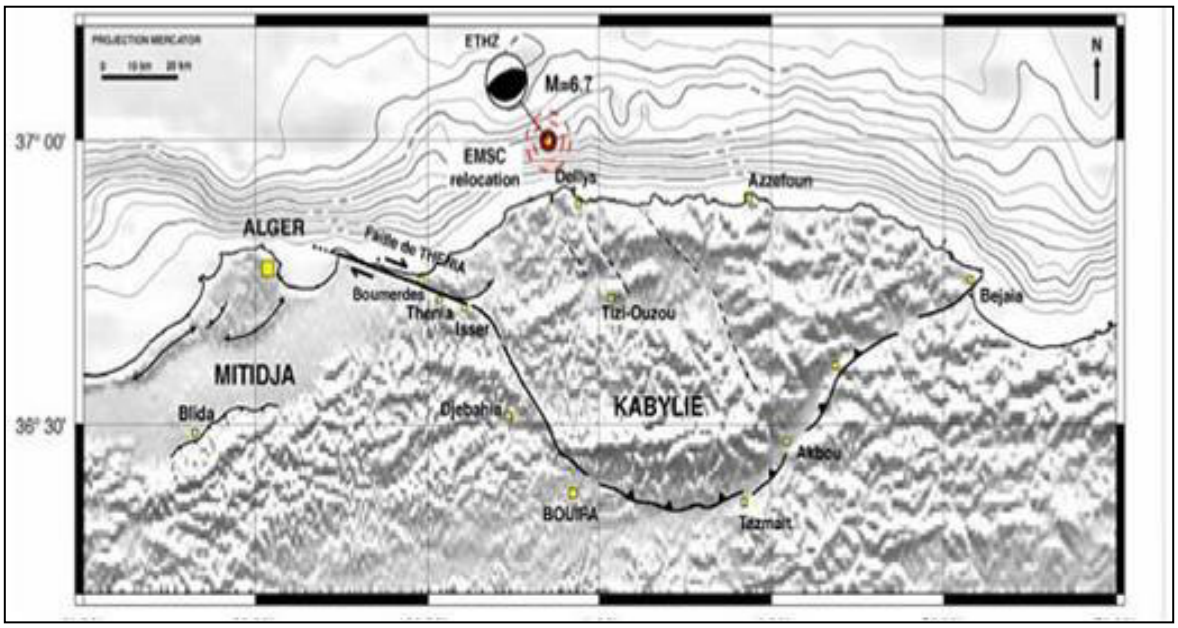


Figure14 : Faille de Thénia et localisation du séisme du 21 mai 2003 (Meghraoui et al., 2004)

IV- RELATION ENTRE LES SEISMES ET LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Des nombreuses recherches ont été effectuées s'intéressant aux effets des tremblements de terre sur la stabilité de pentes dans les matériaux secs non cohérents, dans le roc (Seed et Gooman, 1964) ainsi que dans les sables et silts saturés (Finn et al. 1978, Seed, 1976). Selon Seed (1967), les talus naturels argileux et, particulièrement les argiles sensibles saturées, sont vulnérables aux secousses et peuvent perdre de la résistance lorsqu'elles sont soumises à un chargement sismique. Cependant, l'étude de la stabilité dynamique de pentes argileuses a fait l'objet de relativement peu d'études jusqu'à présent.

Les glissements en liaison avec les tremblements de terre peuvent se produire dans pratiquement dans tous types de sols. Ces mouvements de terrain résultent de processus de déformation qui affectent les propriétés mécaniques des terrains, et en particulier la vitesse de propagation des ondes. Dans le cas des glissements de terrain affectant des sols avec une nappe phréatique proche de la surface, la vitesse des ondes P est très sensible à la hauteur d'eau. La vitesse des ondes S semble être le meilleur paramètre pour caractériser des mouvements faibles à modérés dans de tels contextes (Meric, 2006).

Les séismes peuvent avoir des effets secondaires qui consistent en des mouvements de terrain : glissements de terrain, écroulement, perte de cohésion de terrain gorgé d'eau ou liquéfaction. Plusieurs de ses effets se combinent parfois ou bien déclenchent à leur tour d'autre effets, eux-mêmes néfastes. La vitesse des ondes de cisaillement est donc un paramètre clef dans l'estimation des risques sismiques et gravitaire.

Cojean et al (2009) explique que les glissements et les éboulements induits sont dus à l'apparition de forces d'inertie supplémentaires d'origine sismique, résultant directement de l'accélération sismique et bien souvent amplifiées par des effets d'origine topographique (forme du versant) et géologique (structure du versant et matériaux constitutifs). Certains de ces glissements induits peuvent résulter aussi du processus de liquéfaction généralement des sols fins (sables fins saturés et de faible compacité).

IV-1. Eboulements et écroulements rocheux

Les tremblements de terre peuvent provoquer des chutes de blocs par modification des conditions d'équilibre géotechniques. En raison du contexte tectonique qui leur donne naissance, les séismes frappent souvent des régions à fort relief qui comportent des masses rocheuses rigides vigoureusement attaquées par l'érosion et affleurent en falaise. Ces dernières sont la source d'éboulement et chutes de blocs et pierres.

IV-2. Liquéfaction

Sous les sollicitations dynamiques, certains sols, notamment les sables fins saturés peuvent perdre toute portance par annulation des contraintes effectives. Ces pertes de résistance se produisent quand la résistance du sol est réduite, au point où il ne peut pas soutenir des structures ou rester stable. En d'autres termes, sous l'effet des secousses sismiques, certaines formations géologiques superficielles contenant une nappe phréatique, perdent leur cohésion et se « liquéfient ». L'étendue de la zone de liquéfaction peut être très importante. Elle dépend de la magnitude de séisme.

IV-3. Glissement de terrain

Les tremblements de terre se produisent presque sans interruption autour du monde. Ils constituent une cause importante de glissements de terrain dans de nombreux endroits du monde. Au cours du 20^{ième} siècle, des glissements provoqués par des séismes ont engendré plusieurs milliers de décès et des pertes économiques qui se chiffrent par milliards (Keefer, 1984)

Harp et Wilson (1995) étudièrent la réponse des glissements de terrain après des grands tremblements de terre, dans la continuité des travaux de Keefer (1984). Ils précisèrent que le comportement des glissements de terrain à des sollicitations sismiques ne pourrait être mieux défini qu'à condition de contrôler les accélérations, les déplacements et la pression des pores du glissement durant les séismes.

Les glissements en liaison avec les tremblements de terre peuvent se produire dans pratiquement tous les types de sols et peuvent avoir des conséquences désastreuses. Le tableau 1 présente une liste de certains séismes qui ont induits des glissements de terrain [Keefer, 2002].

Tableau 1 : Histoire de certains séismes qui ont induits des glissements de terrain, [Keefer, 2002]

Localisation	Date	Magnitude	Nombre de glissements de terrain
Daly City, Calif. USA	22 Mai 1957	5.3	23
Guatemala	4 Février 1976	7.5	50 000
Mt ; Diablo, Camlif. USA	24 Janvier 1980	5.8	103
MammothLakes, Calif. USA	25 Mai 1980	6.2	5253
Coalinga, Calif. USA	2 Mai 1983	6.5	9389
San Salvador, El Salvador	10 Octobre 1986	5.7	216
LomaPrieta, Calif. USA	17 0ctobre 1989	6.9	1500
Northridge, Calif. USA	17 Janvier 1994	6.7	11000
Hygoken-Nanbu, Japan	17 Janvier 1995	6.9	674-747
Umbria-Marche, Italy	26 Septembre 1997	6.0	100-124
Chi-Chii, Taiwan	21 Septembre 1999	7.7	22000

- **Les principales conclusions tirées de cette étude sont rappelées** [Keefer, 2002]**:**

- Les types de glissements identifiés, référencés par rapport à la classification de Varnes (1978), sont au nombre de 14, avec parmi les plus représentés : les chutes de blocs, les glissements de sols, les glissements rocheux.
- Les pertes les plus importantes en vies humaines sont liées aux avalanches rocheuses, aux coulées boueuses et aux chutes de blocs.
- L'aire de répartition des glissements est corrélée avec la magnitude depuis 0 km^2 pour M = 4 à 500 000 km^2 pour M = 9,2.
- Les plus faibles secousses sismiques déclenchent quatre principaux types de mouvements de versant dans des massifs de sol ou des massifs rocheux affectés de nombreuses familles de discontinuités : il s'agit de chutes de blocs, de glissements rocheux, de chutes de masses de sol et de glissements dans des sols.
- Des secousses sismiques de plus forte intensité sont nécessaires pour déclencher des mouvements de versant dans des matériaux de forte cohésion ou des glissements profonds.
- De fortes secousses sismiques sont nécessaires pour déclencher des étalements latéraux et des coulées.
- De très fortes secousses sismiques sont nécessaires pour déclencher des avalanches de roches.
- La plupart des glissements induits concernent des glissements de première occurrence et peu d'anciennes zones glissées.

A partir d'une nouvelle base de données couvrant la période 1980-1997, Rodriguez et al (1999) ont confirmé les conclusions de Keefer (1984) et montrent que dans des cas particuliers, des glissements peuvent se déclencher à grande distance de l'épicentre lorsque la pente ou le versant présente une grande fragilité.

Plus récemment, Wang. S (2009) a présenté une analyse de nombreux glissements déclenchés par des séismes en Chine, concluant par une méthode d'évaluation de l'aléa « mouvement de versant » en région sismique et des recommandations pour les décisions d'aménagement de territoire. Il précise, en outre que le facteur distance à la faille est aussi très clair. Environ 90% des glissements et éboulements se situent à moins de 30 km de distance de la faille, la plupart étant à moins de 20 km de distance. Pour les glissements de très grande ampleur, 95% d'entre eux se situent à moins de10 km de distance de la faille.

L'exemple le plus frappant est le séisme du 12 Mai 2008 au Sichuan (Chine) de magnitude 8, où de très nombreux mouvements de terrain ont été déclenchés par ce séisme dans diverses formations géologiques : chutes de blocs, éboulements en masse, glissements, coulées de débris. D'après Cojean et al (2009), plus de 30 000 sites de versants ont subi des déstabilisations par ce séisme. Ces sites ont été identifiés sur le terrain ou sur des images satellitaires. Beaucoup de ces glissements se sont déplacés avec de grandes vitesses et sur de grandes distances.

Selon Massarsch (1980), les facteurs les plus importants qui influencent la stabilité dynamique d'une pente sont : le type de sol ou de roche, la structure du sol et de la formation rocheuse, l'inclination de la pente, les conditions d'eaux souterraines, le type de végétation, la magnitude, la période et la durée du tremblement de terre.

En Algérie, d'après Machane et al (2004), le séisme du 21 Mai 2003 (Mw = 6,8) (tableau 2) a induit des effets géologiques de différentes natures. La rupture de la faille a engendré un soulèvement de la côte, principalement entre Corso et Dellys. La liquéfaction a été observée de façon spectaculaire, en particulier le long des vallées des oueds Corso, Boudaouaou, Boumerdes, Isser et Sebaou et a été à l'origine de nombreux dégâts causés aux routes. Dans la région de Legata, elle a engendré un effondrement du sol sur plusieurs centaines de mètres. Les glissements de terrain sont essentiellement des arrachements superficiels affectant les talus routiers et les berges des oueds, à l'exception du glissement de Thenia réactivé qui a affecté l'autoroute sur plusieurs kilomètres de long dans la région de Guerrouma.

Tableau 2 : Valeurs des accélérations maximales enregistrées par le CGS (AFPS, 2003) : où g=10m/s² désigne l'accélération de la pesanteur.

Lieu	Distance (Km)	Est-ouest (x g)	Nord-sud (x g)	Verticale (x g)	Fréquence dominante
Keddara 1	20	0.34	0.24	0.26	4 Hz
Keddara 2	20	0.58	0.22	0.35	
Hussein Dey	36	0.27	0.23	0.09	
Dar El Beida	29	0.52	0.46	0.16	
El Afroun	86	0.16	0.09	0.03	
Blida	72	0.046	0.038	0.028	

V-CONCLUSION

Les glissements de terrain se produisent dans de nombreuses régions du monde et peuvent s'étendre sur plusieurs km tels que les coulées boueuses. Ils peuvent avoir des accélérations

brutales sous l'action de facteurs de déclenchement divers (augmentation de la pression interstitielle, secousses sismiques,…). Leur comportement reste du fait peu prévisible, ce qui constitue des menaces aux populations et aux infrastructures. Sur la base de ces connaissances, nous cherchons dans cette thèse à valider l'identification des sources sismiques caractéristiques du glissement de Tigzirt en lien avec les facteurs externes d'instabilité telles que les précipitations.

CHAPITRE II

PRESENTATION DU GLISSEMENT DE TIGZIRT : HISTORIQUE CINEMATIQUE ET STRUCTURE INTERNE

I-INTRODUCTION

Les mouvements de terrain jouent un rôle prépondérant dans l'évolution des versants du Nord Algérien. Les études géologiques et géotechniques du terrain sont les plus souvent motivées par la recherche de solutions à apporter à un mouvement déclaré. En effet, les montagnes et les collines du Tell et du Rif offrent une multitude de sites favorables, du fait de la prédominance de fortes pentes développées dans des roches marneuses ou argileuses (G. Maurer, 1968 ; A. Benaissa, 1984 ; A. Marre, 1987-a ; H. Amirèche, 2001 ; A. Slimi, 2008).Ces mouvements de terrain sont toujours le résultat de deux ensembles de facteurs : d'une part, des conditions naturelles qui contrôlent la stabilité des versants et, d'autre part, des facteurs déclencheurs, d'origine climatique et/ou anthropique (R. Dikau *et al.,* 1996 ; A. Lang *et al.,* 1999 ; F.C. Dai *et al*., 2002 ; T. Glade et M.J. Crozier, 2005). Bien que d'importants progrès aient été faits pour isoler les différents mécanismes, il n'est toujours pas possible de déterminer la part exacte de chaque facteur engendrant le mouvement ou sa réactivation (F. Guzzeti *et al*. 1999 ; T.W.J. Van Asch *et al*., 2007).

Le site de Tigzirt a fait l'objet de plusieurs études et expertises géotechniques qui ont permis de reconnaître la nature des terrains (LNHC, 2002 ; etGeomica2009). La géologie propice aux mouvements de terrain et les travaux d'extension de la ville ont provoqué des déplacements jusqu'au déclenchement de la catastrophe, lors de conditions météorologiques exceptionnelles. L'étude géomorphologique du site et l'exploitation des mesures réalisées permettent de préciser les causes conduisant à l'instabilité et à la rupture ; la saturation en eau des terrains ne se produit que si une grande partie de l'eau des pluies s'infiltre au lieu de ruisseler. Les fentes de dessiccation provoquées par la sécheresse estivale et les fissures liées aux déformations profondes favorisent l'infiltration de l'eau qui exerce alors une pression hydrostatique qui peut faire atteindre aux matériaux argileux la limite de plasticité nécessaire au fluage. Ces infiltrations élèvent aussi le niveau des nappes phréatiques, favorisant la saturation du substrat. Or, une augmentation de la teneur en eau réduit la cohésion des matériaux argileux (G. Avenard, 1962) et stimule le fonctionnement des mouvements de masse (R. Neboit, 1991 ; J.M. Grandjean *et al.,* 2006). Les travaux de terrassement, en ameublissant le matériel et les ravins ont favorisé l'infiltration.

D'après R.E. Mayer (2003), l'instabilité se matérialise lorsque les contraintes de cisaillement (poids des matériaux, pression d'eau interstitielle, surcharges locales de la partie supérieure du

talus) sont supérieures à la résistance au cisaillement (cohésion et frottement propres aux matériaux).

Aussi les séismes sont-ils souvent à l'origine du déclenchement de glissements de terrain (Y. Guglielmi *et al*., 1995) ? La rupture de 1970 ne correspond toutefois pas à un séisme important, mais les nombreuses secousses précédentes, liées à la néotectonique active du secteur (A. Boudiaf *et al.,* 1999 ; A. Yelles-Chaouche *et al.*, 2006), ont pu fragiliser le versant par la répétition des pressions exercées (P. Duffaut, 2003). Les secousses sismiques produisent des forces horizontales qui s'ajoutent aux pressions décrites précédemment, sans modifier la résistance au cisaillement des terrains (P. Habib, 1997).

II-PRESENTATION DU SITE ETUDIE

La ville de Tigzirt (12000 habitants) est située en Grande Kabylie (Algérie) sur la côte de la mer Méditerranée à 40 km au Nord de la capitale régionale Tizi-Ouzou et à 100 km à l'Est de la capitale Alger (Fig.1). Tigzirt, dont le nom signifie « îlot » en berbère, est une cité antique (probablement d'origine phénicienne, puis romaine), portuaire et touristique, connue pour la beauté de ses reliefs escarpés en bord de mer. L'étude du mouvement de terrain qui affecte le versant côtier à proximité du centre-ville a fait l'objet de cette présente étude.

Le glissement de terrain de Tigzirt, d'un volume estimé de l'ordre de quelques millions de m^3, est un phénomène gravitaire complexe au regard des nombreux facteurs qui ont interagis pour favoriser son déclenchement. Ces derniers sont difficiles à déterminer avec précision et/ou sont variables au cours du temps. L'une des causes probables de ce glissement de terrain est liée à la perte de résistance au cisaillement du fait de l'augmentation des pressions interstitielles au niveau de la surface de glissement située dans des matériaux à dominante argileuse et d'une diminution progressive dans le temps des caractéristiques mécaniques le long de cette dernière. La surface de glissement a été identifiée en observant des échantillons prélevés dans des sondages carottés à des profondeurs relativement importantes, de l'ordre de 10 m en pied de versant et à 30 m à la mi-pente. Plusieurs indices morphologiques tels que de nombreuses fissures dans les murs d'habitations, des bourrelets, des poteaux penchés, des escarpements secondaires, *etc.*, sont observés en surface et confirment un mécanisme de rupture en translation profond.

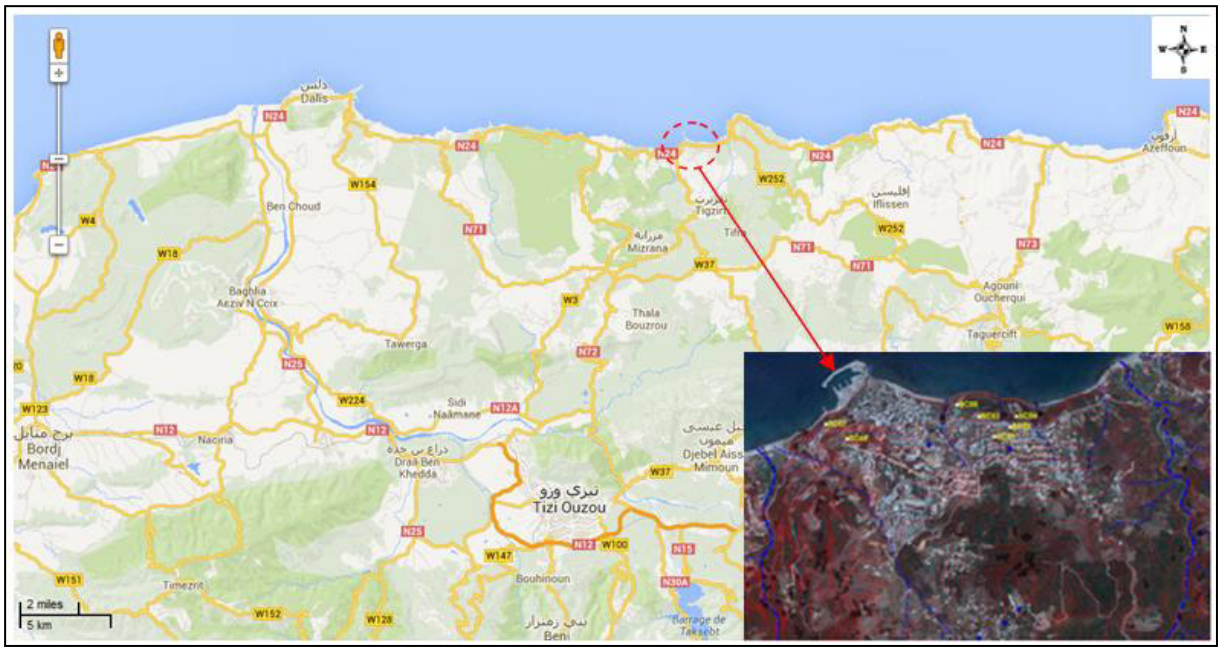


Figure 1 : Carte de localisation de la ville de Tigzirt.

II-1.Description du site

Le site de Tigzirt sera étudié du point de vue géologique, géomorphologique, climatologique, géotechnique et hydrogéologique.

II-1-1.Géomorphologie

La côte dans la région de Tigzirt présente des reliefs escarpés modelés au cours du Tertiaire par l'orogénèse alpine. La morphologie du versant, orienté vers le Nord et instable sur une superficie de 136 ha, est complexe. L'urbanisation a évolué depuis les années 1970 d'une manière dense et anarchique (sans respect des règles d'urbanisation), ce qui a engendré d'importants remodelages superficiels et surcharges.

L'escarpement principal se situe au niveau de la crête de la colline Sour Bouaouine au pied des montagnes Taslata à une altitude d'environ 270 m. La longueur maximale du versant affecté par le mouvement est de l'ordre de 1390 m, sa pente moyenne est comprise entre 13° et 15°, sa largeur au niveau du rivage est d'environ 1250 m et sa largeur minimale à mi-pente est de l'ordre de 960 m la (Fig. 6) du chapitre Cartographie et zonation de l'aléa de Tigzirt.

La morphologie du pied du versant a largement été remodelée par le mouvement de terrain d'une part et par l'érosion marine d'autre part. Plusieurs signes d'une intense érosion, malgré un faible marnage (généralement inférieur à 20 cm), sont observés, en particulier la présence de blocs rocheux en bord de mer, la modification du trait de côte et le changement de la couleur de l'eau en bord de mer (présence de nombreuses particules fines en suspension).

L'évolution récente du trait de côte a été évaluée en comparant des photographies aériennes verticales prises en 2006, 2009 et 2011 (Fig. 2). Un important recul a été observé de part et d'autre du glissement (environ 17 m en 5 ans au niveau de la plage Tassalast à l'Ouest et environ 6 m en 5 ans au niveau de la plage Ferraoun à l'Est) ; tandis qu'au droit du glissement et lors de la même période une progradation du trait de côte de l'ordre de 10 m est constatée. Les vitesses de recul mesurées de part et d'autre du glissement sont significativement supérieures aux valeurs moyennes observées sur la côte méditerranéenne en Algérie, généralement comprises entre 0,12 m/an et 0,75 m/an, et conjuguées à une augmentation du niveau de la mer évaluée à environ 2 mm/an à 2,5 mm/an *(*Ayadi et Boutiba, (2012) ; Boutiba et al., (2012) ; Bouakline et al., (2012)*)*. L'érosion accrue des plages à l'Ouest et à l'Est du mouvement de terrain traduit les modifications engendrées par l'avancée de la masse glissée dans la mer sur la houle, les courants et les transports sédimentaires dans la zone littorale et notamment lors des tempêtes.

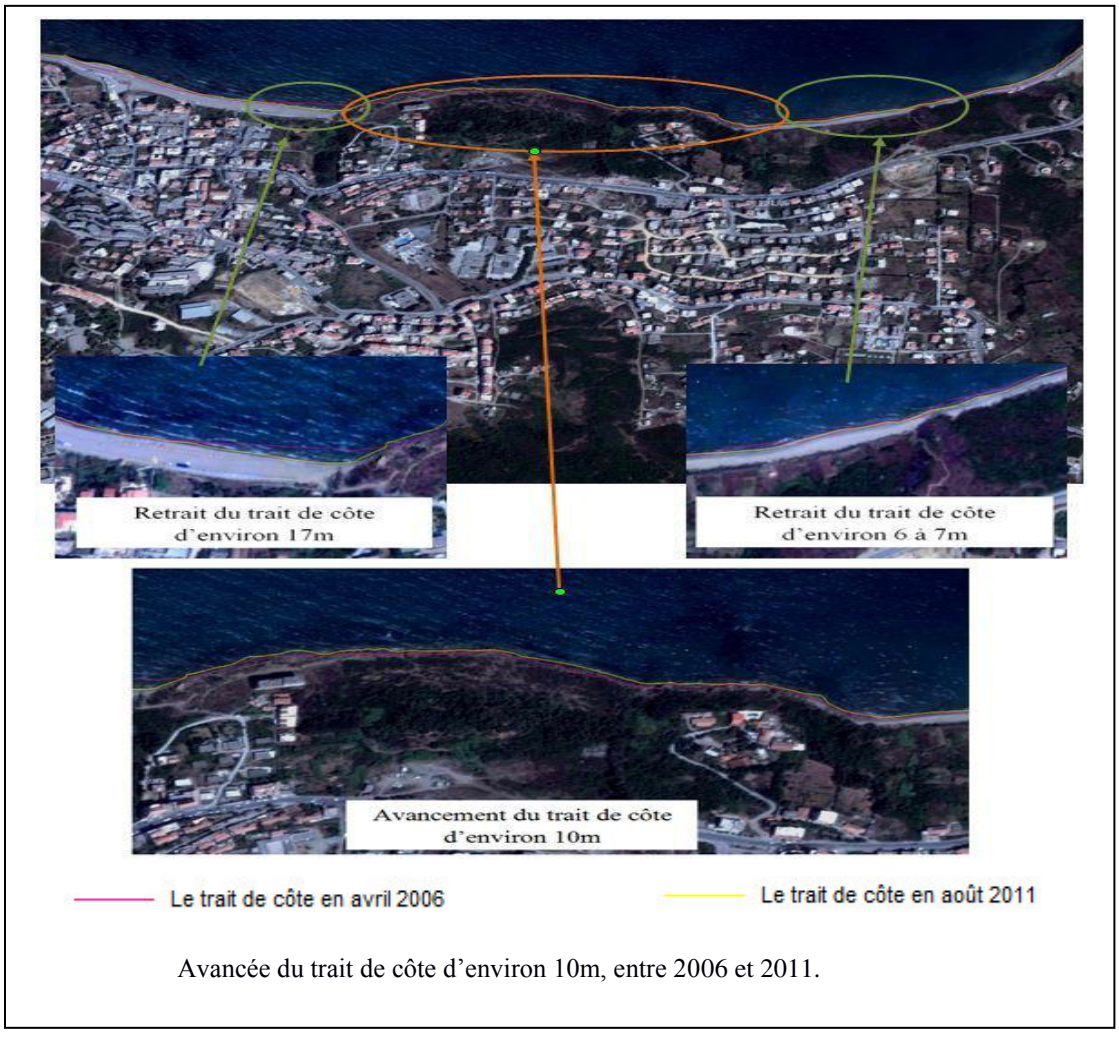


Figure 2 : Évolution du trait de côte au niveau de la zone instable de Tigzirt entre 2006 et 2011 (en trait rouge la position du trait de côte en 2006 et en trait jaune la position du trait de côte en 2011).

II-1-2.Climatologie

Le climat méditerranéen de la ville de Tigzirt est caractérisé par une longue période de fortes pluies entre les mois de novembre et d'avril. La hauteur de précipitation moyenne annuelle est de l'ordre de 810 mm, avec un maximum de 1097 mm mesurée en 2002. Le mois le plus pluvieux de l'année est le mois de novembre avec une hauteur de précipitation moyenne de 197mm (**Tableau 1**).

Tableau 1 : Évolution de la pluviométrie dans la région de Tigzirt d'après l'ANRH de Tizi-Ouzou (résultats de la station EL AZAIEB MIZRANA en mm).

	Mois												
Année	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	mars	avril	mai	Jui.	Juil.	Aoû.	Moyenne annuelle
1989-1990	22,5	14,7	30,2	32,7	80,7	0	57,8	71,8	83	1,9	27,3	2,1	424,7
1997-1998	41	126,5	157,6	173,4	41,6	137	76,7	75	205,9	1,5	0	16,6	1052,8
1999-2000	39,8	33,1	321,6	232,1	31,5	6,4	14,5	42,7	26,3	14,1	9,3	0,6	772
2001-2002	27	1,3	278,9	107,8	69,5	52,9	56,4	33,2	17,8	2,8	29,5	27,5	704,6
2002-2003	44,9	64	204,6	180,3	286,6	93,2	34,4	151,6	37,3	0	0	0	**1096,9**
2003-2004	80,8	53,4	58,2	159	175,6	78,3	97,2	87,5	138,6	8	0	9,7	946,3
2004-2005	9,9	64,8	109,6	156,8	151	132,1	60,2	70,2	7	0	0,7	1,5	763,8
2005-2006	28,7	53,1	134	107,9	115,4	258,2	36,5	16,3	84,2	0,9	7,5	2,4	845,1
2006-2007	19,8	22	3,9	261,7	34,5	39,3	193,7	170,6	19	14,1	1,8	44,3	824,7
2007-2008	49,9	209	**351,6**	121	7,6	14,2	90,1	26,3	69,8	6,6	12,6	0	958,7
2008-2009	69	30,8	226,1	138,4	201,2	27,2	105,2	108	36,1	0	0	3,7	945,7
2009-2010	151,8	59,6	137	181,5	98,5	58,7	95,2	68,7	41,9	26,5	0	11,6	931

II-1-2-1.Hydrologie

Deux petits oueds de part et d'autre du glissement de terrain, ainsi que plusieurs ravins dans la zone instable, sont le siège d'écoulements semi-permanents. Ces cours d'eaux, secs l'été, sont peu profonds, diffus et peu étendus. Leur fonctionnement dépend en très grande partie des précipitations hivernales, (Figure 4 du chapitre Cartographie et Zonation de l'aléa de Tigzirt).

II-1-3.Cadre géologique

Le site de Tigzirt est situé au Nord de l'Atlas tellien, sur la marge du plateau continental Africain.

II-1-3-1.Lithologie

Cette région de Kabylie est caractérisée par la présence de formations sédimentaires plissées appartenant à deux unités à faciès tellien (unité de Dellys) et à faciès numidien (Fig. 3). Plusieurs auteurs ont ainsi signalé l'existence d'affleurements du Crétacé Supérieur et de l'Éocène à faciès telliens dans les régions de Tigzirt et de Dellys, ville côtière située à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest (Caire, (1954) ; Brossière et Raymond, (1984)). Ces formations sont assimilées à des nappes de charriage (encore appelées flyschs Nord-Kabyles), mises en place au Miocène Inférieur, reposant en discordance sur le domaine interne du socle métamorphique de la chaîne subalpine des Maghrébides. Le substratum sur le site de Tigzirt (fig. 4) est ainsi constitué de marnes du Crétacé surmontées par des formations superficielles de pente quaternaire, reportée sur la Figure 14 du chapitre suivant Cartographie et Zonation de l'aléa glissement de Tigzirt.

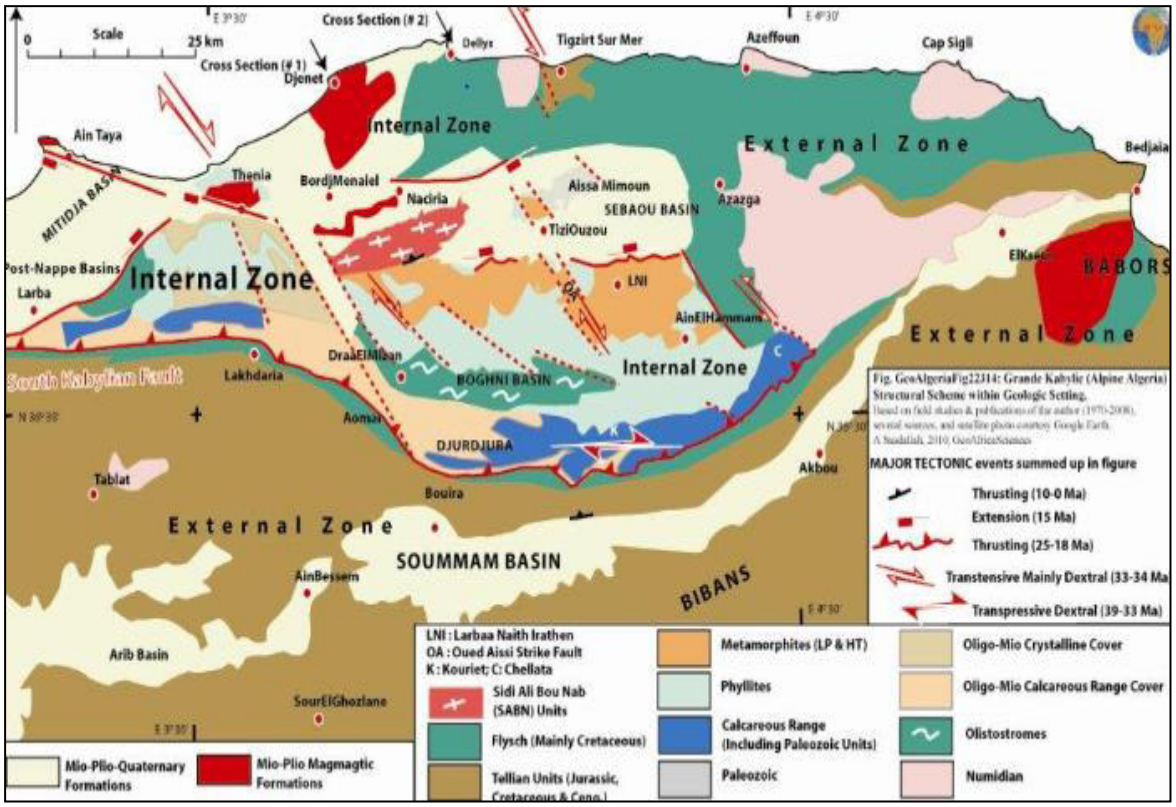


Figure 3 : Carte géologique des faciès rencontrée à Tigzirt selon (Saadallah (1992)).

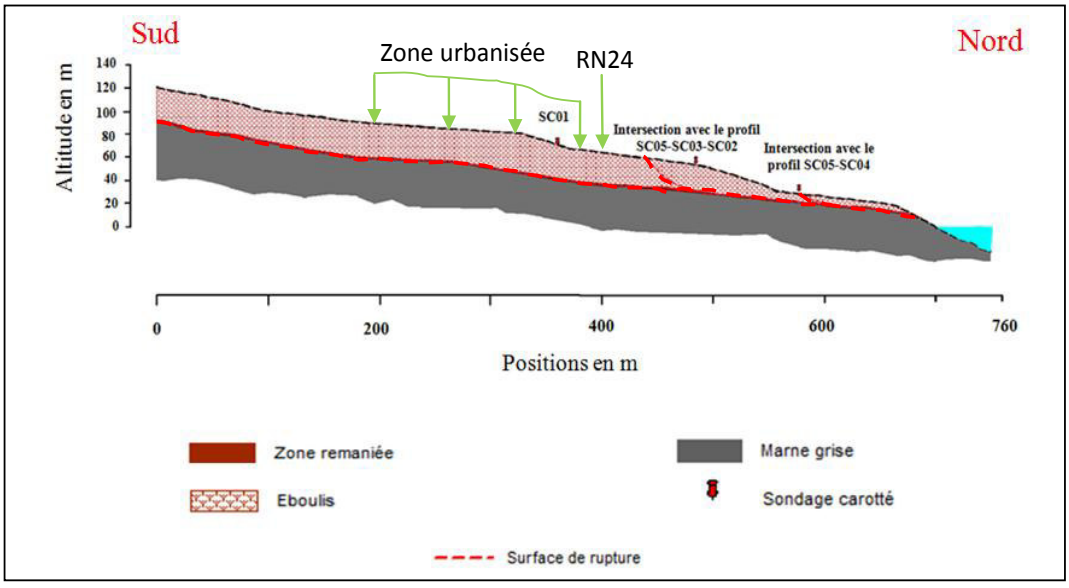


Figure 4 : Structure du mouvement de terrain de Tigzirt.

II-1-3-2.Cadre géodynamique

Le Nord algérien se situe à une frontière active entre deux plaques majeures, sa déformation globale en compression selon une direction Nord-Ouest - Sud-Est est liée à la collision générale Afrique - Eurasie débutée au Jurassique Inférieur dans la Méditerranée occidentale et

se poursuivant aujourd'hui à une vitesse de convergence moyenne de l'ordre de 6 mm/an (Meghraoui et Doumaz, (1996) ; Calais et al., (2003) ; Nocquet et Calais, (2004) ; Serpelloni et al., (2007)). Le site instable de Tigzirt est ainsi encadré par plusieurs failles actives majeures. Elles sont localisées, soit sur le continent, soit en mer (Fig. 5). Parmi les plus importantes, on peut citer :

- La faille de Thenia de direction N120°E (Boudiaf et al., (1998)), présentant une composante coulissante senestre (du fait de la rotation dans le sens antihoraire de la plaque africaine par rapport à la plaque eurasiatique), en activité constante depuis le séisme de Boumerdès du 21 mai 2003 (ville côtière située à 65 km à l'Ouest de Tigzirt), d'une magnitude égale à 6,7,
- La faille d'Isser - Tizi-Ouzou,
- La faille inverse de Zemmouri constituée par une série de fractures discontinues, localisées en mer à l'Est de la faille de Thénia, de direction N54°E et de pendage égal à 47° vers le Sud-Est, à l'origine du séisme de Boumerdès (Semmane, (2005)).

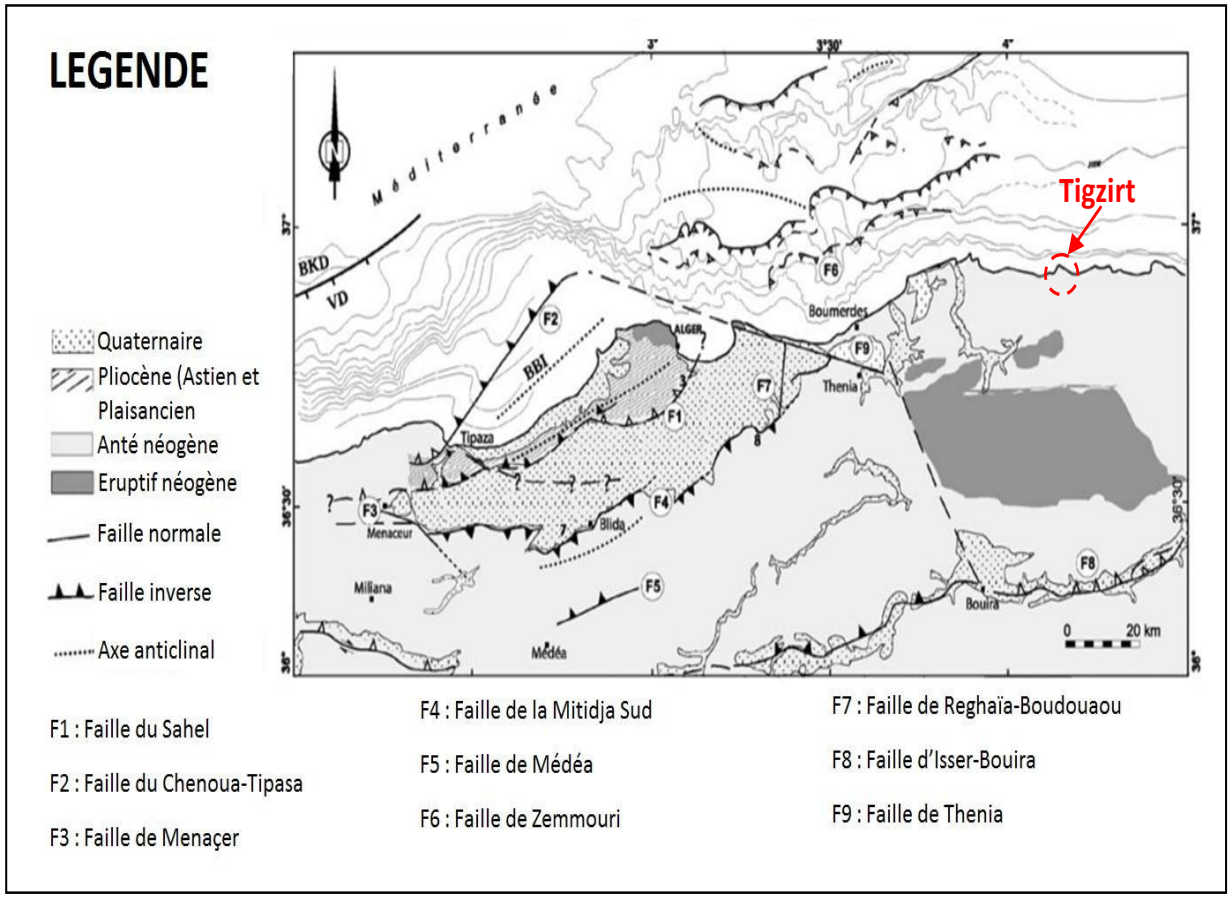


Figure 5 : Cadre structural de la région d'Alger (Yelles-Chaouche A. et al., (2006)).

Le versant côtier de Tigzirt est donc susceptible d'être affecté par de puissants phénomènes géodynamiques et néotectoniques. :

-La commune de Tigzirt est située en zone de sismicité moyenne IIa selon les Règles Parasismiques Algériennes RPA99 (version 2003). L'activité du glissement de terrain n'a cependant pas été profondément influencée par le séisme de Boumerdès, qui n'a généré que des dommages légers dans la commune. Toutefois l'hypothèse d'un potentiel effet de site sismique dû à la topographie et à la présence de formations instables sur une épaisseur de 30 mètres, en grande partie saturées en eau et reposant sur un substratum compact (de plus forte vitesse sismique), ne peut être écartée. Cet effet de site amplifierait notablement les composantes horizontales des vibrations en surface et serait ainsi extrêmement défavorable pour la stabilité de la pente sous sollicitations dynamiques. Cependant, il ne pourrait être mis en évidence qu'en équipant le site de stations sismologiques sur et en dehors du glissement de terrain, dont le site ne dispose d'aucune station actuellement.

-Le séisme superficiel de Boumerdès (foyer situé en mer entre 7 et 10 km de profondeur, à environ 7 km de la côte) a engendré un soulèvement spectaculaire de la côte, sur un linéaire d'environ 50 km, estimé à 75 cm à proximité de l'épicentre, puis diminuant progressivement pour devenir nul à Cap Djinet à environ 35 km à l'Ouest de Tigzirt (Meghraoui et al., 2004). Par comparaison, suite au séisme d'El Asnam d'une magnitude de 7,2 le 10 octobre 1980, il a été relevé des mouvements verticaux moyens de l'ordre du mètre au niveau de la faille d'Oued Fodda sur une quarantaine de kilomètres (Durville et Méneroud, 1982). A Tigzirt, le talus côtier abrupt, qui est exposé à une érosion intense en pied de versant, pourrait donc résulter d'un soulèvement général lié au jeu des failles inverses localisées en mer, ce qui pourrait induire des phénomènes régressifs dans le versant.

II-1-4.Cadre hydrogéologique

Les formations superficielles de pente sont le siège d'une nappe libre, dont le niveau piézométrique est proche du terrain naturel pendant les périodes hivernales. Deux piézomètres ont été installés dans les sondages carottés (SC02) et (SC05) par le laboratoire Geomica en 2009. Cependant, ces derniers ont été rapidement cisaillés en profondeur et sont depuis inutilisables. Par ailleurs, les résultats montrent qu'au niveau du sondage (SC05), à proximité de la mer, la nappe reste proche du niveau du terrain naturel même en période estivale.

Le versant instable est le siège d'écoulements d'eaux ayant une origine lointaine et provenant des infiltrations des précipitations sur toute l'étendue du glissement et en amont, ainsi que des fuites des réseaux enterrés. Ils alimentent les circulations d'eau dans les formations superficielles de pente, plusieurs puits et sources, parfois très proches du rivage et dont

certaines sont permanentes. Le niveau piézométrique de cette nappe libre varie de manière continue entre le terrain naturel lors des périodes hivernales et 12 m de profondeur à la fin des périodes estivales.

Au pied du glissement de terrain, la dissipation des pressions d'eau dues aux écoulements d'eau douce est très certainement rendue difficile par la présence d'une nappe d'eau salée. Ainsi, dans plusieurs puits exploités à proximité du rivage, est observée la présence d'eaux saumâtres issues du mélange d'eaux douce et salée.

Dans le contexte de Tigzirt, le substratum marneux très peu perméable est principalement le siège d'écoulements descendants, plutôt favorables à la stabilité générale du site (mais non pris en compte dans les calculs classiques de stabilité). Il n'existe pas d'équilibre hydrostatique entre les circulations d'eau dans les marnes et celles dans les formations superficielles de pente, généralement légèrement en charge (Rat, 1981).

II-1-5.Cadre géotechnique

Le modèle géologique du site a été établi en exploitant les résultats des huit sondages carottés réalisés en 2002 par le Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction (LNHC) et des cinq sondages carottés réalisés en 2009 par le bureau d'études Geomica (Fig. 5 du chapitre SIG). Les résultats de ces reconnaissances confirment l'existence de deux formations principales : des dépôts quaternaires constitués d'éboulis gréso-argileux et un substratum marneux (Fig.4) avec une zone remaniée d'une épaisseur d'environ 2 m au niveau de l'interface entre ces deux formations. Les principales caractéristiques physiques et mécaniques des terrains sont synthétisées dans les Tableaux 2 et 3.

II-1-5-1.Les éboulis gréso-argileux

Ces dépôts quaternaires sont constitués principalement de matériaux hétérogènes limono-argileux, parfois sableux, contenant des blocs gréseux, parfois très volumineux et d'autres roches d'origines variées. Il s'agit d'une formation éocène remaniée, mélangée fréquemment à des colluvions argileuses issues de l'altération du substratum marneux sous-jacent. Cette formation a une épaisseur comprise entre 10 m et 29 m. Les caractéristiques physiques sont hétérogènes, en lien avec les fortes variations des quantités relatives des fractions sableuses et plus grossières. Le comportement mécanique d'un sol grossier (ou sol hétérogène) est régi par celui de sa fraction fine (particules inférieures à 0,08 mm) lorsque le pourcentage de cette

dernière est supérieur à 35 %. Il est donc opportun de s'intéresser uniquement à la fraction fines des éboulis gréso-argileux pour appréhender leur comportement mécanique.

Les essais de cisaillement rectiligne à la boîte de Casagrande réalisés n'ont pas conduit à des résultats représentatifs en raison de la trop faible perméabilité de ces matériaux à dominante argileuse. L'angle de frottement interne effectif est estimé de l'ordre de 30° par corrélation avec l'indice de plasticité. D'après la classification USCS des sols (Unified Soil Classification System), la fraction fine est constituée d'argiles et de limons très plastiques (CH et MH).

II-1-5-2.L'horizon marneux remanié

Il s'agit de la frange argileuse altérée du substratum marneux sous-jacent, peu consistante et d'une épaisseur moyenne d'environ 2 m. Ces caractéristiques mécaniques sont faibles : l'angle de frottement interne effectif a été estimé de l'ordre de 26° par corrélation avec l'indice de plasticité. Les limites d'Atterberg de ces argiles marneuses sont caractéristiques de sols riches en minéraux argileux de type kaolinite et illite, ce qui constitue un facteur d'altérabilité supplémentaire. D'après la classification USCS des sols, il s'agit d'argiles très plastiques (CH), en permanence dans un état plastique.

-La cohésion de l'argile (cas éboulis gréso-argileux et marne altérée) varie en fonction de la teneur en eau et du degré de saturation, il s'agit donc d'une cohésion apparente. A long terme, pour ce type de matériau, j'ai toujours privilégié: C' = 0.C' est en effet la caractéristique de résistance au cisaillement reflétant l'intensité des liaisons chimiques fortes et stables entre les particules stables. Dans une argile, il y a beaucoup de liaisons chimiques faibles de type Van der Wells et peu de cimentation calcaire ou siliceuse. Au niveau de la surface de glissement, les déplacements détruisent toute cohésion, donc C' = 0 à ce niveau. La cohésion apparente est due à l'imbrication (enchevêtrement, "interlocking" en anglais) des particules du sol.

II-5-3.Le substratum marneux

Le substratum sain est constitué de niveaux marneux à débit schisteux (affectés par une schistosité de flux), localement faillés, voire mylonitisés et fortement altérés. Sa profondeur devient plus importante en s'approchant de la côte, mais reste irrégulière. Le pendage de ces niveaux est compris entre 20° et 40° vers le Nord, c'est-à-dire vers la mer. Les caractéristiques mécaniques de cette formation sont relativement hétérogènes, en fonction des variations de la teneur en $CaCO_3$. Elles sont considérées globalement comme bonnes : l'angle de frottement effectif a été estimé de l'ordre de 30° par corrélation avec l'indice de plasticité

et la cohésion effective volontairement limitée à 100 kPa. D'après la classification USCS des sols, il s'agit d'argiles et de limons très plastiques (CH et MH). Ces caractéristiques physiques et mécaniques sont regroupées dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2 : Caractéristiques géotechniques des matériaux qui composent le versant de Tigzirt.

Propriété Matériau	Poids volumique sec γ_d(kN/m^3)	Poids volumique saturé γ_{sat} (k N/m^3)	Cohésion C' (k Pa)	Angle de frottement φ' (°)	Module de Young E (MPa)	Coefficient de Poisson v
Recouvrement superficiel	17,30	20	0	30	800	0,33
Marne altérée et remaniée	14,80	16,80	0	26	200	0,30
Marne compacte	22,6	23	100	30	1700	0,30

Dans les marnes, il existe un ciment calcaire entre les particules argileuses. On peut donc introduire une cohésion non nulle. Notre habitude est de la limiter volontairement à 50 kPa (voire à 100 kPa dans certains cas). Pour la mesurer précisément, il faudrait réaliser des essaisde cisaillement triaxiaux de type CU+U.

Tableau 3: Caractéristiques physiques des matériaux qui composent le versant de Tigzirt.

Formations	**Densité sèche**	**Passant à 2 µm (%)**	**Passant à 80 µm (%)**	**Passant à 2 mm (%)**	**w_P (%)**	**w_L (%)**	**IP**	w_{nat} (%)
Éboulis gréso-argileux	1,43 à 1,73	45 à 52	75 à 80	87 à 98	27 à 38	44 à 73	17 à 46	19 à 30
Marne altérée	1,38 à 1,58	15 à 29	42 à 60	72 à 95	25 à 35	48 à 63	18 à 38	20 à 30
Marne saine	1,70 à 1,74	35 à 45	74 à 90	86 à 98	25 à 31	49 à 59	23 à 29	27 à 40

Pour ce qui concerne (φ) dans les argiles et les marnes, on s'est basée sur une corrélation empirique entre IP et (φ) de Bjerrum et Simons, (1960). Pour (φ) de la marne altérée (surface de glissement), un calcul de stabilité à rebours a été réalisé (rétroanalyse à l'équilibre limite) en considérant une nappe à 3 m de profondeur, une pente infinie de 15° et une surface de glissement parallèle au terrain naturelle à 30 m de profondeur. Le coefficient de sécurité obtenu est alors égal à 1.

En considérant que F = 1 lorsque la nappe est au niveau du terrain naturel (cas le plus favorable pour le calcul de ϕ') et avec β = 14°, on arrive à un angle de frottement interne : ϕ'

≈ 26°.La figure 6 représente l'évolution de la profondeur de la nappe par rapport au terrain naturel permettant d'obtenir F=1 en fonction de l'angle ϕ' (avec β = 14° et une surface de glissement située à 30 m de profondeur).

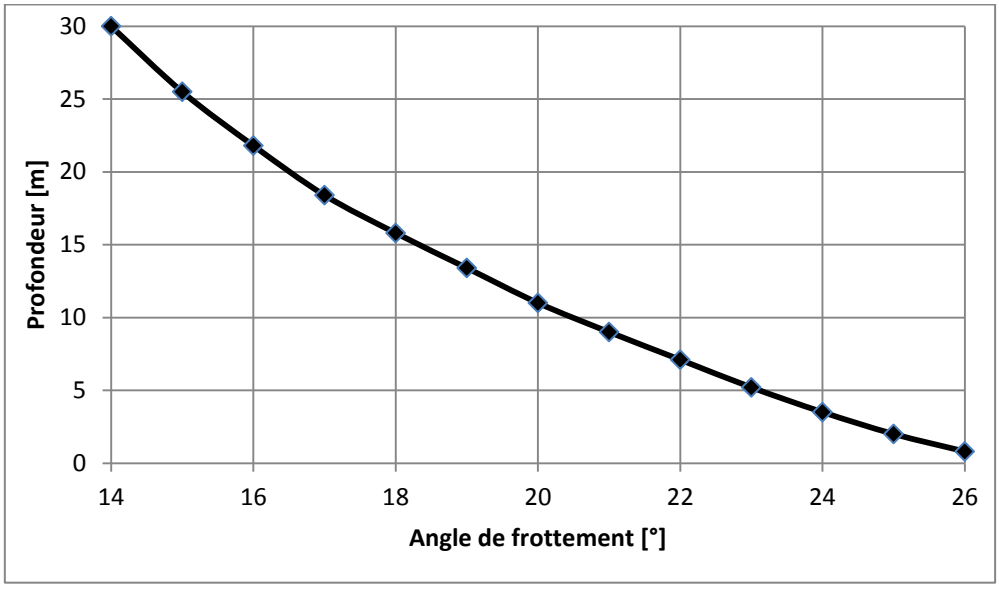


Figure 6 : L'évolution de la profondeur de la nappe par rapport au terrain naturel permettant d'obtenir F=1 en fonction de l'angle ϕ'.

Par ailleurs, comme le glissement de terrain de Tigzirt semble relativement ancien, les paramètres C'et ϕ' à prendre en compte dans les calculs de stabilité, le long de la surface de glissement, sont très certainement proches des caractéristiques résiduelles (en particulier : $C'_{res} = 0$ et $\phi'_{res} \leq \phi' < \phi'_{pic}$).Il ne serait pas surprenant, compte tenu de la nature des terrains, que ϕ'_{res} soit du même ordre de grandeur ou légèrement supérieur à la pente moyenne du versant (13° à 15°).

En s'appuyant sur les corrélations établies par Bjerrum et Simons en 1960 (« Comparison of shear strength characteristics of normally consolidated clays »), les angles de frottement interne obtenus sont comme suit :

* éboulis gréso-argileux : IP = 17 à 46 → ϕ'_{pic} de l'ordre de 26° à 31°,
* marne altérée : IP = 18 à 38 → ϕ'_{pic} de l'ordre de 27° à 31°,
* substratum marneux sain : IP = 23 à 29 → ϕ'_{pic} de l'ordre de 28° à 30°.

Ces angles de frottements seront ensuite utilisés dans le calcul numérique du chapitre modélisation.

II-5-6.Cadre anthropique

L'homme influe sur son environnement soit en le surchargeant (aménagements variés) soit en modifiant sa géométrie et ses conditions de stabilité (talutage, gabionnage, système déblai-remblai pour les routes, colmatage des cours d'eau, etc.). Vu que la stabilité précaire du site de Tigzirt ne supporte pas une modification hydrologique ou géométrique brusque, toute modification, même minime, peut entraîner une rupture du versant. De plus, l'absence de réseaux d'évacuation des eaux de surface (caniveaux, drains,…) et l'effet des eaux accidentelles infiltrées dans les formations instables (qui proviennent de réseaux défectueux) contribuent également au déclenchement des instabilités. Le non-respect de l'environnement et les aménagements variés et aléatoires (tels que le déboisement des forêts réalisé pour aménager les plages de Tassalast et Ferraoun) constitue également l'une des causes principales des mouvements de terrain dans cette région. En effet, la suppression des forêts rend la couche superficielle plus exposée aux phénomènes naturels (érosion superficielle, infiltration des eaux). En outre, la surcharge importante de ce versant par les constructions constitue un facteur aggravant pour la stabilité de cette zone.

II-1-7.Indices d'instabilité

Les archives disponibles et les indices morphologiques observés en surface révèlent l'existence de mouvements anciens, qui n'ont cependant pas été répertoriés avant 1970. Depuis l'hiver 1970, l'activité du glissement de terrain et les désordres en surface ne cessent d'augmenter.

II-1-7-1.Hiver 1970

L'hiver long et humide de l'année 1970 est le théâtre de déplacements marqués au sein de l'instabilité, entraînant plusieurs désordres (routes lézardées, légère fissuration de certaines constructions, *etc.*).

Figure 7 : trottoir en béton soulevée au Sud de RN24.

Figure 8 : Fissures sur une villa (R+1).

II-1-7-2.De 1981 à 1985

L'activité du glissement pendant cette période a été marquée par le développement de grandes fissures et d'un affaissement au niveau de l'escarpement principal, ainsi que le basculement d'une maison individuelle et la fissuration d'autres constructions. Les déplacements totaux en surface pendant cette période ont été d'ordre décimétrique à métrique.

Figure9 : Basculement d'une maison individuelle prise du coté bas de la RN24.

II-1-7-3.Hiver 1999

Suite à de fortes intempéries, des dégâts peu conséquents ont été constatés (routes lézardées, trottoirs inclinés). Par ailleurs, les précipitations abondantes enregistrées durant les mois de novembre et décembre 1999 (environ 550 mm en cumulé) n'ont pas engendré une réactivation notable du glissement de terrain, le système d'assainissement superficiel mis en œuvre durant les années 1990 étant encore fonctionnel.

II-1-7-4.Hiver 2001

Une étude géotechnique est lancée après la dislocation de huit anciennes maisons individuelles à l'aval de la Route Nationale N°24 et des désordres dans les bâtiments du fait de tassements différentiels situés en amont de cette voie.

II-1-7-5.Hiver 2008

Après les fortes intempéries de l'hiver 2008, plusieurs désordres ont été recensés : l'affaissement de l'avenue Ahmed Chafai (Fig.10), le développement d'une fissure de traction large et très profonde dans le versant associé à un affaissement d'environ 70 cm (Fig.11), la rupture de plusieurs réseaux enterrés d'alimentation en eau potable et d'assainissement, l'inclinaison des pylônes électriques selon les directions Sud - Nord et Sud-Ouest - Nord-Est, le décalage des routes par paliers, etc.

Figure10 : Fissuration et affaissement de l'avenue Ahmed Chafai sur la RN24.

Figure 11: Arrachement au pied du glissement d'ordre de 1 m.

II-1-7-6.Depuis 2010

Depuis 2010, le mouvement évolue d'une manière plus lente, avec des vitesses moyennes en surface de l'ordre de 10 mm/an. Ceci est déduit des observations visuelles réalisées lors de visites d'inspection régulières, le site ne faisant l'objet d'aucun suivi topographique ou inclinométrique. La réparation des réseaux enterrés a participé au ralentissement du mouvement.

Au cours des cinquante dernières années, la cinématique du glissement de terrain est donc caractérisée par plusieurs phases d'accélération notables lors de certaines périodes hivernales au cours desquelles l'amplitude totale des déplacements en surface est restée faible (inférieure à 1 m) et la géométrie du versant n'a pas été notablement modifiée.

II-2.L'évolution Du Glissement De Tigzirt Entre 2011 et 2012

Evolution du trait de côte :

Figure 12: Avancement du trait de côte (prise en novembre 2011) au pied du versant.

Figure 13 : Bombement du trait de côte(prise en mai 2012) au pied du versant.

Les fissures au niveau du sol:

Figure14 : Evolution des fissures sur le sol (prise en novembre 2011).

Figure15 : Evolution des fissures sur le sol, elles s'élargissent (prise en mai 2012).

Fissure au niveau des bungalows :

Figure 16: Poteau cisaillé du Bungalows.

Figure17 : Arbre incliné.

Fissure au niveau de la route :

Figure18 : Pas d'apparition de fissure sur la route après avoir refait la chaussée (prise en Avril 2011).

Figure 19: apparition de fissure sur la route (prise en janvier 2011).

Figure 20 : Fissure au niveau du mur de soutènement (prise en 2011).

Figure 21 : Elargissement de la fissure au niveau du mur de soutènement (prise en 2012).

II-2-1.Solutions d'urgence mise en œuvre par les pouvoirs publics

II-2-1-1.Le reboisement des versants

La déforestation à contribuée considérablement a l'accélération du mouvement, car plusieurs dégradations ont été constatées. Pour compenser et atténuer la gravité des désordres, une démarche du reboisement et reforestation volontaire des habitants a été mise en exécution. En

effet, le couvert forestier protège de la dégradation des terres et de la désertification en stabilisant les sols et en réduisant l'érosion hydrique (ceci permet d'atténuer le glissement superficiel et d'empêcher la création de zones d'infiltration). Cependant, ce reboisement reste très insuffisant pour ralentir le glissement assez profond de Tigzirt.

Figure 22 : L'implantation au pied du versant des arbustes.

II-2-1-2.Le drainage des eaux superficielles

La présence d'une nappe d'eau pérenne, affectant la pente ou son pied est un facteur d'instabilité (Fig.23 et Fig.24).Les précipitations abondantes sur une longue période (saison des pluies de novembre à avril) constituent dans une très grande partie des cas un facteur déclenchant prépondérant. D'une manière générale, l'eau s'infiltre dans les matériaux meubles (remblais, éboulis, marne altérées.. etc.) et réduit les caractéristiques mécaniques (développement de pressions interstitielles, chutes de cohésion). Dans les matériaux rocheux, les surpressions hydrostatiques dans les fissures peuvent occasionner des départs de blocs rocheux de grès.

Figure 23 : Abondance de l'eau (par la présence du roseau).

Figure 24 : Implantation des puits drainants dans des terrains de particulier.

III.CONCLUSION

Le glissement peut avoir lieu même dans le cas des faibles pentes. Le mouvement est accéléré par l'effet des pressions interstitielles et des surcharges suite aux travaux d'extension effectués dans la ville de Tigzirt.

Le manque de reconnaissance géotechnique des sols dans cette zone instable ne nous a pas facilité la tâche pour la détermination des caractéristiques mécaniques, d'étudier les déformations des sols et l'évolution des niveaux de la nappe par la défaillance des inclinomètres et des piézomètres implantés sur le site.

Pour établir un profil représentatif de la zone instable de Tigzirt, on a recours dans le chapitre suivant au système d'information géographique Map-Info pour le bon dimensionnement du profil à étudier dans la partie numérique.

CHAPITRE III

CARTOGRAPHIE ET ZONATION DE L'ALEA DU GLISSEMENT DE TIGZIRT

I-INTRODUCTION

La cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain a connu un fort développement méthodologique et la démocratisation des SIG a aussi connu un essor depuis la fin des années 90 (Guzzetti et al., 1999; Chacon et al., 2006). Les objectifs des SIG portent essentiellement sur l'élaboration d'une méthode d'évaluation quantitative de l'aléa en la répartissant à des études thématiques (précision).

Le développement considérable des SIG depuis les dix dernières années a permis d'augmenter la puissance des techniques d'évaluation et de cartographie de l'aléa à l'échelle régionale. Ce développement s'est observé principalement au niveau des méthodes quantitatives qui requièrent des analyses plus sophistiquées que les méthodes qualitatives. Les premières applications simples datent des années 1970 (Aronoff, 1989).

Par contre, c'est au milieu des années 1980 que l'utilisation des SIG s'est répandue grâce au développement d'applications commerciales et de la disponibilité des ordinateurs personnels.

Ces systèmes d'information géographique qui, au départ, n'intervenaient que dans l'automatisation de certaines tâches de reproduction cartographique et de dessin assisté par ordinateur, sont maintenant des outils qui permettent de réaliser des opérations complexes d'analyse spatiale telles que des calculs de pentes, de flux et d'identification de bassins versants (Aronoff, 1989). Le format matriciel est couramment employé parce qu'il permet de réaliser simplement des opérations d'algèbre cartographique ainsi que des opérations d'analyse de voisinage pour extraire automatiquement des paramètres de forme du terrain naturel.

Les SIG permettent de produire de l'information, de l'organiser, de la représenter et de l'interpréter. Ils sont d'abord utilisés pour exploiter des données existantes, entre autre la création des profils à partir des essais in-situ, cela est possible une fois toutes les variables créées, organisées et géo-référencées. Ces données peuvent ensuite être représentées sous forme d'un profil. Enfin la superposition de ces informations peut être exploitée dans le chapitre modélisation numérique.

La carte est créée en mode raster, les données et les informations ont été incluses, la simplicité et l'unicité de ce format permet une continuité dans les traitements susceptibles d'être automatisés (Clémence Guillard 15 Septembre2009).

Si l'informatique a d'abord permis des progrès dans l'automatisation de la production cartographique, les SIG vont bien au-delà d'une simple fonction de stockage et de restitution graphique. Par leurs possibilités de modélisation et de gestion, par leurs fonctions d'analyse et d'interrogation, par les possibilités de mise en relation des objets les uns par rapport aux autres, par leurs capacités à stocker et à traiter de gros volumes d'information, les SIG ont profondément révolutionné les méthodes traditionnelles d'analyse et de gestion de l'espace. Grâce aux possibilités de modélisation et de calcul, l'informatique et les SIG n'ont pas seulement permis l'amélioration de techniques existantes, mais ils ont remis en cause bon nombre de concepts classiques de la géographie et ont renouvelé la dynamique de cette discipline. (Marc Souris2002).

II-CHOIX DU LOGICIEL MAP-INFO COMME SYSTEME SIG

Map-Info est plus qu'un logiciel de cartographie, il offre des outils performants d'analyse spatiale, de géocodage par adresse, de visualisation des résultats, de création et d'édition de données géographiques et tabulaires (littérales), de cartographie thématique et de mise en page. Par le moyen de la boite de dialogue « contrôle de couche » ; chaque *couche de dessin* contient un outil graphique [modifiable et/ou sélectable] facile à gérer.

La première couche qui va englober et permettre de faire toutes les études thématiques est la carte callée qu'on appellera Image *Raster* qui va permettre de dessiner les courbes du niveau, l'hydrologie, les sondages…….Etc (toutes les études thématiques possibles du site du centre-ville de Tigzirt).

Les photographies aériennes et les cartes d'état-major de la zone instable de Tigzirt ont été scannées et enregistrées sous des fichiers supportés par le logiciel Map-Info (sous un format JPEG). Ces images « Raster » vont servir de fonds pour la cartographie envisagée (fond pour la digitalisation des informations, fond pour les analyses spatiales,…).

En ouvrant la fenêtre de Map-Info, on appelle l'image des cartes d'état-major de Tigzirt d'Est et d'Ouest et on sélectionne le type de *Fichier Raster Image*.

Le but de cette cartographie est de connaitre tout ce qui caractérise le site de Tigzirt et d'avoir un aperçu du mécanisme de déformation du versant instable et avoir une probabilité de l'évolution de la déformée dans le temps.

II-1. Le calage de l'image raster et l'étude thématique

Une image raster (numérisée) est une image électronique divisée de manière régulière et chaque valeur de l'espace ligne/colonne (pixel) est associée à une ou plusieurs valeurs décrivant les caractéristiques de l'espace (X,Y). Plusieurs couches d'informations (composées de pixel) peuvent être superposées représentant chacune un thème particulier.

On doit caler chaque image raster avant de l'utiliser, pour que Map-Info puisse effectuer des calculs géographiques (distances, surfaces,…).*Caler* signifie entrer les coordonnées géographiques et indiquer quels points de l'image correspondent à ces coordonnées. Une fois la boite de dialogue est apparue, l'unité (mètres) est choisi, on définit ensuite le type de projection de l'image à l'aide du bouton *Projection dans la barre défilante. Le système de projection utilisé est UTM (WGS84)* Universal Transverse Mercator (UTM). On clique en un point de coordonnées connues de la fenêtre pour lui attribuer les coordonnées pour le calage. Afin d'assurer le calage de la carte, il est obligatoire de disposer d'au moins trois points qui ne se trouvent pas sur le même alignement.

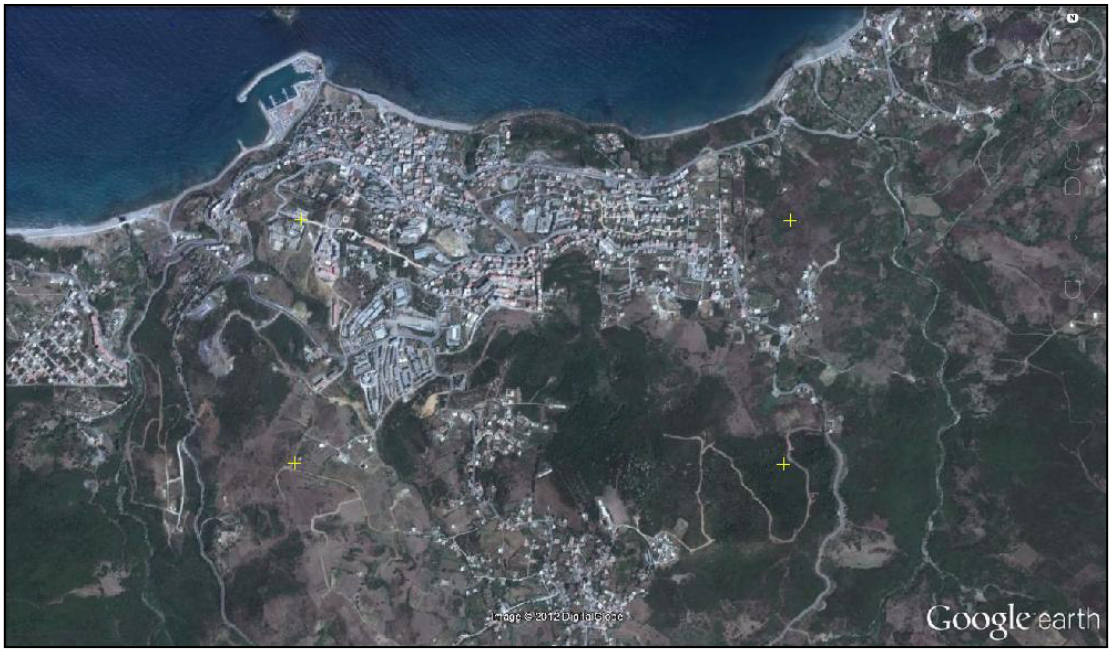


Figure 1: Repère de la carte de « Tigzirt ».

III-DESCRIPTION DU GLISSEMENT DU CENTRE-VILLE DE TIGZIRT

Ce glissement est situé au centre-ville de « Tigzirt » qui est une région localisée dans des terrains appartenant à l'unité tellienne de Dellys à l'Ouest et à l'unité numidienne dans sa partie Est. La ville de Tigzirt connait depuis l'hiver 1970 une intense activité des mouvements de terrain. Deux instabilités majeures ont été recensées au niveau de ce site ; mais notre étude

s'intéresse au glissement du centre-ville qui est le plus ancien et étendu, il s'agit du glissement qui s'étale sur une superficie supérieure à 136 ha et mobilise une couche superficielle de 30m de profondeur (Fig. 2). Ce glissement affecte une colline côtière d'une inclinaison d'environ 13° composée d'un substratum de marne schisteuse surmontée par des éboulis quaternaires composés de blocs de grès emballés dans une matrice argileuse. Les résultats des sondages carottés montrent que la surface de rupture est plane ; elle se développe au niveau de l'interface entre le substratum et le couvert superficiel caractérisé par une très faible résistance au cisaillement. En outre, l'activité de ce mouvement de terrain s'est accentuée durant ces dernières années par l'effet des aménagements intenses et anarchiques. Par ailleurs, l'instabilité présente également une nette sensibilité aux facteurs climatiques (les précipitations) qui se traduisent par une augmentation du niveau de la nappe phréatique ainsi qu'une importante érosion superficielle et profonde des versants de Tigzirt.

Figure 2 : Localisation du glissement de terrain du centre-ville de Tigzirt.

IV-LE SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE REALISEE POUR TIGZIRT SOUS MAP-INFO

Les images et les cartes calées ont servi de fonds pour la réalisation de plusieurs couches vectorielles.

IV-1. La couche vectorielle des courbes de niveaux du centre-ville de Tigzirt

A partir des cartes d'Etat-Majorde « Tigzirt Est » et « Tigzirt Ouest », la morphologie du versant peut être définie en digitalisant les courbes de niveaux puis en créant une table qui s'appelle «courbes de niveaux. Tab » qui sera réalisée sous Map-Info par des éléments poly-lignes de couleur rouge. Chaque courbe de niveau a un identifiant « ID » qui caractérise son altitude (Fig.3).

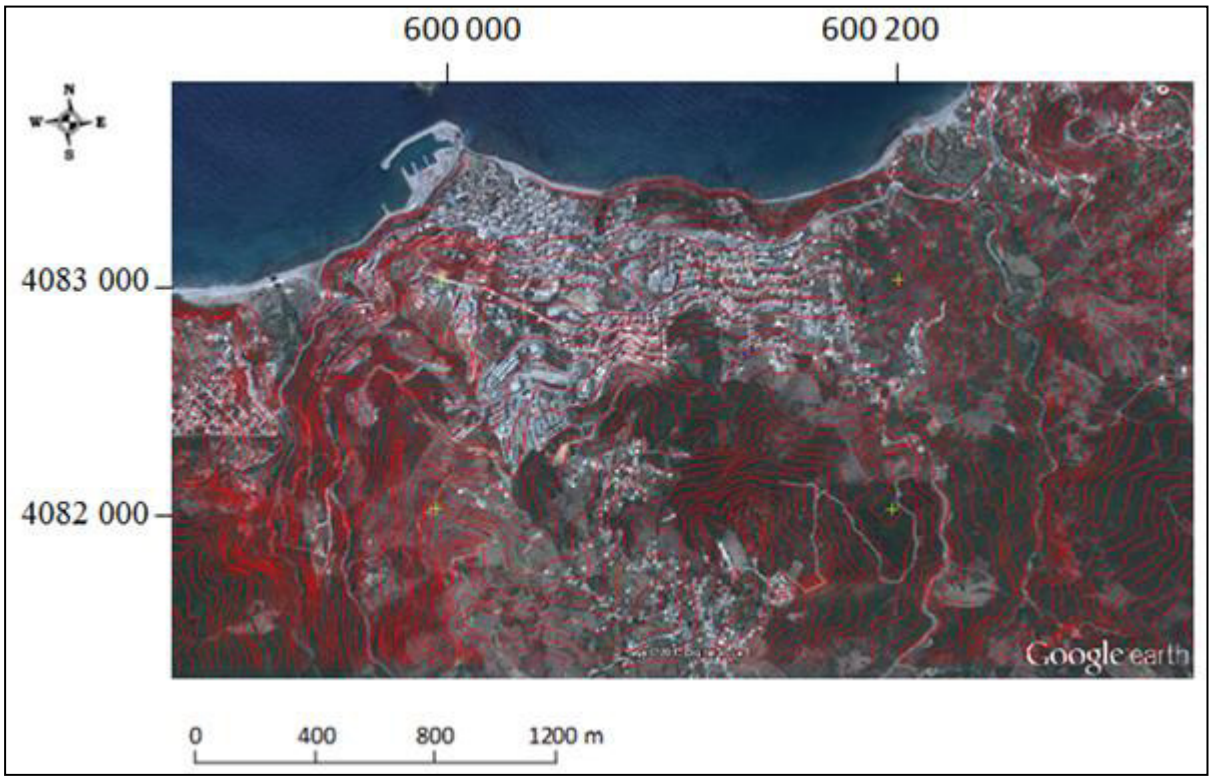


Figure 3 : Les courbes de niveaux du versant de Tigzirt.

IV-2. Couche vectorielle de l'hydrologie de la zone d'étude

La couche vectorielle «hydrologie.TAB» est réalisée en utilisant des éléments «ligne discontinue » uniquement. L'hydrologie de la région de Tigzirt est caractérisée par la présence de deux cours d'eau principaux ainsi que de plusieurs ravinements secondaires et de sources d'eau. De plus, le pied du versant instable beigne dans la mer. Par ailleurs, cette hydrologie a agi négativement sur la stabilité du versant de différentes manières. Les modifications du régime hydraulique (saturation du matériau, augmentation des pressions interstitielles, etc.) varient selon les saisons et les fluctuations de la nappe (teneur en eau des échantillons). La zone d'étude est limitée de chaque côté par un ruisseau (Azal à l'Ouest et un creux à l'Est de la plage Ferraoun) ; une hydrologie qui engendre une érosion naturelle

(ruissellement, érosion de berges). Le glissement de Tigzirt est transrationnel, caractérisé par une zone de faiblesse discontinue, de mauvaise caractéristique (désignée par la zone de rupture), dont les couches stratigraphiques se limitent à 10 m à l'aval et 30 m à l'amont. L'effet des circulations de l'eau au toit du substratum ramollit davantage la couche savon et engendre la réactivation du mouvement.

Un seul inclinomètre a été installé en 2009 pour suivre l'évolution des déformations du sol en profondeur :

• Inclinomètre (SC01) de 24 m de profondeur, implanté en amont de la RN24dansle glissement principal de Tigzirt des (12 bungalows) centre-ville.

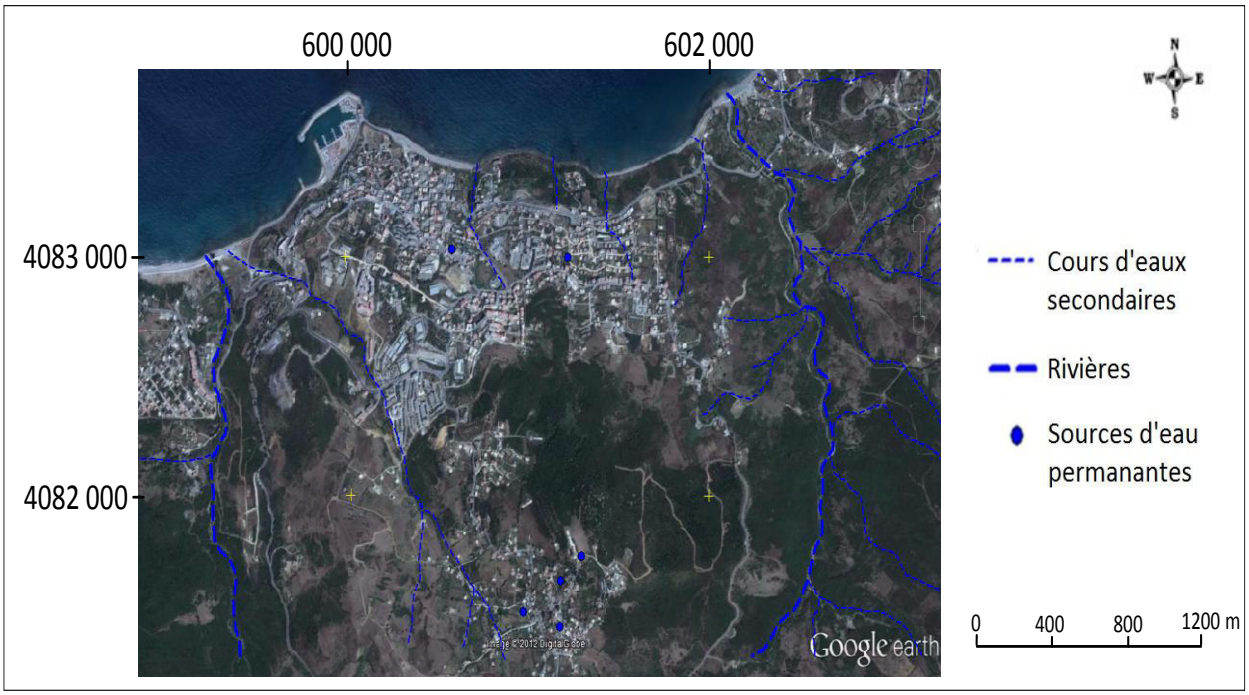


Figure 4 : Hydrologie de la ville de Tigzirt.

IV-3. Couche vectorielle des sondages (2009GEOMICA)

La couche vectorielle «sondages.TAB » est réalisée en introduisant les coordonnées des sondages à des éléments de type « points »désignés avec des petits cercles.

Ce versant est localisé dans des flysch. Les campagnes de reconnaissance géologiques et géotechniques réalisées dans cette région ont révélé la présence de zones de remaniement situées à l'interface entre le substratum et les couches superficielles *(LNHC 2002 ; Geomeca 2009)*. Par ailleurs, les caractéristiques mécaniques des formations géologiques qui composent ce versant altéré en présence de l'eau sont réduites. Elles favorisent l'apparition de

mouvements de terrains actifs et étendus. La Figure 5représente la position des(05) sondages carottés de la compagne de 2009 dans le site du centre-ville ; une description lithologique détaillée ne peut guère être faite en raison de nombreux manques de carottes. Une interpolation des données géologiques sur terrain sera faite pour pouvoir effectuée des coupes lithologiques du terrain en supposant que c'est continu sur le long du site.

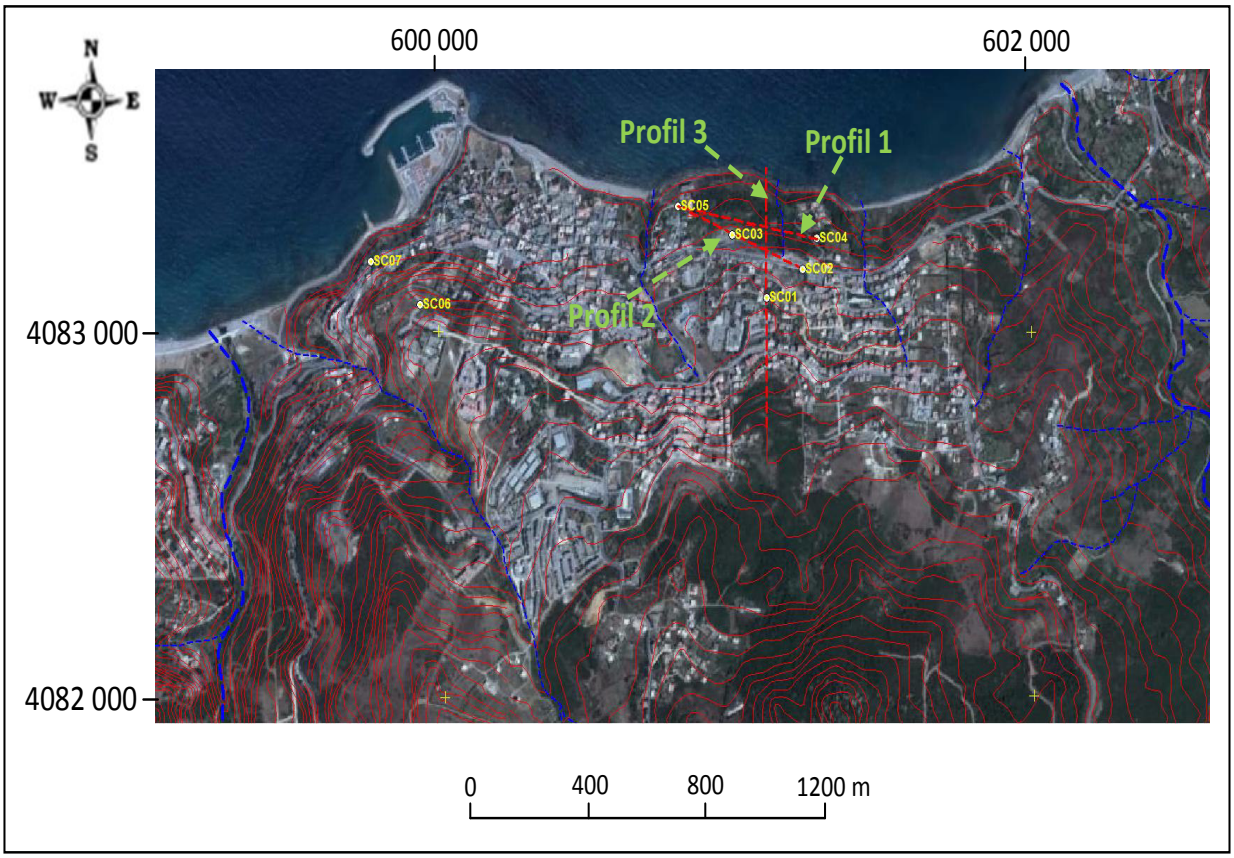


Figure 5 : Localisation des sondages et des profils.

Ces sondages montrent principalement :

- Une couverture quaternaire meuble constituée de limon argileux et caillouteux à gros blocs de grès, localement abondants ; il s'agit de formations éocènes remaniées, mêlées à des colluvions, des épandages torrentiels, voire à des graves roulées et du sable d'anciennes plages surélevées.

- Un substratum marno-schisteux altéré dont le toit se situe à une profondeur variant de 10 m(SCO5) à près de 30 m (SCO1).

IV-4. La couche vectorielle de la morphologie du mouvement

Ce glissement survient généralement en situation de forte saturation des sols en eau. Il peut mobiliser des volumes considérables de terrain, qui se déplacent le long de cette pente qui est de faible inclinaison mais qui parcourt une longueur considérable. Ce phénomène est assez répandu dans la région de Tigzirt.

A l'aide des courbes de niveau qui ont servies comme support pour la cartographie géomorphologique observée en 2011, la niche d'arrachement principale a été détectée au sommet de la Colline du versant Nord du massif éocène Sour Bouaouine (la zone de départ de ce mouvement étendu se situerait au pied des montagnes).La distance entre la niche d'arrachement et le front baignant dans la mer, est d'ordre de 1à 1.5 km environ.

Sa largeur varie de 300 m à 800 m, l'estimation de la surface mobilisée est supérieure à 136ha. Une analyse plus détaillée reste à faire pour mieux connaître la géométrie des volumes mobilisés et la profondeur des surfaces de glissement et des circulations d'eau superficielle, ceci dans le but d'apprécier l'évolution des fronts instables proches de la mer. A l'aide du GPS, les zones d'arrachement sur le terrain ont été détectées, repérées et localisées au pied du versant. Des arrachements proches des sondages (SC03 et SC05 et SC04), et ceux situés au sommet du versant au niveau de la montagne sont représentés avec des poly-lignes discontinues en jaune nommés « arrachement .Tab ».

Par le biais de l'arrachement principal et suivant le bombement qui épouse la forme de la pente, la forme adoptée par le glissement lors de son évolution a été décelée correspondante à une extension latérale et une avancée vers la mer.

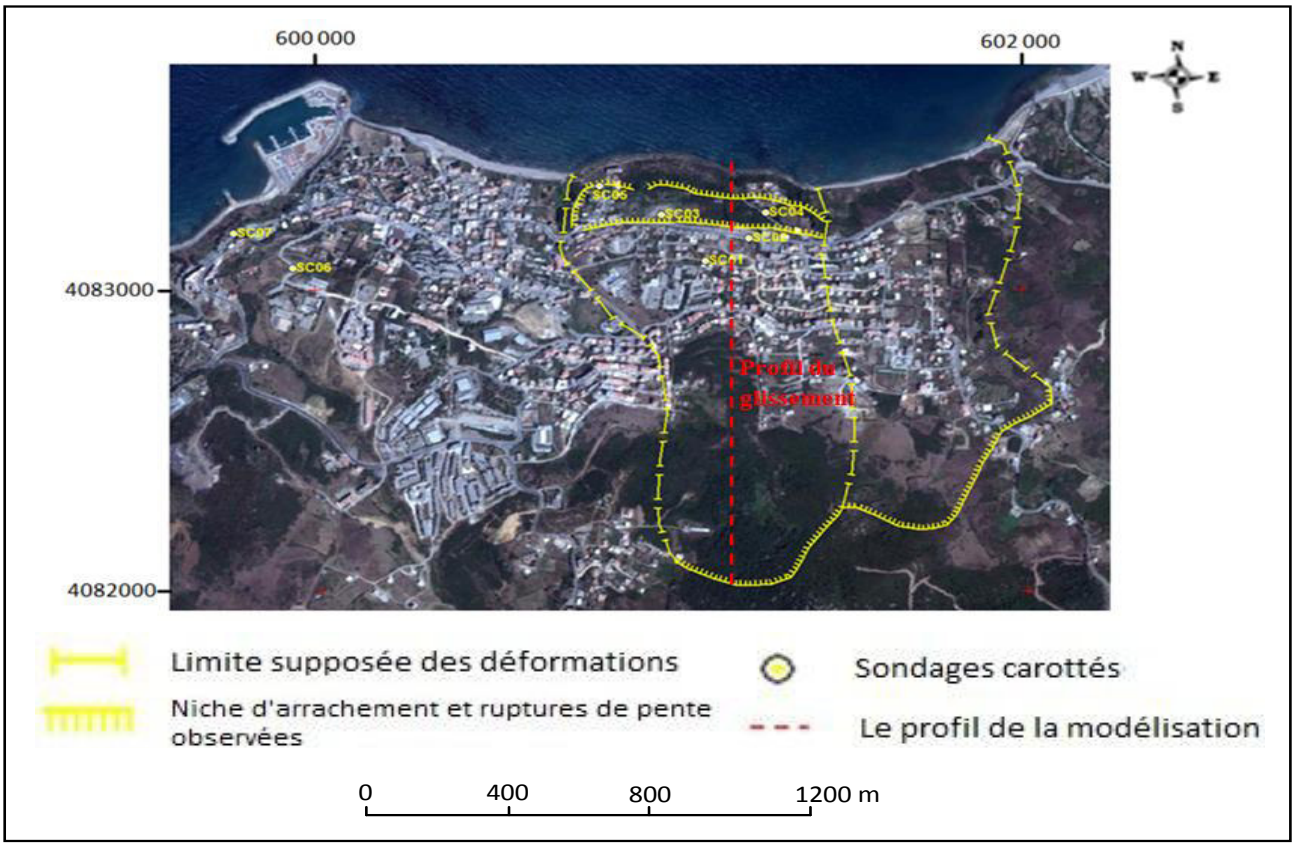


Figure 6 : Morphologie du glissement du versant de Tigzirt.

IV-6. Géoradar

Une mission a été effectuée le 27août 2009 par ANTEA-Hydro-environnement, pour compléter la reconnaissance sur le terrain. Deux profils Georadar ont été réalisés pour le glissement du centre-ville de Tigzirt pour reconnaitre les fissures du sol en profondeur qui sont enregistrées sous «Géo-radar.Tab » représentées avec des triangles rose et une flèche qui montre où est sa direction.

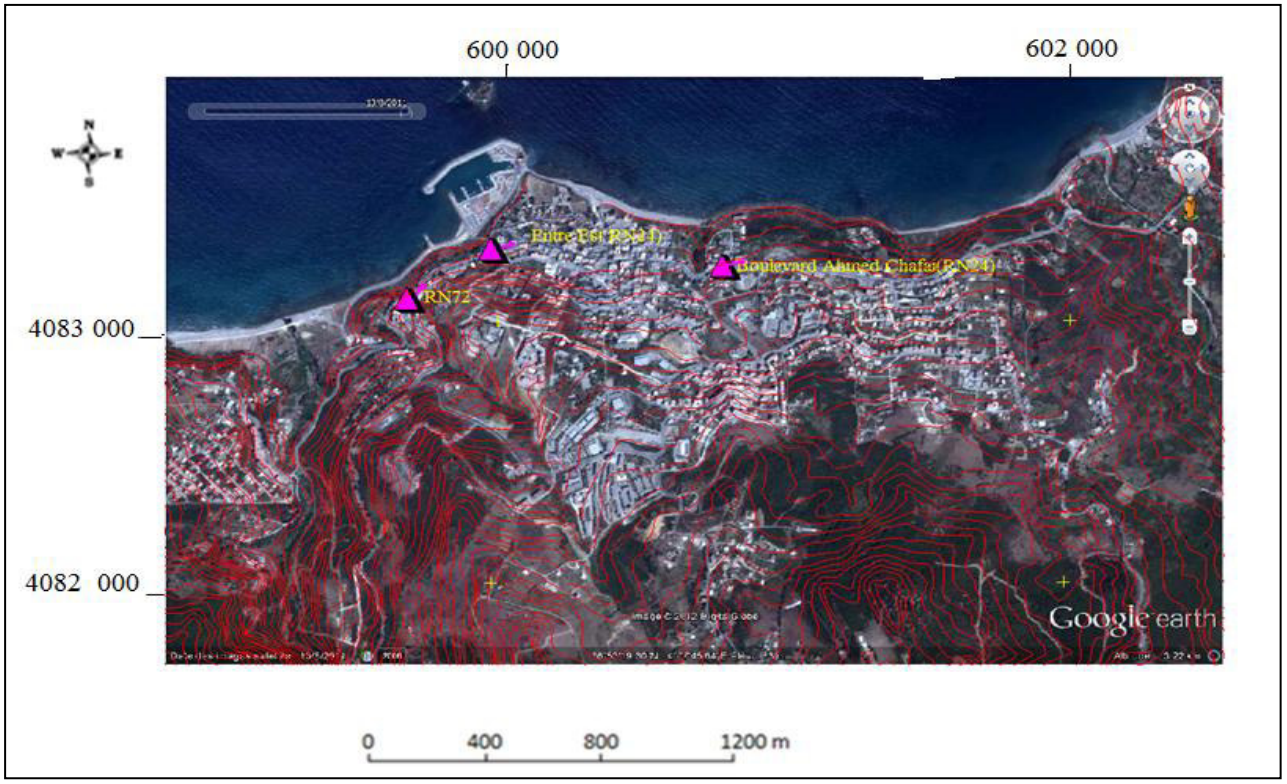


Figure 7 : Repères des profils Géo-radar.

IV-5.Tomographie électrique

Le 17 août 2009, un profil de tomographie électrique a été réalisé par un bureau d'étude français ANTEA, au droit de l'arrachement amont du glissement dans la zone du parc communal situé près du sondage S03. Les résultats préliminaires de ces profils sont présentés ci-dessous et intégrés dans la base de données SIG comme : «profil tomographie électrique.Tab ».

Les données de tomographie électrique ont été acquises par le dispositif Wenner-Schlumberger. L'avantage de ce dispositif réside dans sa bonne résolution aussi bien verticale que latérale, ce qui le rend très approprié pour ce type de problème. Il offre également un meilleur rapport signal/bruit comparativement à d'autres configurations.

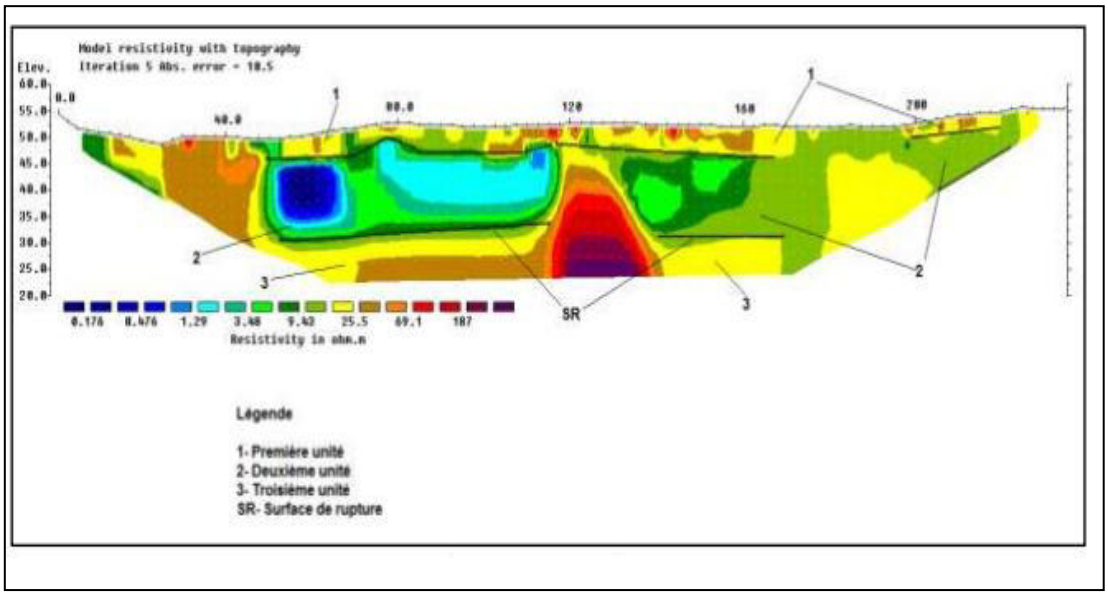


Figure 8 : Coupes de résistivité électrique.

1- la première unité électrique correspond à la couverture composée de matériaux fins, meubles (sable et d'argile limoneuse), dont les résistivités varient entre 10 et 30 Ohm.m.

2- la deuxième unité possède des résistivités inférieures à 10 Ohm.m (de 0.14 à 10 Ohm.m) et correspond vraisemblablement à des matériaux remaniés. Les faibles résistivités montrent une teneur plus élevée en eau salée.

3- la troisième unité correspond probablement aux marnes du substratum en place, avec des résistivités entre 25 et 50 ohm.m.

Un ensemble résistant mal identifié, centré sous les stations 120 et 125, est difficile à interpréter. Il pourrait correspondre à un amas de blocs gréseux.

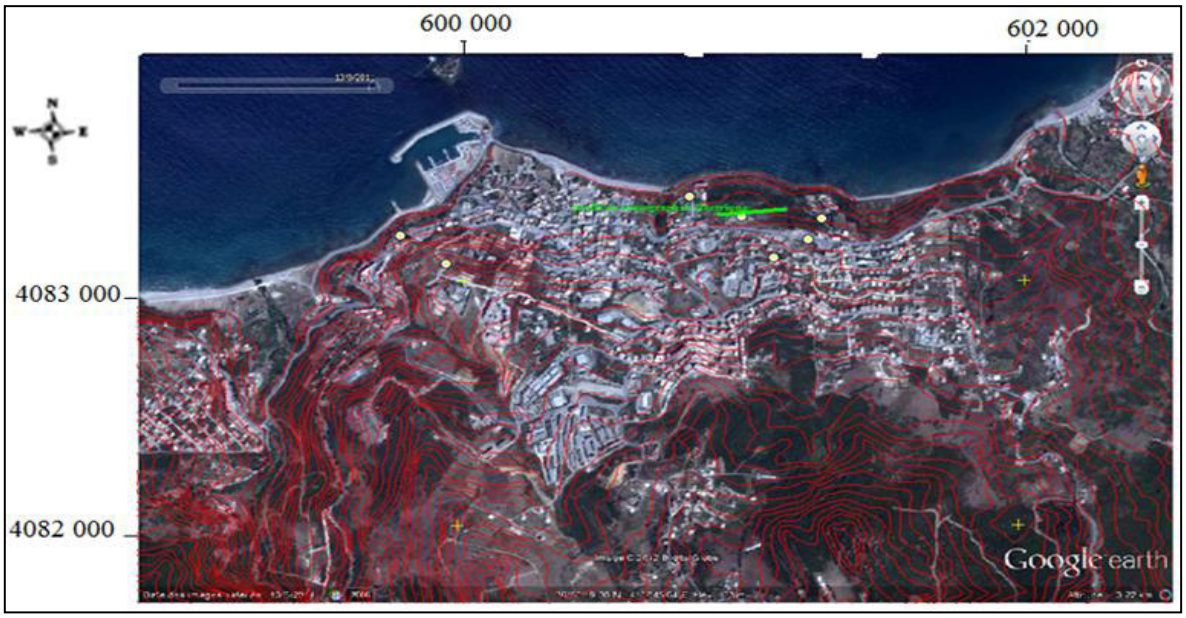


Figure 9 : Localisation du profil électrique tomographique.

IV-7. Suivi inclinométrique

Une mesure de référence a été effectuée, en décembre 2009, sur le sondage (SC01)[profondeur 25,25 m].La direction de l'axe AA'(Fig10), mesurée à la boussole sur place, est de N-15-E. Elle avait pour objet d'effectuer la mesure de référence. Il s'agit là d'un relevé de l'état initial de la forme du tube scellé dans le sol. Le déplacement constaté est de l'ordre de 42.5cm**.** Une seule mesure est effectuée, l'inclinomètre s'est cisaillé au bout de la deuxième mesure à une profondeur de 25,25 m.

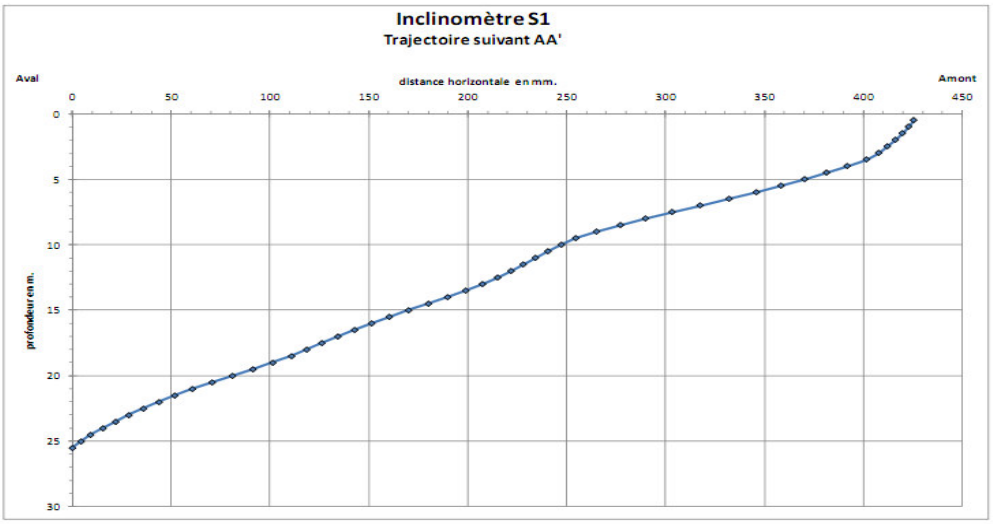


Figure 10 : Résultats de l'inclinomètre (SC01) du 21-12- 2009ANTEA-Hydro-Environnement-TTI)

IV-8. Suivi piézométrique

Une première mesure a été effectuée en décembre 2009 sur les sondages (SC02) et (SC05). L'intervention a été réalisée le 21 décembre sur le site de Tigzirt. Elle avait pour objet de mesurer la profondeur du niveau d'eau dans les sols au droit des deux piézomètres opérationnels (SC05) et (SC02).

Les mesures ont donné :

Pour le Piézomètre du SC05 ; le niveau d'eau est mesuré à 45 cm par rapport au niveau du sol, sachant que la profondeur du piézomètre étant de 15,74m.

Pour le Piézomètre du SC02 ; le niveau d'eau est mesuré à 6.9 cm par rapport au sol, la profondeur du piézomètre étant de 26,10m par rapport au sommet du tube PVC qui se situe au ras du sol.

Cependant, juste après avoir effectué les premières mesures, ces piézomètres ont été endommagés et obturés. Toutes ces informations sont répertoriées dans une table appelée « inclino et piezo.Tab » dans les SIG.

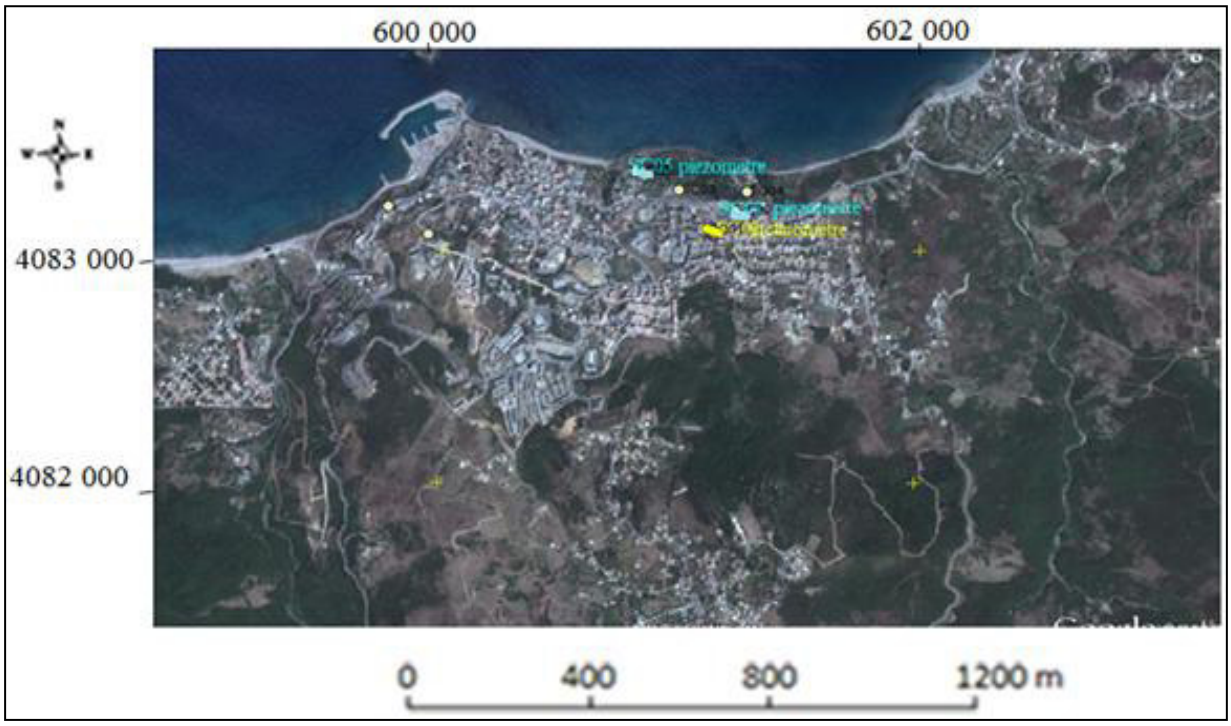


Figure 11 : Localisation des piézomètres au niveau des (SC02) et (SC05) avec un inclinomètre (SC01).

IV-9.Suivi Topométrique

Un programme de suivi topo-métrique a été proposé à la DUC en mars 2010, mais n'a pas encore été mis en œuvre.

V-LES COUPES LITHOLOGIQUES DU SITE DU CENTRE-VILLE

Il faut distinguer une partie « Est » stable soumise seulement à une érosion littorale et une partie « Ouest » entièrement déstabilisée entre la RN24 et la côte avec une activité plus forte au niveau des « Bungalows ».

Pour avoir une idée de la lithologie rencontrée sur site, trois profils ont été effectués : deux profils longitudinaux et un profil vertical (Fig5).Ces profils donnent une interprétation du contexte géologique et lithologique du grand mouvement de Tigzirt sur lequel ont été construits des quartiers avec de grands bâtiments. Ils ont été réalisés à partir des sondages carottés (BET Geomeca 2009) d'une manière représentative du terrain car ils atteignent de grande profondeur et sont éparpillés sur tout le secteur d'étude, tout en sachant que les sondages réalisés par(LNHC.2002) n'apportent qu'une indication sur un secteur localisé.

Les Figures (12 et 13) nous donnent un aperçu de la forme du glissement selon son avancement vers la mer avec deux bombements très légers. Ceci a été Confirmé par les sondages réalisés suivant la direction de la pente et montrant un seuil du toit du substratum entre 10 et 20m d'altitude du versant Nord (En bas de la RN24).

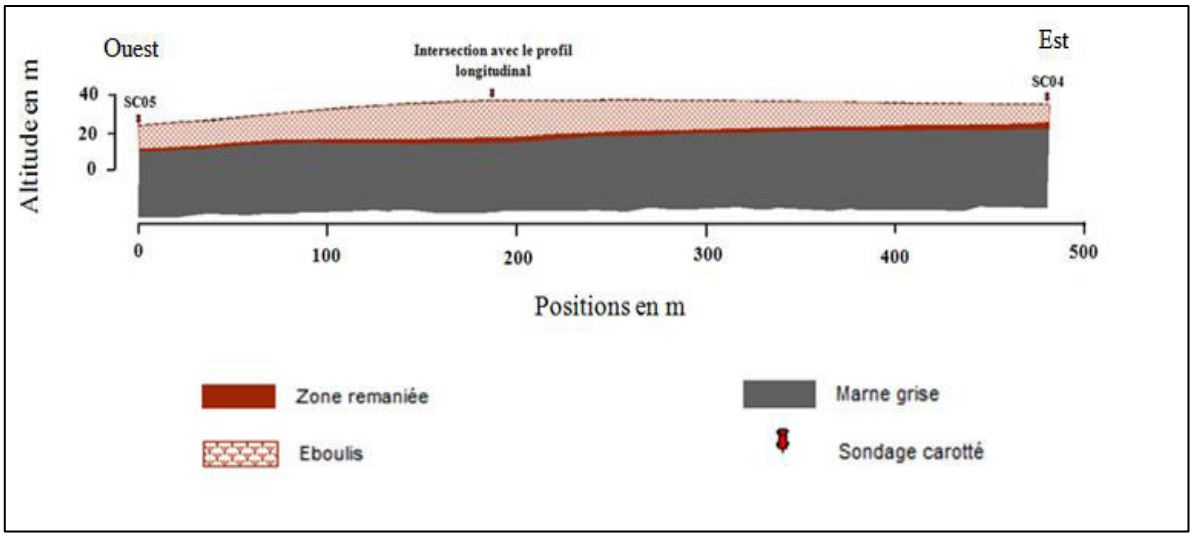


Figure 12 : Coupe transversale réalisée selon les sondages SC05-SC04 (Profil 1de la figure 5).

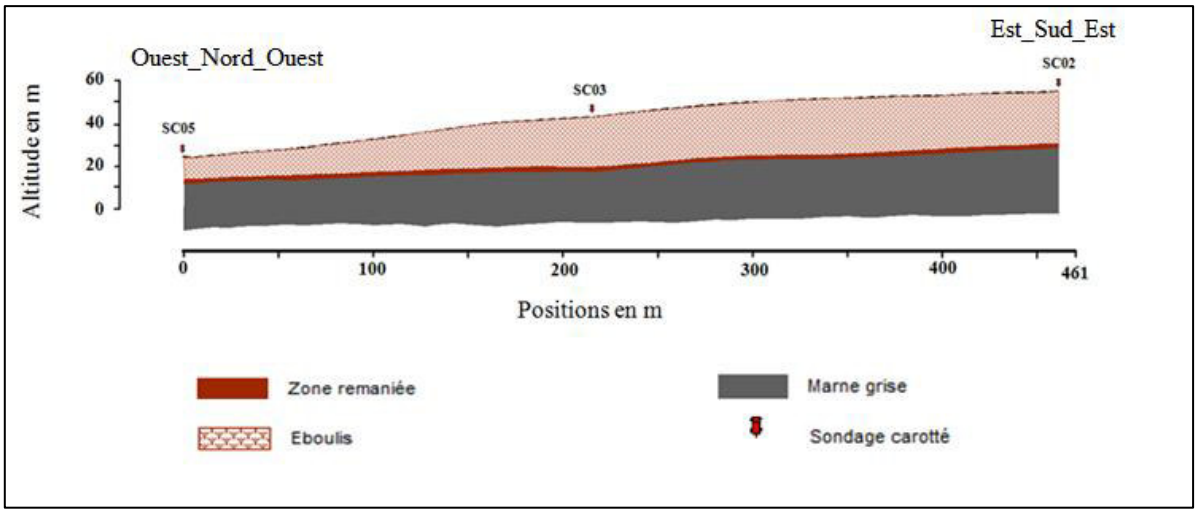


Figure 13 : Profil géologique réalisé selon les sondages SC05-SC03-SC02 (Profil 2 de la figure 5)**.**

Le profil vertical nous donne l'inclinaison et la direction de la pente sans oublier les structures géomorphologiques rencontrées au niveau du terrain mobilisé qui sont les suivants : les dépôts quaternaires (Eboulis) recouvrent le substratum rocheux sur une épaisseur très variable entre le pied des reliefs montagneux (secteur Bouaouine-Cheurfa au Sud) et la côte. Ils sont constitués principalement de matériaux limono-argileux parfois sableux, avec un substratum marneux qui semble peu profond à l'amont de la RN24, 10m de profondeur au droit du sondage (SC05). Ce mouvement se manifeste épisodiquement par des tassements qui décalent la route de quelques dizaines de centimètres sans qu'apparaissent de véritables arrachements continus à l'amont. Sa structure lithologique se caractérise par un pendage prononcé de 20° à 40°, au sommet de la montagne. Ce toit peut atteindre une profondeur de 30m au droit du sondage (SC01).Une couche de terrain remaniée peu épaisse siège au toit du substratum qui résulte du phénomène d'érosion profond lors des saisons de fortes précipitations provoquant une saturation du socle par infiltration(Fig.14).Celle-ci peut être sujette à un glissement sous une forme plane qui longe tout le versant qui est connu littéralement par une couche savon dans des terrains marneux.

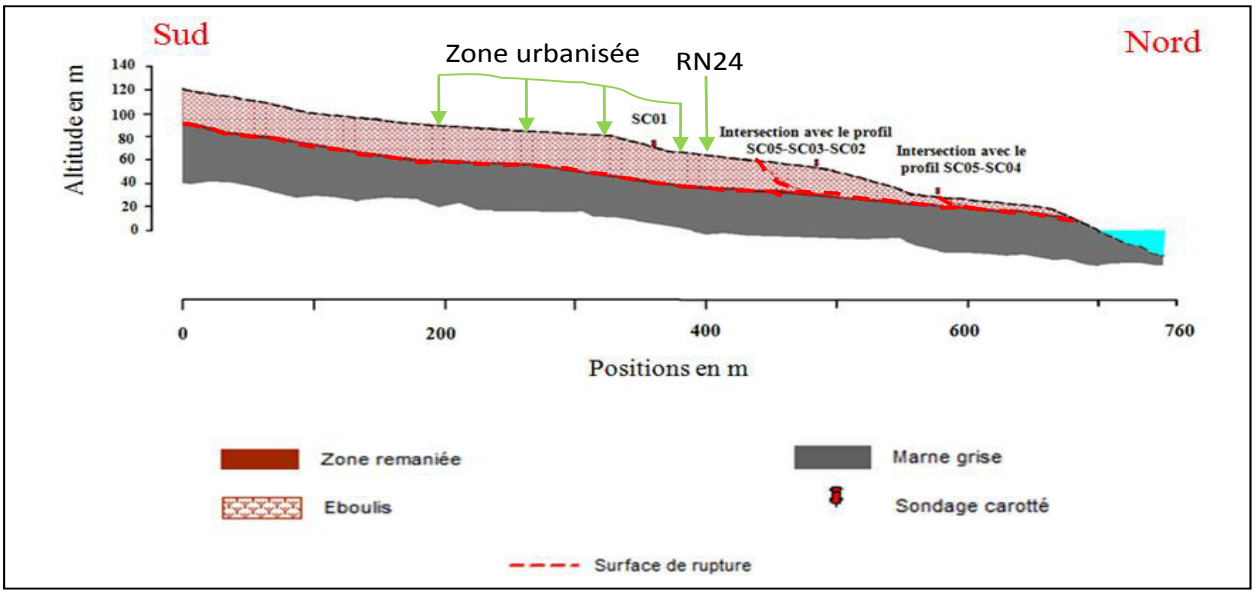


Figure 14 : Structure du mouvement de terrain de Tigzirt (Profil 3 de la figure 5).

VI-ETUDE DU RISQUE POUR LE GLISSEMENT DE TERRAIN DE TIGZIRT

Pour la cartographie du risque « glissements de terrain », évaluer le risque nécessite au préalable d'apprécier la susceptibilité des terrains à un type de glissement, c'est à dire la possibilité qu'un glissement se produise sur un territoire pour différentes conditions environnementales locales. Cela revient à répondre à deux questions : Quel type de glissement de terrain est susceptible de se produire ? Quels sont les facteurs de prédisposition ?

VI-1.Potentiel du risque au niveau du site de Tigzirt

Cette étude présente une méthodologie de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain. Les facteurs constituant les éléments du risque pour cette cartographie sont relatifs à la topographie, à la lithologie et à la géomorphologie (méthode de Fares et al, 1994). Ceci est obtenu en utilisant le mode de cartographie numérique basée sur la simulation des facteurs à partir des observations et des données de surface. Cette méthode s'appuie sur des moyens faciles et peu coûteux à mettre en œuvre.

Le choix de ces facteurs nous permet de délimiter le cadre propice au déclenchement des mouvements de terrain (glissements de terrain).

Ces facteurs sont cartographiés séparément pour obtenir les cartes de facteurs du risque. La superposition de ces cartes dans un ordre logique fait ressortir les relations entre la lithologie, la pente et les indices d'instabilité et aboutit à la carte des risques naturels.

A chacun des facteurs du risque, nous avons attribué un indice ($I_?$) dans une échelle numérique en rapport avec son importance relative dans la genèse des instabilités. Cette simulation nous permet de traduire les cartes de facteurs en cartes de simulation du risque.

VI-1-1.La carte du facteur géomorphologique

Selon les photographies aériennes, le suivi avec GPS et les observations sur le terrain, le risque sera évalué en fonction des masses déplacées. On arrive à délimiter deux secteurs avec leurs indices géomorphologiques correspondant. Selon la méthode appliquée, à chaque type d'instabilité est attribué un indice de risque. Dans le cas de Tigzirt, ces deux indices sont :

-Secteur à éboulements et à glissements de terrain :Ig=5.

-Secteur ne présentant aucune instabilité :Ig=1.

Les différents indices I sont définis dans la méthode de Fares et al., (1994) (tableau 1) comme suit :

Tableau 1 : Valeurs des indices en fonction des secteurs géomorphologiques Fares et al., (1994).

Secteurs Géomorphologiques	**secteur ne présentant aucune instabilité**	**secteur à petites instabilités potentielles**	**secteur à coulées anciennes et à ravinements**	**secteur à solifluxions:**	**secteur à éboulements et à glissements de terrain**
Valeur de l'indiceIg	Ig= 1	Ig= 2	Ig= 3	Ig=4	Ig=5

Cette délimitation en secteurs où domine chaque type d'instabilité nous permet de traduire la carte des indices d'instabilité en carte de simulation du risque lié à la géomorphologie (tableau 2).

Tableau 2 : Classement des indices en fonction du facteur de risque.

Classes	**Description du risque**	**Facteur risque**
Classe 1: Ig= 1	(présentantaucuneinstabilité)	Petit à négligeable.
Classe 2: Ig= 2	(secteur à petites instabilités potentielles)	Moyen
Classe 3: Ig= 3	(secteur à coulées anciennes et à ravinements)	Moyenà élevé

Classe 4: Ig= 4	(secteur à solifluxions)	Elevé
Classe 5: Ig= 5	(secteur à éboulements et à glissements de terrain)	Trèsélevé

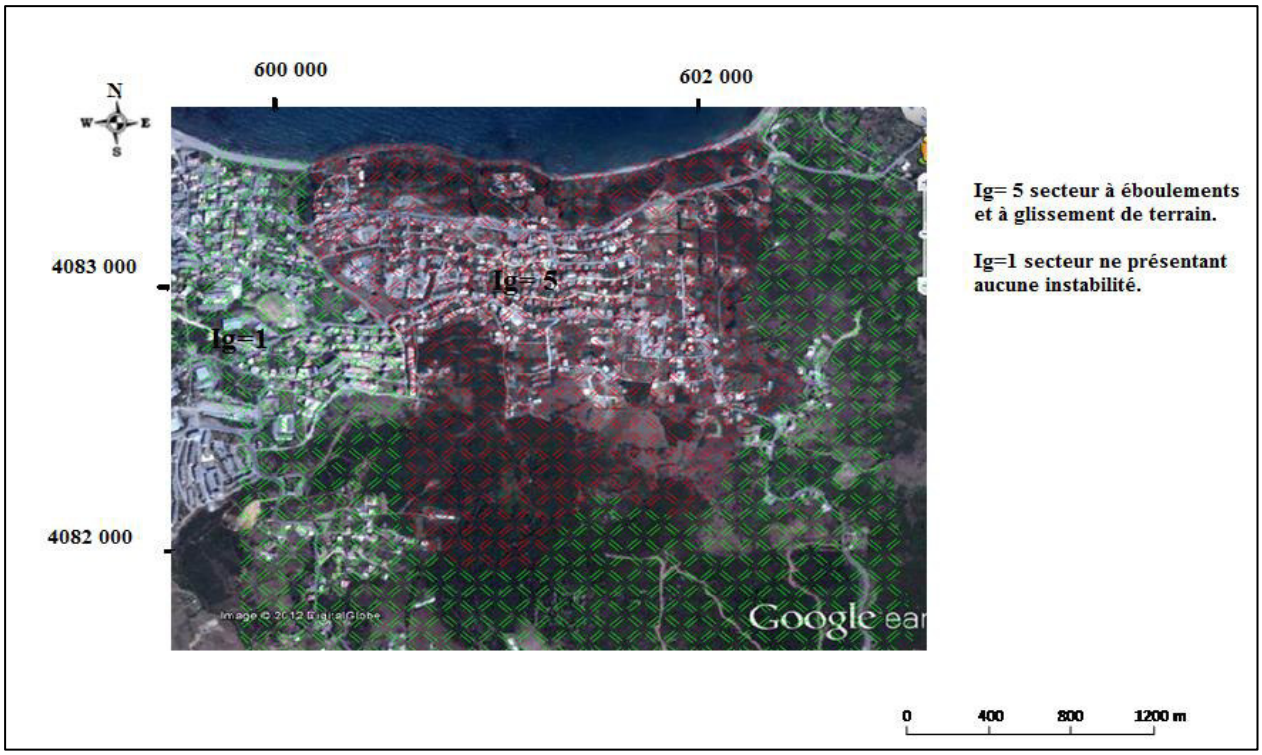


Figure 15 : Carte de simulation du risque lié à la géomorphologie.

VI-1-2.La carte du facteur pentes

La détermination cartographique de la pente limite naturelle pour chaque matériau rend possible l'utilisation directe de la carte des pentes dans une cartographie des risques naturels. Nous pouvons comparer les pentes des versants (P_v) aux pentes limites (P_l) des différents faciès (tableau 3) et nous avons attribué un indice de risque (I_P), comme suit (tableau 4):

Tableau 3 : Classement des indices en fonction des pentes des versants.

Ip=1	Ip=2	Ip=3	Ip=4
si Pv est inférieur à Pl, lp la pente du versant est stable et prendra cette valeur minimum.	si Pv est sensiblement égal à Pl	si Pv est supérieur à Pl	si Pv est très supérieur à Pl, lp prendra la valeur maximum

Tableau 4 : Classement des pentes des versants en fonction du facteur de risque.

Classes	Conditions du risque	Risque
Classe 1:Ip=1	(si P_v est inférieur à P_l, l_p la pente du versant est stable et prendra une valeur minimale.)	Petit à négligeable
Classe 2:Ip=2	(si P_v est sensiblement égal à P_l)	Moyen
Classe 3:Ip=3	(si P_v est supérieur à P_l)	Elevé
Classe 4:Ip=4	(si P_v est très supérieur à P_l, l_p prendra une valeur maximale)	Trèsélevé

Une carte des pentes a été établie à partir d'une carte d'Etat-Major, ainsi qu'une carte des courbes de niveaux. Selon la méthode de (Fares et al.,1994), deux classes de pentes ont été distinguées pour le site de Tigzirt [5%,10%] et [20%,40%] (tableau 5). Cette méthode permet d'attribuer des indices « I_p » (étude basée sur les calculs de rapports de surface). Nous avons gradué la simulation du risque en cinq niveaux dans une échelle numérique (1, 2, 3, 4et 5). Les valeurs attribuées aux indices I_p sont respectivement pour la première pente : I_p=3 et la seconde : I_p=5 respectivement dans cet ordre. Ceci nous conduit à transcrire les cartes de facteurs en cartes numériques appelées cartes de simulation du risque.

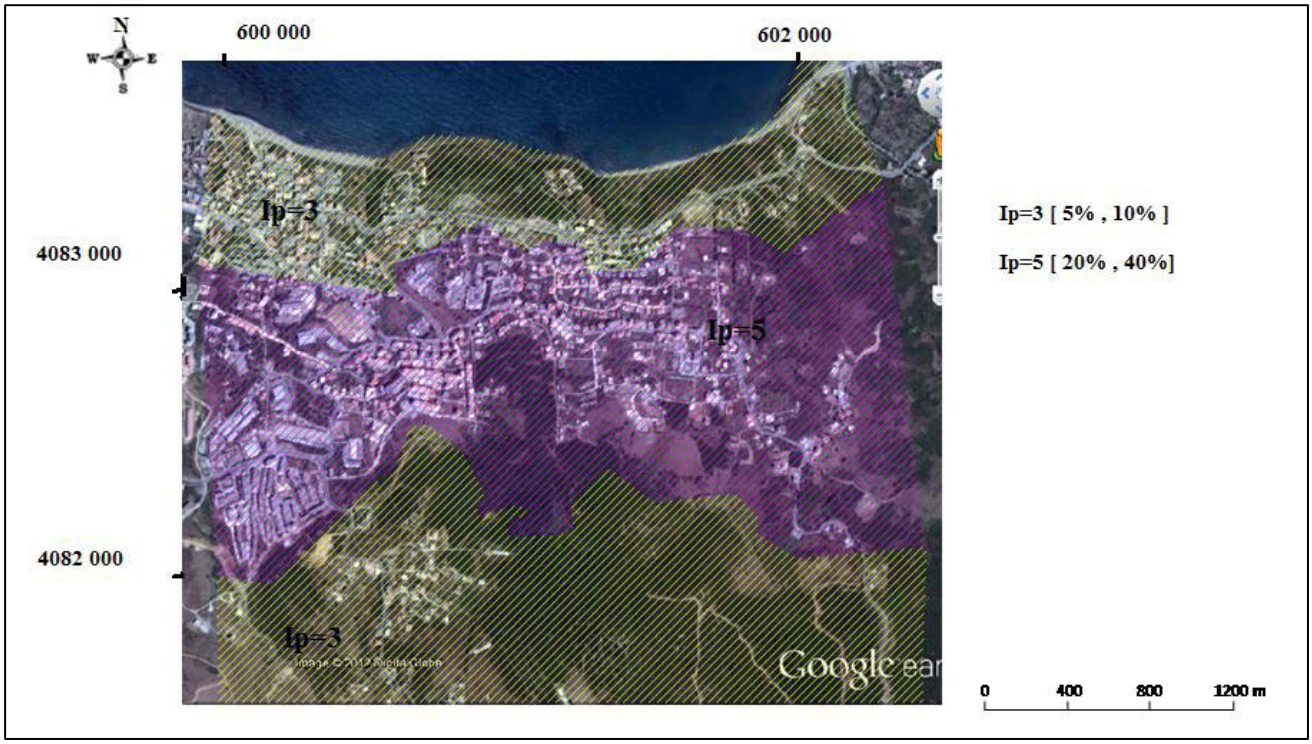


Figure 16 : Carte de simulation du risque lié à la pente.

Tableau 5: Indices de risque attribués aux différentes classes de pentes en fonction de la lithologie.

Classe de pente	Terrasses anciennes	Marnes bleues	Molasses	Grés	Marnes schisteuse	Schiste gréseux	Complexe bréchique
[2.5%,5%]	1	1	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
[5% ,10%]	(-)	2	(-)	1	1	(-)	(-)
[10%,20%]	(-)	3	2	2	2	(-)	(-)
[20%,40%]	(-)	4	3	3	3	1	3
[40%,100%]	(-)	(-)	4	4	4	2	(-)

VI-1-3.Le paramètre lithologique

Selon la carte géologique et les sondages réalisés sur le terrain, une notice explicative classe les faciès du versant de Tigzirt suivant les caractéristiques géologiques et géotechniques. En tenant compte du degré et du type d'instabilité, de la nature et de l'épaisseur de la couverture d'altération et de la structure des couches de sol ; nous avons représenté la carte des faciès lithologiques en une carte de simulation du risque liée à la lithologie, basée sur les indices du risque attribués aux faciès suivants (tableau 7) :

Tableau 6 : Valeurs des indices attribuées aux différents faciès géologiques.

Nature des couches	Les molasses	Les marnes bleues saines et altérées, le complexe bréchique gypsifère, les marnes schisteuses altérées, les grès très fracturés à pendage conforme à la pente, les grès à couverture d'altération issue d'un mouvement de masse	Les marnes schisteuses, les grès à pendage conforme à la pente	Les grès subaffleurants, les schistes gréseux	les terrasses anciennes
Valeur attribuée à l'indice	$I_l = 5$	$I_l = 4$	$I_l = 3$	$I_l = 2$	$I_l = 1$

Tableau 7 : Classement des faciès géologiques en fonction du facteur de risque.

Classes	Description du facteur de risque	Risque
Classe 1: $I_l = 1$	(les terrasses anciennes)	Petit à négligeable
Classe 2: $I_l = 2$	(Les grès sub-affleurants, les schistes gréseux)	Moyen

Classe 3: I_l =3	(Les marnes schisteuses, les grès à pendage conforme à la pente)	Elevé
Classe 4: I_l =4	(Les marnes bleues saines et altérées, le complexe bréchique gypsifère, les marnes schisteuses altérées, les grès très fracturés à pendage conforme à la pente, les grès à couverture d'altération issue d'un mouvement de masse)	Elevé à trèsélevé
Classe 5: I_l =5	(Les molasses)	Trèsélevé

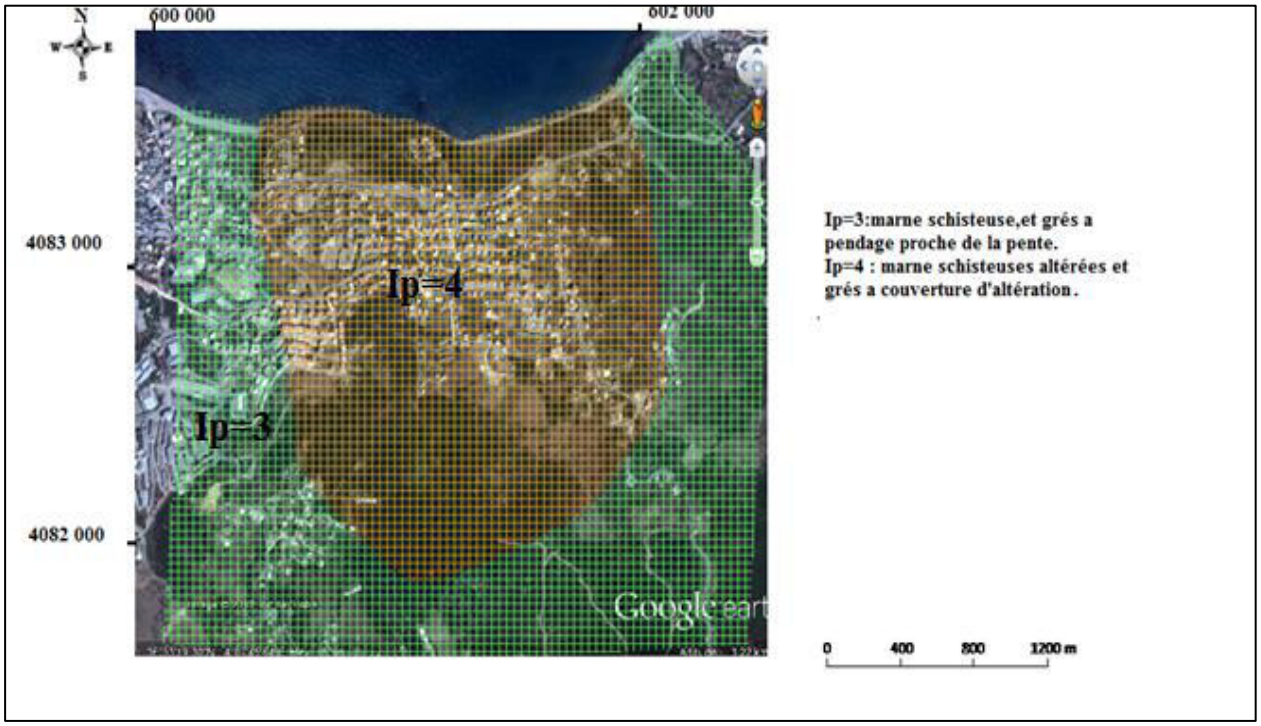


Figure 17 : Carte de simulation des risques liés à la lithologie.

VI-1-5.Carte d'interprétation du risque

Elle résulte de la superposition des cartes de simulation du risque lié à la pente, à la lithologie et à la géomorphologie. La carte de l'interprétation du risque présente dans chaque secteur figuré une combinaison à trois indices définis dans un ordre bien déterminé (I_p, I_g, I_l).

L'évaluation du risque global par la méthode arithmétique (Fares et al.,(1994)) consiste donc à faire la somme des trois indices des triplets figurant dans la carte de l'interprétation du risque définie par l'équation 1 :

$$I_{risk} = Ip + Ig + I_l \ldots\ldots..(1)$$

La carte de la sommation du risque présente douze zones où la somme indiciaire donne un maximum de 14 (4 + 5 + 5) et un minimum de 3 (1 + 1 + 1).

L'évaluation des risques nécessite la cartographie des trois paramètres du mouvement (avec la désignation des différents poids attribués aux paramètres. La présentation des douze zones des sommes indiciaires sont portées dans **le tableau 8**.

Tableau 8 : Présentation des douze zones des sommes indiciaires

Indice de pente : Ip	Indice de la lithologie : Il	Indice de la morphologie : Im	Le risque= Ip+Il+Im
1	1	1	3
1	1	2	4
1	1	3	5
1	1	4	6
1	1	5	7
1	2	1	4
1	3	1	5
1	4	1	6
2	1	1	4
3	1	1	5
4	1	1	6
5	1	1	7

VI-1-6.Carte des classes du risque (Figure 18)

Les douze zones de la carte de la sommation du risque laissent apparaître une imprécision dans l'appréciation du risque global. Selon la méthode de Fares et Al., 1994, une réduction à quatre classes exprimant des niveaux croissants dans la carte des classes de risque, définies selon les fourchettes suivantes: classe 1 : risque faible ou négligeable (3, 4, 5); classe 2 : risque moyen (6, 7, 8); classe 3 : risque élevé (9, 10, 11) et classe 4 : risque très élevé (12,13,14), **(Tableau 9).**

Tableau 9 : Les classes de dangers générées par les glissements de terrain dans la ville de Tigzirt selon la méthode de Fares et All, (1994).

Classes	Niveau de Risqué	Risque
Classe1	(3 à 5)	Faible
Classe2	(6 à 8)	Moyen
Classe3	(9 à 11)	Elevé
Classe4	(12 à 14)	Trésélevé

Pour le site de Tigzirt, on a défini **trois** classes : classe 1 [risque très élevés (12, 13, 14)] en rouge, classe 2 [risque élevé (9, 10, 11)] en orange, et classe 3 [risque moyen (6, 7, 8)] en jaune. Les classes de dangers générées par les glissements de terrain dans la ville de Tigzirt sont évaluées à l'aide du **Tableau 9.** Cependant, le niveau de risque très faible n'a pas été observé, car le creux des couches favorise l'initiation d'instabilités voir le **Tableau 10**.

Tableau 10 : Classes de dangers générées par les glissements de terrain dans la ville de Tigzirt vu sur le terrain.

Classes	Niveau du risque	Risque
Classe3	(6 à 8)	Moyen
Classe2	(9 à 11)	Elevé
Classe1	(12 à 14)	Trésélevé

La carte établie (Fig. 18) montre que la zone centrale qui est le centre-ville et la zone portuaire est très sensible au risque de glissements de terrain. Un risque très élevé affecte une zone d'environ 70 ha et un risque élevé affecte environ 90 ha.

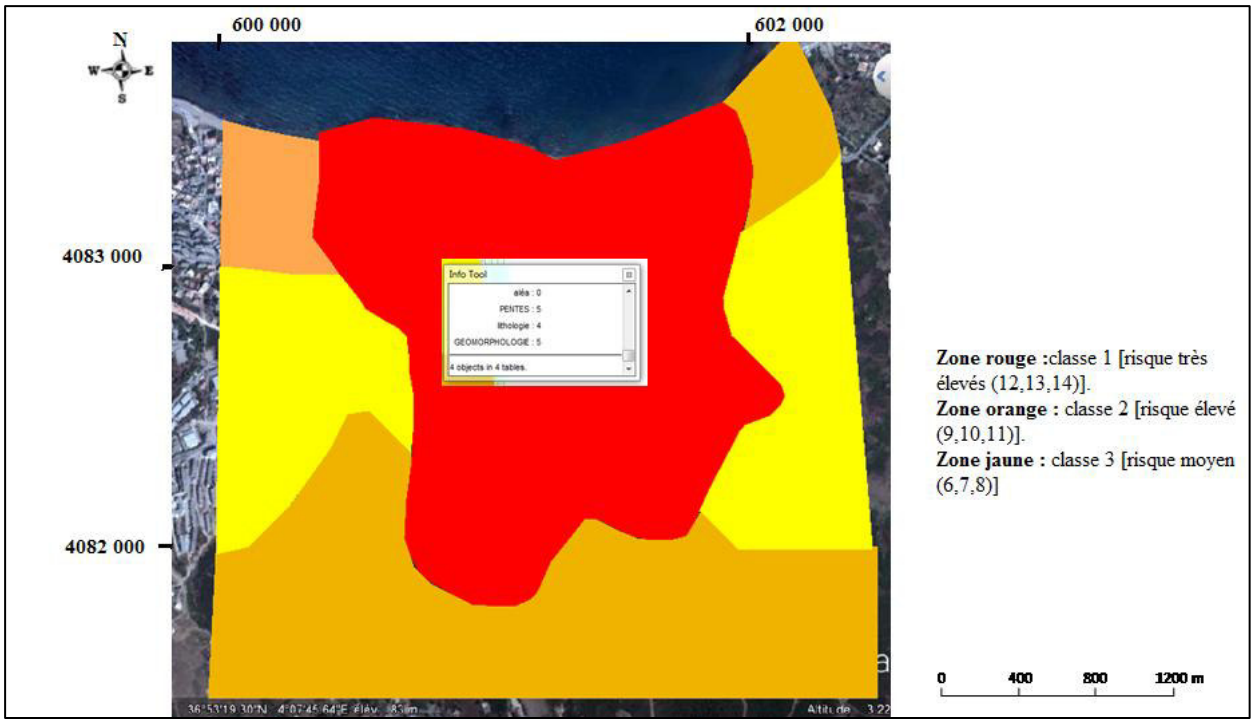


Figure 18 : Carte de la combinaison des facteurs du modèle d'évaluation du risque sous Map-Info selon la méthode de (Fares et al., 1994).

VII-CONCLUSION

Tigzirt ville est caractérisée par un glissement de terrain de grande ampleur, il affecte le centre ville et la zone portuaire. L'activité importante des instabilités dans cette ville est principalement due à l'action de l'eau et de l'homme. La méthode utilisée dans cette étude permet d'évaluer la probabilité d'occurrence du phénomène (Risque) en utilisant trois paramètres (pente, géomorphologie et la géologie du site). Nous nous sommes limités à trois classes de risque. L'analyse des risques induits par ce glissement de terrain a permis de classer une grande zone de cette ville en zone de danger.

CHAPITRE IV

REVUE DES METHODES DE CALCUL DE STABILITE SOUS SOLLICITATIONS STATIQUES ET DYNAMIQUES

I-INTRODUCTION

La prédiction des mouvements de terrains pendant un séisme est un challenge très important dans le domaine de la géotechnique. Beaucoup de facteurs prédisposant, déclenchant ou révélateurs tels que les caractéristiques géotechniques, les conditions de site, et le séisme influencent le comportement des pentes (naturelles ou artificielles). Le séisme est un facteur déclic qui affecte fortement la stabilité des pentes.

Le présent travail montre les différentes méthodes utilisées dans l'étude de la stabilité d'une pente sous son propre poids ou sous un séisme ; qui a comme objectif de mieux appréhender le comportement des pentes pendant toute la durée du chargement sismique (en utilisant l'enregistrement d'accélération) et en prenant en compte dans l'étude la stabilité du milieu et la sécurité de la pente vis-à-vis des déformations et vis-à-vis du facteur de sécurité.

On présente les évolutions des analyses de la stabilité qui offrent des équipements intéressants dans le calcul des pentes sous séisme, tout en présentant les diverses méthodes disponibles dans la littérature, essentiellement les méthodes basées sur l'équilibre limite et celles basées sur le critère des contraintes-déformations.

Les progrès récents réalisés dans les domaines de l'informatique et du calcul numérique (méthode des différences finies, méthode des éléments finis) conduisent à une meilleure maîtrise du problème de stabilité sismique des pentes.

Toute méthode d'analyse de stabilité des pentes sous sollicitations sismiques doit permettre de prendre en compte sous une forme ou une autre le chargement volumique dû au séisme. Il existe actuellement deux approches différentes : la première dérivant des méthodes de calcul d'équilibre limite, du calcul à la rupture ou de l'analyse limite, la seconde basée sur une analyse dynamique directe par la méthode des éléments finis (ou la méthode de différence finies).

Ces deux approches nécessitent l'utilisation de l'ordinateur, notamment dans le cas des configurations complexes ou de projets détaillés. Tandis que, dans le cas de configurations simples, ou d'avant projets sommaires, on peut se contenter de calculs manuels à l'aide d'abaques.

Mais avant tout étude il faut une base de données tirée du terrain comportant des études géotechniques, géologiques et géo-mécaniques des couches constituant le sol.

II-LE CALCUL DE LA STABILITE D'UNE PENTE

Parmi les méthodes les plus couramment utilisées nous pouvons citer ici, sans tenter d'en faire une description exhaustive, certaines méthodes d'équilibre limite :

-Méthode ordinaire (ou conventionnelle (Fellenius, 1927)): méthode des tranches basée sur une rupture circulaire. Cette méthode ne satisfait que l'équilibre des moments. Par ailleurs les forces inter-tranches sont supposées égales ou opposées.

- Méthode de Bishop (Bishop, 1955) : méthode des tranches basée comme la précédente sur une rupture circulaire. Dans sa version simplifiée, elle ne satisfait que l'équilibre des moments, la composante verticale des forces inter-tranche est négligée.

-Méthode de (Morgenstern et Price, 1965) : qui est typiquement une méthode de post analyse. Elle permet à un expert d'expliquer pourquoi une rupture du talus s'est produite. Elle est basée sur l'hypothèse que la direction des forces inter-tranches peut être décrite par une fonction mathématique arbitraire.

-Méthode de (Spencer, 1967) : méthode des tranches basée à l'origine sur une rupture circulaire puis étendue au cas de rupture non circulaire. Cette méthode satisfait l'équilibre des moments ainsi que l'équilibre des forces.

- Méthode complète de (Janbu, 1968) : qui suppose que le point d'application de chaque force inter-tranche peut être défini par sa position sur une ligne de poussée.

Toutes ces méthodes sont présentées de façon plus détaillées dans les travaux de (Duncan, 1996) et présentées dans un cadre général par (Espinoza et al., 1992).

-Méthode des perturbations « 1972 » (in Faure, 1985) : méthode globale permettant un calcul en rupture non circulaire et satisfaisant les 3 équations de la statique. Cette méthode permet par ailleurs de définir la distribution de la contrainte normale le long de la ligne de rupture.

-Méthode des éléments finis avec le code de calcul Plaxis [calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction)] : un calcul du coefficient de sécurité dans PLAXIS peut être effectué en réduisant les paramètres de résistance du sol. Ce processus est appelé Phi-c reduction et constitue un type de calcul à part entière. Le calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction) doit être sélectionné lorsque l'utilisateur souhaite calculer un coefficient de sécurité global pour une situation donnée. Une analyse de sécurité peut être réalisée après chaque phase de

calcul individuelle et donc pour chaque étape de construction. Cependant, notons qu'une phase Phi-c reduction ne peut être utilisée comme condition de départ pour une autre phase de calcul, car elle se termine sur une situation de rupture. Il est donc conseillé de définir toutes les analyses de sécurité à la fin de la liste des phases de calcul et d'utiliser le paramètre Start fromqui est une phase de référence de chaque phase d'analyse du coefficient de sécurité.

Lors d'un calcul de coefficient de sécurité, aucune charge ne peut être augmentée. En fait, le calcul Phi-c reduction est un type particulier de calcul plastique. La saisie d'un incrément de temps n'a en général pas de signification dans ce cas.

- Lorsque le type Phi-c reduction est sélectionné dans des projets incluant des modèles de sol avancés, ces modèles vont en fait se comporter comme le modèle standard de Mohr-Coulomb, puisque le comportement en raideur dépendant des contraintes et les effets de l'écrouissage sont exclus de ce type d'analyse. La raideur est calculée au début de la phase de calcul et reste constante jusqu'à ce que celle-ci soit terminée.

III-LES METHODES DE CALCUL DE STABILITE SOUS SOLLICITATION SISMIQUE

III-1. Méthodes reposant sur des observations

Les méthodes basées sur les observations ne nous permettent pas de nous donner la stabilité d'une pente donnée. Ce sont des méthodes qui sont basées sur les travaux de (Keefer, 1984 ; Rodriguez et al. 1999 ; Hancox et al. 2002). Elles comptent sur une récolte de **bases de données** pour permettre une vision globale du phénomène: c'est une superposition de plusieurs facteurs :

- Les facteurs de prédisposition et des facteurs déclenchant d'une instabilité. Une analyse détaillée de leur importance relative sur la stabilité d'un versant sont à la base de la cartographie des zones de plus forte susceptibilité au phénomène de mouvement de versant sous sollicitations dynamiques. Cette cartographie est aujourd'hui essentiellement menée par l'intermédiaire des (SIG) qui permet la superposition, sur un même document, d'une multitude d'informations cartographiques : la topographie et la géologie du versant, les propriétés mécaniques des matériaux, les données hydrogéologiques, la sismicité, la distribution des mouvements de versant existants

- La définition de corrélation entre les caractéristiques des mouvements de versant et celles des séismes.

Chacun de ces facteurs avec leur importance relative à la stabilité du versant etsa répartition spatiale qui sera couplée à une modélisation numérique, permet de définir des cartes d'aléa de mouvement de versant sous sollicitation dynamique déterministe ou probabiliste. Sa fiabilité repose sur la définition du ou des critères d'instabilité ainsi que sur la quantité des données cartographiques disponibles.

III-2. Méthodes reposant sur la modélisation

Les méthodes de modélisation qui permettent d'évaluer la stabilité des versants sous sollicitations dynamiques les plus connues sont recensées comme suit :

1. La méthode pseudo - statique connue sous le nom de méthode de Terzaghi (1960).
2. La méthode en déplacement connue sous le nom de la méthode de Newmak (1965).
3. Méthode de Sarma (1973).
4. Méthode de MINEIRO (1975, 1979).
5. Méthode de calcul en déformation par éléments finis ou par différences finis.

III-2-1. Approche de calcul pseudo-statique

La méthode pseudo-statique consiste à modéliser la sollicitation sismique par une accélération équivalente qui tient compte de la réaction probable du massif en pente. C'est une approche plus simple d'évaluation de la stabilité d'une pente sous les vibrations d'un tremblement de terre. Dans son exécution, la méthode d'équilibre limite est modifiée pour inclure les forces sismiques statiques horizontales et verticales (Fig1), qui sont employées pour simuler les forces à inertie potentielle dues à l'accélération au sol lors d'un tremblement de terre (Sarma, 1979; Kramer, 1996). Les magnitudes des forces pseudo-statiques sont :

$$F_h = a_h W/g = k_h W$$

$$F_v = a_v W/g = k_v W$$

Où :

a_h et a_v sont respectivement les accélérations pseudo-statiques horizontale et verticale ;

k_h, et k_v sont respectivement les coefficients sismiques horizontal et vertical (sans dimensions) qui sont pris dans le RPA 2003.

W est le poids de la masse de rupture.

Typiquement, la force sismique est prévue pour agir dans la direction horizontale seulement (k_v=0), induisant dans la pente une force d'inertie k_hW. Le coefficient de sécurité Fs est alors calculé en suivant les méthodes conventionnelles. La plus grande difficulté avec cette procédure est le choix d'un coefficient sismique approprié donnant une valeur du coefficient de sécurité Fs acceptable. La magnitude du coefficient sismique (k_h) devrait effectivement simuler la nature des forces prévues de tremblement de terre, lesquels dépendront de : l'intensité du tremblement de terre, la durée du tremblement, le contenu fréquentiel. Naturellement, dans un jugement très conservateur, il est possible de choisir un coefficient sismique qui est égal à l'accélération maximale au sol prévue à la pente. Cependant, ce conservatisme introduira ensuite une évaluation très peu économique.

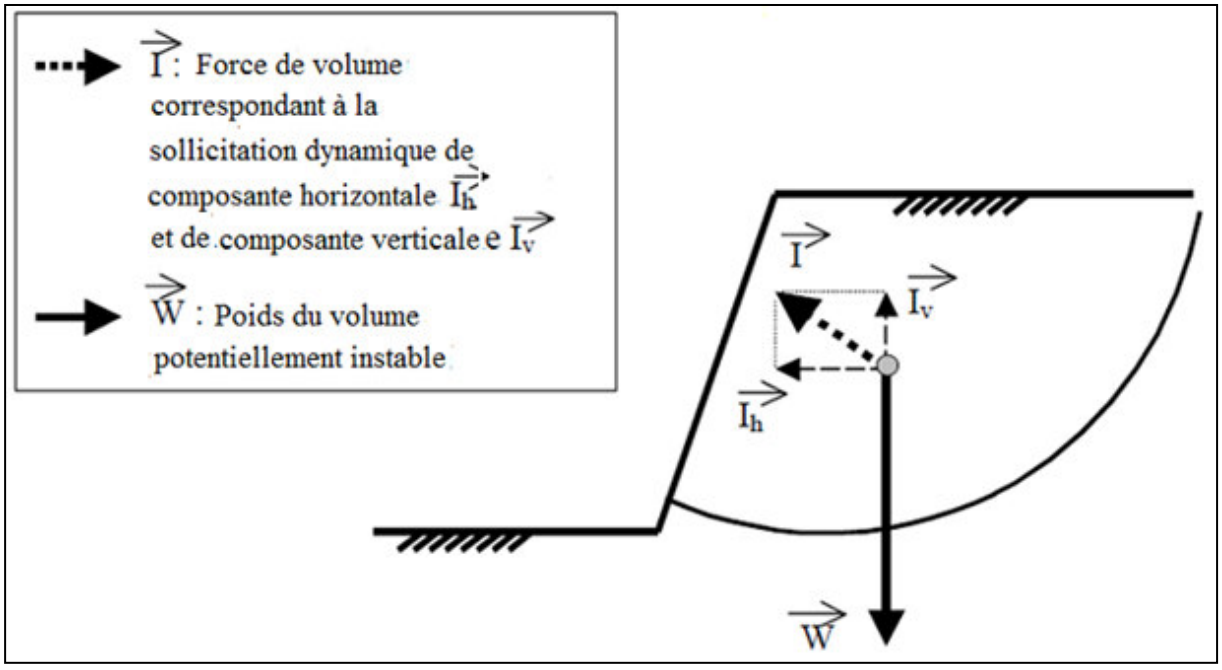


Figure1 : méthode pseudo statique(Terzaghi1960).

Mais cette méthode ne tient pas compte de plusieurs paramètres tel que : la liquéfaction, l'effet du séisme sur la résistance au cisaillement et qu'elle masque l'aspect dynamique du problème (Seed, 1979, Kramer et all, 1997, Faure et al. 1996), ainsi que les contraintes inter tranches. De plus cette méthode ne représente pas la réalité.

III-2-2. Méthode en déplacement de Newmark (1965)

La méthode de Newmark est basée sur le calcul de déplacement maximum. Les déplacements sont supposés se produire parallèlement à la pente selon une cinématique de glissement plan. Le comportement du sol est supposé rigide-plastique ainsi que la résistance au cisaillement du sol est la même sous l'action d'une force statique ou dynamique. Ceci en appliquant une force minime statique pour vaincre les forces stabilisatrices.

Au cours des cycles, il y a alternativement glissement relatif du sol en surface vers l'aval et entraînement de cette partie dans le mouvement général d'oscillation. Après calcul il en résulte par itération une reptation (bombement) d'une couche superficielle du sol vers le bas de la pente. De manière simplifiée, telle que cela a été présenté par Newmark, on peut considérer un accélérogramme en créneaux de temps élémentaires t_0. Pour une accélération horizontale orientée vers l'amont, il y a glissement lorsque l'accélération A.g est supérieure à une valeur limite A'.g, fonction de l'angle ζ de la pente et de l'angle de frottement interne (υ).

$$A' = \frac{cos\theta.tg\varphi + sin\,\theta}{sin\theta.tg\varphi - cos\theta}$$

Le déplacement relatif δ, à chaque cycle, est obtenu par une double intégration :

$$\delta = \frac{V^2}{2gA}\left(1 - \frac{A'}{A}\right)$$

III-2-3. Méthode de SEEDET MAKDISI

C'est une amélioration de la méthode de Newmark, sauf que le sol aura un comportement viscoélastique. Elle se base sur la détermination d'une accélération de rupture horizontale (k_y.g) tout en imposant un coefficient de sécurité égale à 1.En utilisant une analyse de réponse dynamique par la méthode des éléments finis avec une loi de comportement de type viscoélastique linéaire équivalente (Mouroux et al., (1988).

Une fois l'accélération moyenne induite excède l'accélération de rupture $\mathbf{A_m(t) > K_{rupture}}$, on admet que les mouvements se produisent le long de la surface de rupture.

On calculera alors les déplacements par double intégration.

III-2-4. Méthode de Sarma (1973)

Sultan et Seed (1967) puis Sarma (1973 ; 1979) ont proposé des méthodes basées sur des tranches inclinées. La méthode de Sarma a été modifiée par Hoek (1987) pour déterminer la stabilité de différentes formes de pentes. Yamagami et al. (1999) ont développé une version de cette méthode qui considère des facteurs de sécurité localement variables.

La méthode de Sarma est basée sur l'équilibre des forces et des moments sur les tranches individuelles ; ces tranches sont créées au-dessus de la surface de glissement par des plans inclinés. La résolution se fera avec la relation entre les forces inter-tranches qui seront ajustées jusqu'à ce que le coefficient de sécurité pour l'équilibre des forces et des moments soit satisfait est sera assumée comme un processus linéaire de Mohr-Coulomb.

Dans cette méthode originelle, Sarma calcule l'accélération horizontale qui met la pente en rupture, pour cela, il introduit une fonction entre les contraintes normale et tangentielle inter tranches qui dépendent de la poussée latérale des terres, et résout toutes les équations d'équilibre.

En 1965, Newmark propose une méthode d'intégration permettant d'évaluer le déplacement final lors d'un séisme d'une masse de sol en rupture plane. Pour cela, il calcule l'accélération critique, au-delà de laquelle le bloc se met en mouvement, intègre son déplacement pendant la durée où l'accélération reste supérieure à l'accélération critique et itère sur chacun des cycles du séisme. En 1973, Sarma introduit dans sa méthode des blocs qui fournissent l'accélération critique, une accélération sismique rectangulaire, triangulaire ou sinusoïdale. La confrontation avec des données naturelles montre que suivant l'intensité du séisme, il faut prendre des pulsations rectangulaires pour les faibles séismes, sinusoïdale puis triangulaire pour les séismes induisant une accélération voisine de l'accélération critique. En 1978, Makdisi et Seed étendent le calcul de Sarma aux ruptures circulaires et tiennent compte de la distribution de l'accélération définie par Seed. En 1982, Chug reformule une méthode de stabilité en rupture quelconque et prenant en compte les efforts sismiques dans les équations de stabilité et intègre le déplacement.

Ces méthodes sont cependant trop contraignantes par des hypothèses simplificatrices et ne tiennent pas compte de l'évolution du comportement des matériaux. Elles ont bien été utilisées mais cèdent le pas devant les méthodes aux éléments finis (Bouaicha (2003)).

III-2-5. Approche de calcul dynamique direct

Elle se base sur la résolution de l'équation d'équilibre dynamique :

$$M\ddot{U}+C\dot{U}+KU=F(1)$$

Avec l'aide soit de **la méthode des éléments finis** ou de **la méthode des différences finies** qui prennent en compte tant les chemins de contraintes aux différents points du massif que les lois de comportement élastiques ou élastoplastiques, nous pouvons calculer les états des déformations correspondantes. Ces deux méthodes utilisent de nombreux paramètres, dont la détermination est souvent délicate : état initial des contraintes, paramètres mécaniques, critères de rupture, etc.

En ce qui concerne l'analyse de stabilité, les méthodes numériques sont nécessaires à cette analyse. La méthode des éléments finis a été utilisée la première fois pour l'analyse de stabilité en 1966. Ces méthodes apportent aux géotechniciens et aux experts des informations sur le développement de la rupture. Elles peuvent être utilisées dans le calcul de stabilité selon deux façons :

- La première, dite méthode directe : pour estimer la valeur du coefficient de sécurité, une série de calculs sera nécessaire. Le critère de rupture est défini par l'utilisateur. Elle donne des informations sur le développement du processus de rupture (Tel que **Plaxis**).
- La deuxième utilise une méthode numérique en association avec le calcul en équilibre limite. Le point important de cette méthode est que le calcul est effectué dans des conditions normales, c'est-à-dire sans réduction des propriétés des matériaux. Naylor (1982) a appelé cette méthode Equilibre limite améliorée. Depuis la publication des premières idées, le couplage entre les méthodes numériques et les méthodes d'équilibre limite ne cesse d'évoluer.

Elles permettent de combinent entres les grandeurs géométriques (déplacements et déformations) et les grandeurs mécaniques (contraintes et forces).

Les différents outils de calcul qui existent actuellement, et qui permettent de réaliser ces modèles, présentent des degrés de sophistication différents qui pèsent évidemment sur la performance des modèles réalisés.

Ces derniers diffèrent par ailleurs entre eux par les principes de discrétisation des grandeurs calculées, les algorithmes et les techniques de résolution, comme c'est le cas notamment entre les outils qui s'appuient sur la méthode des éléments finis, celle des éléments distincts, ou celle des différences finies.

Dans ce qui suit, le logiciel Plaxis utilisé dans la modélisation sera présenté.

IV. PRESENTATION DU CODE DE CALCUL PLAXIS

Le développement du logiciel PLAXIS a commencé en 1987 à l'université technique de Delft à l'initiative du département allemand des travaux publics et gestion des eaux. L'objectif initial était réservé à développer un code d'éléments finis en 2D facile à manier permettant l'analyse des talus en sols mous implantés aux bords des rivières situées dans les plaines Hollandaises. Quelques années plus tard, PLAXIS a été étendu pour couvrir d'autres domaines de la géotechnique. Avec l'extension des différentes activités géotechniques, une compagnie nommée PLAXIS b. v. a vu le jour en 1993. En 1998, la première version PLAXIS pour Windows a été lancée. En même temps le module kernel pour le calcul en 3D a commencé de connaître son développement. Plusieurs années de développement, il y a eu le lancement en 2001 du programme tunnel PLAXIS 3D. Le but principal de PLAXIS est de pourvoir un outil adéquat pour une analyse pratique dans le domaine de la géotechnique pour des utilisateurs qui ne soient nécessairement des spécialistes en calcul numérique. Souvent, les ingénieurs considèrent les calculs non-linéaires par éléments finis sont laborieux et consomment beaucoup de temps. Le groupe de recherche et de développement de PLAXIS ont, à cet effet, recherché à mettre à la disposition des utilisateurs un logiciel facile à utiliser, basé sur des procédures théoriques robustes.

Dans sa version originale, le code de calcul par éléments finis PLAXIS traite la stabilité des digues en terre. Dans sa version actuelle, il permet de traiter différents types de problèmes géotechniques (fondations, tunnels, ouvrages de soutènement, etc.).

PLAXIS offre une large gamme de modèles décrivant le comportement des matériaux **(11 en tout)** et permet également à l'utilisateur de créer et de définir son propre modèle. Parmi ceux-ci, des modèles linéaires et non-linéaires ainsi que dépendant du temps sont proposés. Il est donc possible de procéder à l'analyse statique et dynamique. Les modèles prennent également en compte l'écoulement de l'eau à travers les sols modélisés ainsi que la génération de

pressions inertielles offrant la possibilité d'effectuer des calculs en contraintes totales ou effectives, mais aussi de donner au sol des caractéristiques telles que drainé, non-drainé et non poreux.

IV-1. Modélisation aux éléments finis du glissement de terrain de Tigzirt

Choix de la méthode de Mohr Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle élastique parfaitement plastique (sans écrouissage). Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \quad (1)$$

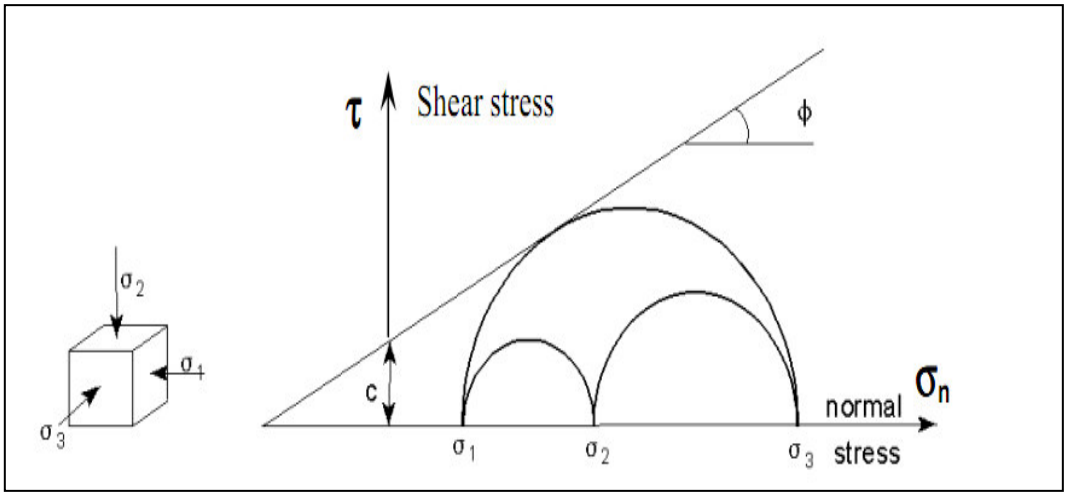


Figure2 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr Coulomb.

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normale et de cisaillement, c et φ sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau (Fig. 2).

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité), les trois autres sont c, φ et ψ, respectivement la cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique ; certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des calculs de déformation ou de stabilité.

La modélisation numérique constitue une aide intéressante pour l'analyse des problèmes mécaniques. La résolution numérique des phénomènes de la mécanique consiste à approximer la solution continue grâce à un découpage spatial et temporel des équations d'équilibre. Plusieurs méthodes de discrétisation peuvent être utilisées (éléments finis, différences finies,

etc.). La méthode des éléments finis est très répandue dans le domaine de la mécanique des sols et a été choisie pour la modélisation numérique du glissement de terrain de Tigzirt avec l'utilisation du code de calculs PLAXIS 2D version 2011. Ce code offre la possibilité de gérer de grandes déformations planes avec la réactualisation du maillage après chaque itération du calcul et de calculer pour un talus ou une pente un coefficient de sécurité global par la méthode « c/φ reduction ». Cette méthode s'inspire des méthodes d'analyse de stabilité classiques à l'équilibre limite (Fellenius, Bishop, *etc.*), toutefois sans imposer au préalable une surface de rupture. La stabilité de la pente est évaluée par réduction progressive des caractéristiques de résistance au cisaillement des matériaux. La valeur critique obtenue après la rupture correspond au coefficient de sécurité de cette dernière. Les résultats obtenus par cette méthode sont très proches de ceux obtenus en utilisant les méthodes à l'équilibre limite.

IV-1-1. Principe de la méthode numérique évolutive

L'étude de la stabilité des pentes est basée sur la réduction des caractéristiques mécaniques qui est une option disponible dans PLAXIS (1999), appelée 'Phi-c reduction' et qui permet de calculer des coefficients de sécurité. Dans l'approche 'Phi-c reduction', les caractéristiques angle de frottement 'tanϕ' et cohésion 'c' du sol sont réduites progressivement jusqu'à l'obtention de la rupture. Le coefficient total 'ΣMsf' permet de définir la valeur des caractéristiques du sol à une étape donnée de l'analyse :

$$\Sigma Msf = \frac{c_{don}}{c_{reduit}} = \frac{\tan\phi_{don}}{\tan\phi_{reduit}} \qquad (2)$$

Où les caractéristiques notées '$_{don}$' se réfèrent aux propriétés entrées dans les propriétés des matériaux et les caractéristiques notées '$_{reduit}$' se reportent aux valeurs réduites utilisées au cours de l'analyse. ΣMsf vaut 1.0 au début d'un calcul pour utiliser des valeurs non réduites des caractéristiques des matériaux. Les caractéristiques sont réduites progressivement jusqu'à l'apparition de la rupture, caractérisée par un coefficient Fs. Ce coefficient de sécurité Fs, dans les problèmes de géotechnique, est basé sur le concept de la mobilisation des contraintes dans le sol :

$$\tau = c^m + \sigma \tan \varphi^m \qquad (3)$$

Avec : $c^m = \frac{c}{Fs}$ et $\tan\varphi^m = \frac{\tan\varphi}{Fs}$

Où c^m et φ^m sont respectivement la cohésion mobilisée et l'angle de frottement interne mobilisé du critère de Mohr-Coulomb. Fs, peut donc caractériser l'équilibre entre les efforts

moteurs et les efforts résistants.

Dans cette méthode, le facteur de sécurité Fs représente la valeur de ΣMsf à la rupture. Cette approche ressemble à la méthode de calcul de coefficients de sécurité adoptée conventionnellement dans les analyses de rupture circulaire. Ce mode de recherche a été étudié par Jiang et Magnan [1997] et donne de bonnes corrélations avec d'autres méthodes plus classiques comme le calcul par tranches de Bishop. (Cuvillier, et al., (2004).

Le programme d'entrée des données (INPUT).Ce programme contient tout ce qui est nécessaire pour créer et modifier un modèle géométrique, pour générer le maillage d'éléments finis correspondant et pour générer les conditions initiales. La génération des conditions initiales est faite dans un menu spécifique du programme Input (mode conditions initiales). La description se concentre tout d'abord sur la création d'un modèle géométrique et d'un maillage d'éléments finis (mode de création géométrique).

L'état de contraintes initiales et la configuration initiale doivent êtrespécifiés. Cela se fait dans la partie traitant des conditions initiales du programme d'entrée des données. Les conditions initiales sont constituées de deux modes différents, l'un pour générer les pressions interstitielles initiales (mode des conditions hydrauliques) et l'autre pour spécifier la configuration géométrique initiale et générer le champ des contraintes effectives initiales (mode de configuration géométrique).

Pour tenir compte des nappes phréatques : les pressions interstitielles et les pressions hydrauliques extérieures peuvent etre générées à partir de nappes phréatiques. La saisie d'une nappe phréatique est semblable à la création d'une ligne géométrique.Les nappes phréatiques sont définies par deux points ou plus. Ces points peuvent etre saisis de la gauche vers la droite (sens des x croissant) ou vice versa (sens des x décroissants).Les points et les lignes sont superposés au modèle géométrique,mais n'interagissent pas avec le modèle géométriqueexistant. Cette génération de ces pressions est réalisée en séléctionnant l'option Generate water pressures.

Sans oublier de bloquer les déplacements imposés nuls comme condition aux limites. Dans le modèle géométrique,une distinction peut être faite entre les blocages horizontaux,(Horizontal fixity) (Ux=0) et les blocages verticaux (vertical fixity) (Uy=0).On peut également choisir un blocage total(Total fixity) qui est la combinaison des deux précédents (Ux=Uy=0).

Le modèle du versant de Tigzirt est représenté ci-dessous :

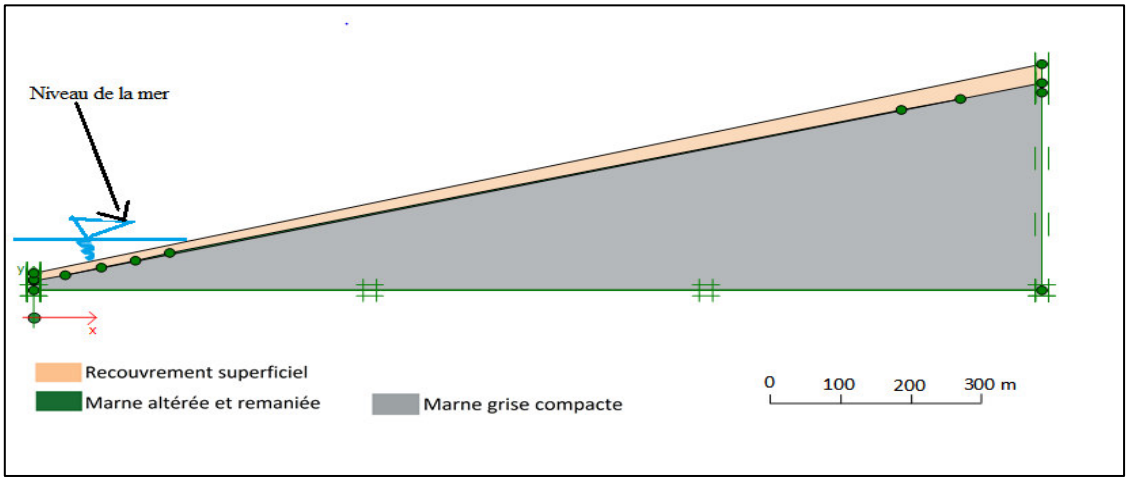


Figure 3: Profil du glissement de terrain de Tigzirt.

Les chargements et les déplacements imposés peuvent être appliqués aux limites du modèle et à l'intérieur de celui-ci. Après la définition d'un modèle aux éléments finis, les calculs proprement dits peuvent être effectués. Il est toutefois nécessaire de définir au préalable le type de calcul à réaliser ainsi que les cas de chargement ou les étapes de construction qui seront à appliquer. On opère grâce au programme de calcul (Calculation).

Plaxis permet d'effectuer différents types de calculs aux éléments finis. Le programme de calcul ne traite que l'analyse des déformations et permet de réaliser un calcul plastique : une analyse de consolidation (Consolidation analysis), un calcul du coefficient de sécurité (Phi-C reduction) ou un calcul dynamique (Dynamic calculation).

Dans la pratique, un projet peut se décomposer en plusieurs phases. Le processus de calcul Plaxis est aussi divisé en étapes. L'activation d'un cas de charge prédéfini, la simulation d'étapes de construction (phase K_0, phase plastique…), le calcul d'un coefficient de sécurité sont des exemples de phase de calcul. Chaque phase de calcul est couramment divisée en plusieurs pas de calcul. Cela est dû au fait que le comportement non linéaire du sol nécessite l'application des charges par paliers (incréments de charge). Cependant, dans la plupart des cas, il suffit de préciser l'état à obtenir à la fin de la phase de calcul. Dans Plaxis, des procédures automatiques et robustes d'incrémentation des pas de chargement assurent un choix approprié des pas de calcul.

Lorsqu'une nouvelle phase de calcul est introduite, celle-ci doit être définie. Quand tous les paramètres ont été définis, l'utilisateur peut choisir de définir une autre phase de calcul ou de

lancer le processus de calcul. Par exemple introduire la phase de calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction).

Un calcul de coefficient de sécurité dans PLAXIS peut être effectué en réduisant les paramètres de résistance du sol. Ce processus est appelé Phi-c reduction et constitue un type de calcul à part entière. Le calcul de coefficient de sécurité (Phi-c reduction) doit être sélectionné lorsque l'utilisateur souhaite calculer un coefficient de sécurité global pour une situation donnée. Une analyse de sécurité peut être réalisée après chaque phase de calcul individuelle et donc pour chaque étape de construction. Cependant, notons qu'une phase Phi-c reduction ne peut être utilisée comme condition de départ pour une autre phase de calcul car elle se termine sur une situation de rupture. Lors d'un calcul de coefficient de sécurité, aucune charge ne peut être augmentée. En fait, le calcul Phi-c reduction est un type particulier de calcul plastique. La saisie d'un incrément de temps n'a en général pas de signification dans ce cas.

Lorsque le type « Phi-c reduction » est sélectionné dans des projets incluant des modèles de sol avancés, ces modèles vont en fait se comporter comme le modèle standard de Mohr-Coulomb, puisque que le comportement en raideur dépendant des contraintes et les effets de l'écrouissage sont exclus de ce type d'analyse. La raideur est calculée au début de la phase de calcul et reste constante jusqu'à ce que celle-ci soit terminée.

Pour effectuer un calcul dynamique il faut revenir à la barre d'outil « Input » pour définir un autre projet en gardant le même profil et les mêmes conditions initiales tout en mettant des bandes absorbantes (pour absorber l'effet des vibration de la charge dynamique) qui est décrite par Lysmeret Kuhlmeyer, 1969).

Ce type de calculs permet l'étude de la propagation de la rupture du versant et de l'évolution du coefficient de sécurité. La méthode Phi/c reduction peut se résumer en trois étapes principales :

Étape 1. Application du poids propre et de l'état de contrainte initial du modèle.
Étape 2. À partir de l'équation de Mohr-Coulomb et de la définition du coefficient de sécurité, le coefficient de sécurité Fs est évalué par réduction des paramètres de résistance, d'où, l'écriture des fonctions suivantes :

$$\frac{\tau}{F_s} = \frac{c}{F_s} + \sigma \frac{\tan\varphi}{F_s} \text{ ou } \frac{\tau}{F_s} = c_{crit} + \sigma \tan\varphi_{crit} \qquad (4)$$

Dans ce cas on obtient :

$$c_{crit} = \frac{c}{F_s} \quad \text{et} \quad \varphi_{crit} = \arctan\left(\frac{\tan\varphi}{F_s}\right) \qquad (5)$$

Étape 3. La procédure de la deuxième étape est répétée en incrémentant le facteur de réduction des caractéristiques de résistance au cisaillement (le coefficient Fs) jusqu'à non convergence du calcul, autrement dit jusqu'à la rupture du versant. La valeur critique de Fs devient le coefficient de sécurité pour le talus considéré.

Pour effectuer un calcul dynamique, en gardant le même profil et les mêmes conditions initiales, on doit activer les bandes absorbantes (pour absorber l'effet des vibrations de la charge dynamique) décrites par Lysmer et Kuhlmeyer, (1969).

La méthode de Newmark a été, ainsi, appliquée pour la résolution de l'équation dynamique :

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \qquad (6)$$

K : la matrice de rigidité ;

M : la matrice de masse ;

C : la matrice d'amortissement et C= $\alpha_R + \beta_R$

α_R et β_R : coefficients de Rayleih

F : le vecteur de charge

F= K U correspond à la déformation statique.

$\dot{U}$: Vitesse ; $\ddot{U}$: Accélération, U : déplacement.

La matrice de masse (M) est implémentée comme une matrice groupée dans laquelle la masse de matériaux (sol + eau + toute construction) est prise en compte. Dans l'analyse élastique, la matrice d'amortissement (C) est formulée en fonction des matrices de masse et de rigidité (Rayleigh Damping) (Hughes 1987). L'amortissement physique de l'analyse élastique est simulé à l'aide de l'amortissement de Rayleigh.

Dans cette étude, on utilise le système implicite d'intégration de Newmark. Avec cette méthode, le déplacement et la vitesse à l'instant (t + Δt) sont exprimés, respectivement, par les équations 7 et 8 comme suit :

$$U^{t+\Delta t} = U^t + \left(\dot{U}^{\Delta t} + \left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\ddot{U}^t + \alpha\ddot{U}^{t+\Delta t}\right)\Delta t^2 \qquad (7)$$

$$\acute{U}^{t+\Delta t} = \acute{U}^{t} + \left((1-\beta)\ddot{U}^{t} + \beta\ddot{U}^{t+\Delta t}\right)\Delta t \qquad (8)$$

Où Δt est le pas du temps. Les coefficients α et β déterminent la précision de l'intégration du temps numérique et pour obtenir une solution stable, les conditions suivantes doivent être satisfaites (9) :

$$\alpha \geq 0.25(0.5+\beta)^2 et \beta \geq 0.5 \qquad (9)$$

Pour les calculs dynamiques, les bandes absorbantes sont créées à l'aide de bandes visqueuses ou (amortisseurs). L'excès de pression de l'eau dans les pores pendant le chargement dynamique peut être généré en considérant que le sol se comporte comme un matériau qui ne se détruit pas.

Pour estimer le facteur de sécurité, le code utilise la technique 'Phi-c reduction' où la résistance au cisaillement du sol est réduite progressivement pour amener la masse du sol à la rupture. Le concept est utilisé dans l'analyse de stabilité de pente dans laquelle un certain nombre de simulations sont exécutées pour le facteur de sécurité (Fs) avec des paramètres réduits de résistance au cisaillement : la cohésion (C) et l'angle de friction interne (φ).

V. CONCLUSION

Ce chapitre présente les méthodes d'analyse numérique linéaires et non-linéaires. Les considérations sur lesquelles elles sont construites et leurs conditions d'utilisation sont présentées. On s'est surtout attardé sur les méthodes des éléments finis et l'utilisation du logiciel Plaxis et tout particulièrement sur la méthode numérique évolutive appelée 'Phi-c reduction' qui permet de calculer des coefficients de sécurité en considérant la réduction progressive des deux caractéristiques (angle de frottement 'ϕ' et cohésion 'c') du sol jusqu'à l'obtention de la rupture.

CHAPITRE V

MODELISATION NUMERIQUE DU GLISSEMENT DE TIGZIRT SOUS SEISME

I-INTRODUCTION

Les méthodes numériques ; Apparues dans les années 70, d'abord pour les matériaux métalliques et progressivement adaptées pour les géo-matériaux, permettent d'obtenir des champs de déplacements et de contraintes avec un bon niveau de précision. On est vite tenté de les utiliser systématiquement tant leur rapidité et leur simplicité d'utilisation sont grandes. Un grand nombre d'approches existent pour la modélisation des mouvements des sols : éléments finis, éléments discrets, différences finis,… La méthode des éléments finis (FEM) est largement utilisée et est prouvée pertinente pour les études de l'interaction sol-structure. Avec les récents développements au niveau du matériel et des logiciels, une analyse en éléments finis conduite proprement peut être réalisée rapidement et avec des coûts relativement faibles.

L'utilisation de la méthode des éléments finis pour la résolution des problèmes de géotechnique a débuté en 1966 ; Clough et Woodward (1966) ont utilisé les éléments finis pour déterminer les contraintes et les déplacements dans les remblais. Plusieurs recherches et applications ont pris place ces 50 dernières années. Durant cette période, des progrès considérables ont été réalisés dans la théorie et la pratique. Reyes et Deer ont décrit des applications pour l'analyse des constructions souterraines dans les roches.

Les lois de comportement complexes nécessitent la mesure d'un grand nombre de paramètres que peu de projets vont justifier ou bien les moyens techniques existants ne permettent pas l'obtention de ces données. Donc, d'une manière générale on utilise dans 90% des cas la loi élasto-plastiques de Mohr-Coulomb (5 paramètres avec la dilatance) ou de Hoek et Brown (6 paramètres avec la dilatance) (Chalhoub M. et Pouya A, (2006)).

En plus, la complexité s'accentue lors de l'introduction d'une intensité dynamique au sol (Alain Pecker,(1984)), car plusieurs comportements peuvent survenir. L'équation dynamique en éléments finis est ainsi établie à partir de méthodes d'analyses des contraintes dynamiques dans le sol discrétisant la formulation variationnelle de Galerkin. Cela aboutit au système suivant :

$$M\ddot{U}(t) + C\acute{U}(t) + KU(t) = F(t). \qquad (1)$$

Pour la résolution d'un tel système, on peut soit utiliser la méthode de superposition nodale, soit des schémas d'intégration numériques (Newmark et Wilson). L'analyse par éléments finis de la propagation des ondes dans un domaine infini pose deux problèmes majeurs :

- La structure doit être discrétisée de telle sorte que les ondes puissent se propager (maillage très fin).

- On ne peut modéliser la structure que de manière finie des frontières artificielles. Celles-ci sont introduites pour permettre de décrire l'influence des domaines extérieurs. Le maillage étant limité à un domaine fini auquel le problème de la difficulté de la réflexion des ondes sur les frontières se pose, phénomène dû à la modélisation qui aboutira à une analyse de sol en grandes déformations (Belhadj (2007)).

Cette étude portera sur le cas du glissement de Tigzirt (zone côtière) dont le risque sismique est majeur. La sismicité de l'Algérie est caractérisée par des séismes superficiels, elle est localisée dans les 20 premiers kilomètres superficiels. Cette sismicité est généralement marquée par des séismes faibles à modérés. Toutefois, des séismes forts se sont produits dans l'Atlas Tellien, nous pouvons citer le séisme majeur d'El Asnam du 10 octobre 1980 (Ms=7.3) et le séisme fort de Boumerdes-Zemmouri du 21 mai 2003 (Mw=6.8), etc. Les structures actives sont représentées généralement par des failles inverses et/ou de coulissement. Les failles qui engendrent ces séismes sont principalement orientées NE-SW (Ouyed et al., 1983 ; Meghraoui, 1988 et 1996 ; Bounif et al., 2004, Delouis et al., 2004 ; Yelles-Chaouche et al.,2004). L'existence aussi d'une faille de coulissement senestre orientée NS, qui a joué le 20 mars 2006 (Mw=5.2) dans la région des Babors (Beldjoudi et al., 2009).

La sismicité historique de l'Algérie montre que le Nord du pays a été touché par de nombreux séismes de magnitudes modérées à élevées. Les séismes de Chlef (1980), de Constantine(1985), de Oued Djer (1988), de Tipaza (1989), de Mascara (1994), de Ain Bénian-Alger (1996), de Ain-Témouchent (1999) de Béni-Ourtilane (2000) et celui de Boumerdes (2003), ont montré à quel point les conséquences de tels événements peuvent être catastrophiques sur le plan socio-économique.

D'après le zonage du Maghreb de BRGM français, la zone 32« Tell et marge Nord algérienne », correspond au domaine de failles inverses à vergence Sud du Tell situées dans la zone côtière du Nord du Maghreb. Suite aux travaux de (Deverchère et al. (2005), plusieurs failles inverses à vergence Nord ont été identifiées au large de Boumerdès en bordure du plateau continental. Celles-ci sont associées à la déformation compressive de la limite de plaque Eurasie – Afrique. Dans ce schéma, on ne peut exclure la possibilité de failles inverses à vergence Nord, tout le long de la marge continentale entre Oran et Constantine. La limite Nord de cette zone a donc été tracée au pied du talus continental. *(Rapport_BRGM_Tsunami_Mediterranee_Zonage_sismique).*

L'étude numérique du versant de Tigzirt a été menée d'abord sur le cas courant où les conditions sont généralement statiques, puis dans le cas d'un chargement dynamique.

II-CHOIX DU CODE DE CALCUL PLAXIS 2D

Le code des éléments finis avec Plaxis est un logiciel aujourd'hui couramment utilisé aux bureaux d'études. Il permet d'analyser des problèmes élastiques, élasto-plastiques, élasto-viscoplastiques en 2D ou 3D et en grands déplacements par la méthode lagrangienne actualisée. Bien que très fiable sur le plan numérique et du point de vue pratique, le système de menus arborescents à l'écran rend l'utilisation souple. Le recours aux manuels devenant rare, ceux-ci sont de volumes réduits, faciles à consulter. L'ensemble des options simplifiées (initialisation des contraintes, pressions interstitielles) permettent d'aller au but (prévoir le comportement d'un ouvrage).

III-MODELISATION AUX ELEMENTS FINIS DU GLISSEMENT DE TERRAIN DE TIGZIRT

III-1. Choix de la méthode de Mohr Coulomb

Le modèle de Mohr-Coulomb est un modèle élastique parfaitement plastique (sans écrouissage). Dans le plan de Mohr, la droite intrinsèque est représentée par :

$$\tau = \sigma_n \tan \varphi + c \qquad (1)$$

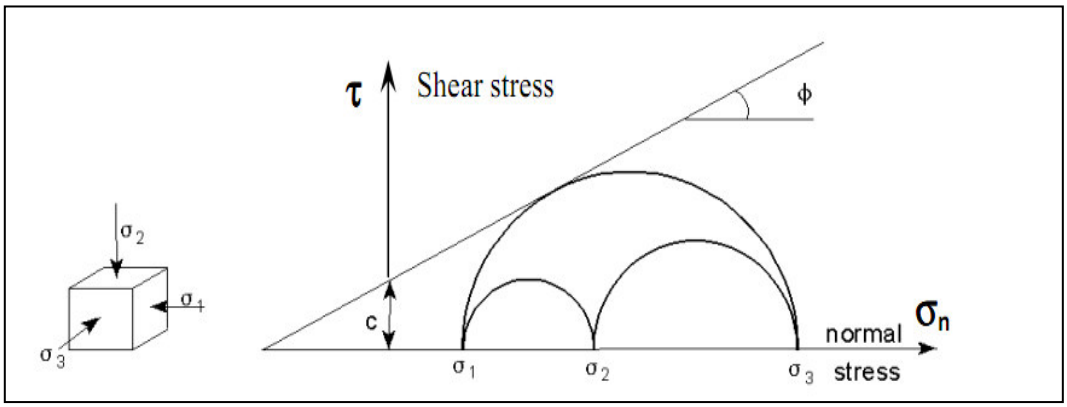


Figure 1 : Courbe intrinsèque du modèle de Mohr Coulomb.

Où σ_n et τ sont respectivement les contraintes normales et de cisaillement C et φ sont respectivement la cohésion et l'angle de frottement interne du matériau (Fig. 1).

Le modèle de Mohr-Coulomb demande la détermination de cinq paramètres. Les deux premiers sont E et ν (paramètres d'élasticité), les trois autres sont C, φ et ψ, respectivement la cohésion, l'angle de frottement et l'angle de dilatance. Ce sont des paramètres classiques de la géotechnique, certes souvent fournis par des essais de laboratoires, mais nécessaires à des

calculs de déformation ou de stabilité.

La modélisation numérique constitue une aide intéressante pour l'analyse des problèmes mécaniques. La résolution numérique des phénomènes de la mécanique consiste à approximer la solution continue grâce à un découpage spatial et temporel des équations d'équilibre. Plusieurs méthodes de discrétisation peuvent être utilisées (éléments finis, différences finies, *etc.*). La méthode des éléments finis est très répandue dans le domaine de la mécanique des sols et a été choisie pour la modélisation numérique du glissement de terrain de Tigzirt avec l'utilisation le code de calculs PLAXIS 2D version 2011. Ce code offre la possibilité de gérer de grandes déformations planes avec la réactualisation du maillage après chaque itération du calcul et de calculer pour un talus ou une pente un coefficient de sécurité global par la méthode « c/φ reduction ». Cette méthode s'inspire des méthodes d'analyse de stabilité classiques à l'équilibre limite (Fellenius, Bishop, *etc.*), toutefois sans imposer au préalable une surface de rupture. La stabilité de la pente est évaluée par réduction progressive des caractéristiques de résistance au cisaillement des matériaux. La valeur critique obtenue après la rupture correspond au coefficient de sécurité de cette dernière. Les résultats obtenus par cette méthode sont très proches de ceux obtenus en utilisant les méthodes à l'équilibre limite.

III-1-1. Principe de la méthode numérique évolutive

L'étude de la stabilité des pentes est basée sur la réduction des caractéristiques mécaniques qui est une option disponible dans PLAXIS (1999), appelée 'Phi-c reduction' et qui permet de calculer des coefficients de sécurité. Dans l'approche 'Phi-c reduction', les caractéristiques angles de frottement 'tanϕ' et cohésion 'C' du sol sont réduites progressivement jusqu'à l'obtention de la rupture. Le coefficient total 'ΣMsf' permet de définir la valeur des caractéristiques du sol à une étape donnée de l'analyse :

$$\Sigma Msf = \frac{c_{don}}{c_{reduit}} = \frac{\tan\phi_{don}}{\tan\phi_{reduit}} \quad (2)$$

Où les caractéristiques notées 'don' se réfèrent aux propriétés entrées des matériaux et les caractéristiques notées 'reduit' se reportent aux valeurs réduites utilisées au cours de l'analyse. ΣMsf vaut 1.0 au début du calcul pour utiliser des valeurs non réduites des caractéristiques des matériaux. Ensuite, les caractéristiques sont réduites progressivement jusqu'à l'apparition de la rupture, caractérisée par un coefficient Fs. Le coefficient de sécurité Fs dans les problèmes de géotechnique est basé sur le concept de la mobilisation des contraintes dans le sol :

$$\tau = C^m + \sigma \tan \varphi^m \qquad (3)$$

$$\text{Avec : } C^m = \frac{c}{Fs} \text{ et } \tan \varphi^m = \frac{\tan \varphi}{Fs} \qquad (4)$$

Où C^m et φ^m sont respectivement la cohésion mobilisée et l'angle interne de frottement du critère de Mohr-Coulomb. Fs, peut donc caractériser l'équilibre entre les efforts moteurs et les efforts résistants.

Dans cette méthode, le facteur de sécurité Fs représente la valeur de ΣMsf à la rupture. Cette approche ressemble à la méthode de calcul de coefficients de sécurité adoptée conventionnellement dans les analyses de rupture circulaire. Ce mode de recherche a été étudié par Jiang et Magnan [1997] et donne de bonnes corrélations avec d'autres méthodes plus classiques comme le calcul par tranches de BISHOP (A. Cuvillier et al (2004).

III-1-2. Présentation du modèle

Le modèle est composé de trois couches principales : un recouvrement superficiel composé d'éboulis gréso-argileux, un substratum marneux compact surmonté d'une frange altérée d'une épaisseur d'environ 2 m.

La loi de Mohr-Coulomb (élastique parfaitement plastique) a été choisie pour simuler le comportement à long terme des sols cohérents constituant le versant. Elle nécessite la connaissance de six paramètres : la densité, le module de Young E, le coefficient de poisson ν, la cohésion C, l'angle de frottement φ et l'angle de dilatance ψ (considéré comme nul pour les sols avec un angle de frottement inférieur ou égal à 30°). Les caractéristiques mécaniques retenues pour chaque formation sont présentées dans le tableau 1 du chapitre [N°II]. Les modules de Young ont été déduits des résultats des mesures des vitesses des ondes P et S réalisées sur des échantillons en laboratoire.

Le profil utilisé s'étale sur une longueur d'environ 1330 m (Figure 2) et traverse toute la zone instable depuis l'escarpement principal jusqu'au niveau de la mer. L'altitude maximale du profil est de 270 m et la minimale est d'environ - 60 m (sous le niveau de la mer). Le maillage retenu est composé de 2499 éléments triangulaires à 15 nœuds avec 12 points d'intégration par élément. Les conditions aux limites sont définies comme suit (Figure 2) :

- les lignes géométriques verticales pour lesquelles l'abscisse (x) est égale à la plus petite ou à la plus grande des abscisses (x) du modèle sont bloquées horizontalement ($U_x = 0$),

- les lignes géométriques, pour lesquelles la cote (y) est égale à la plus petite ordonnée (y) du modèle, sont entièrement bloquées ($U_x = U_y = 0$).

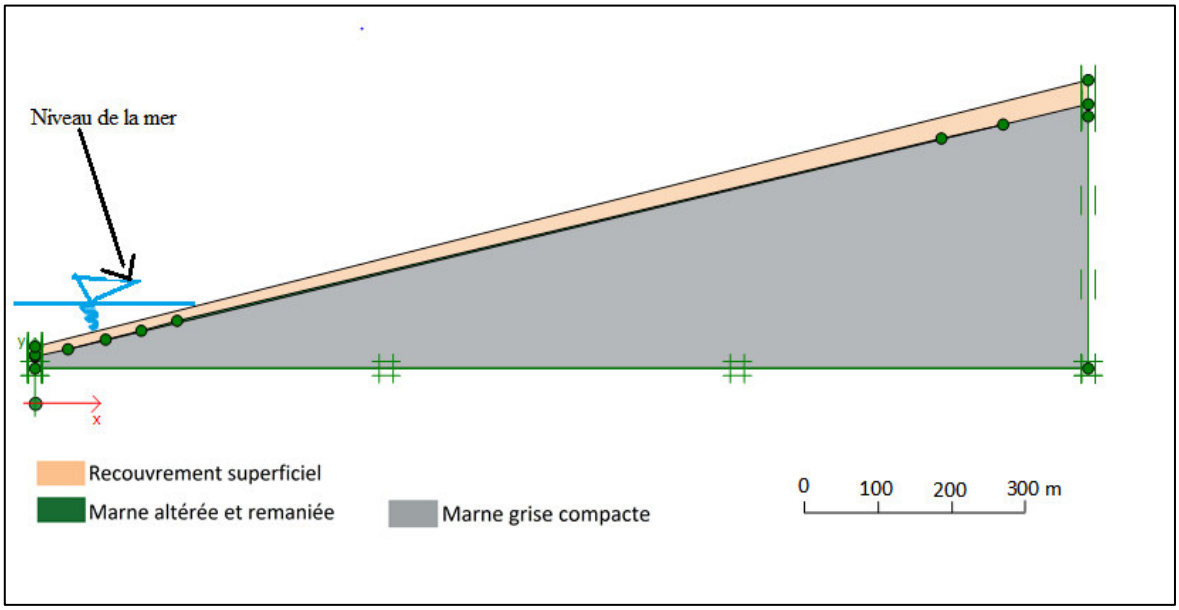


Figure 2: Profil du glissement de terrain de Tigzirt.

III-2. Le paramètre hydraulique

III-2-1.Cas statique du versant

Deux conditions hydrauliques ont été considérées dans les calculs :

- *Cas 1 :* le premier calcul est effectué *sans prise en compte d'une sollicitation dynamique*, *en prenant en considération une nappe libre*, avec un écoulement parallèle à la pente et une surface libre proche du terrain naturel (à environ 3 m de profondeur) ce qui représente la condition la plus défavorable observée sur le site lors des périodes hivernales.

- *cas 2 :* le second calcul est effectué *sans prise en compte d'une sollicitation dynamique*, en prenant en considération une nappe, dont la surface est parallèle à la pente à une profondeur d'environ 12 m par rapport au niveau du terrain naturel, qui représente la condition généralement observée à la fin des périodes estivales.

IV-RESULTATS DES CALCULS

IV-1.Cas statique

IV-1-1. Cas d'une nappe sub-affleurante (à 3 m de profondeur)

Le versant subit un mouvement global vers le Nord (vers la mer) avec un déplacement total

maximal supérieur à 1,14 m (Figure 3) et un coefficient de sécurité d'environ 0,95(Figure 4).Le coefficient de sécurité, calculé dans les mêmes conditions en considérant l'équilibre d'un versant de 15° infini et une rupture plane parallèle à la pente à 30 m de profondeur, est égal à 1.00, valeur très proche de celle calculée par PLAXIS.

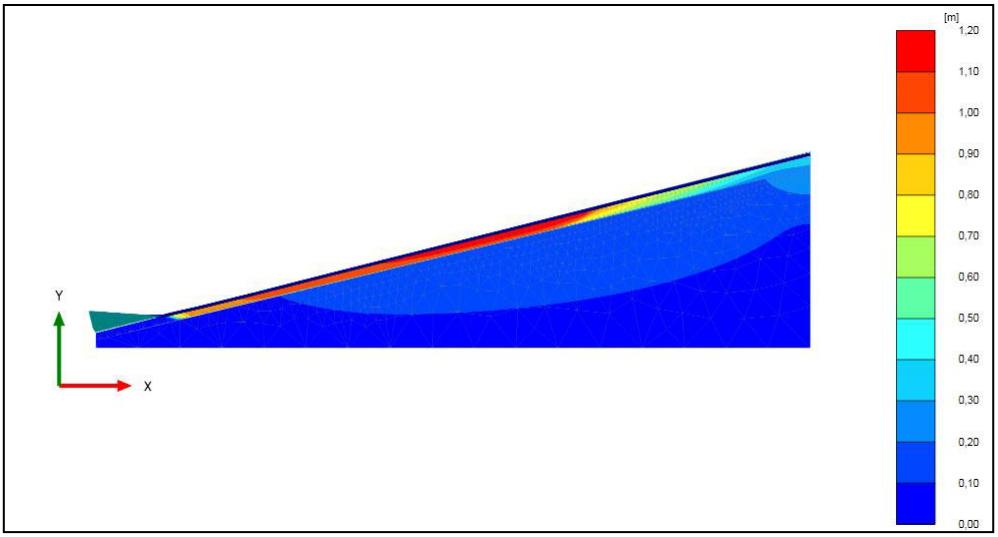


Figure 3 : Champs de déplacements totaux cas d'une nappe en surface ‖U‖=1.14 m.

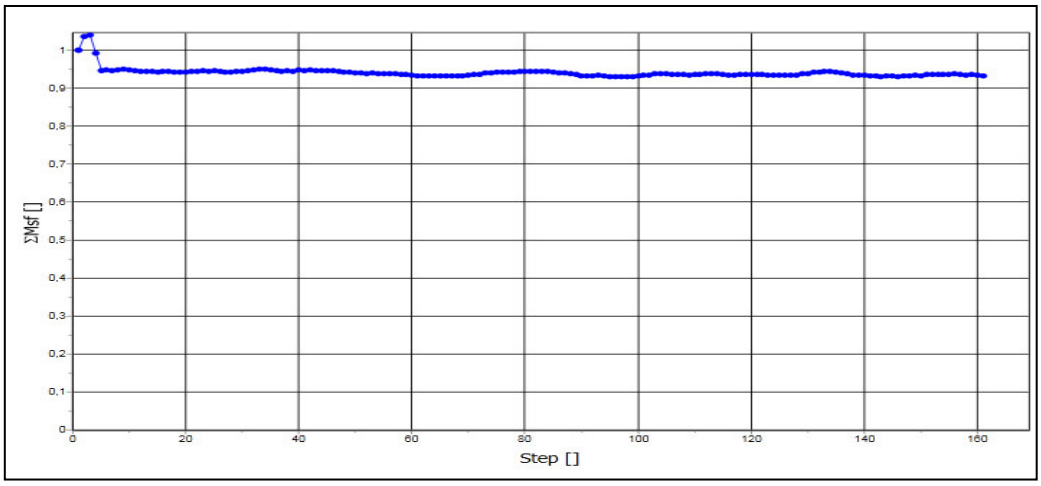


Figure 4 : courbe de la variation du coefficient de sécurité en cas d'une nappe sub-afleurante.

Le déplacement horizontal observé est d'environ 1,10 m et le déplacement vertical (obtenu au niveau de la crête du versant) est supérieur à 0,47 m. En outre, le pied du versant (sous le niveau de la mer) subit un bombement de l'ordre 0,20 m. Les ordres de grandeur de ces déplacements sont cohérents avec ceux mesurés sur le terrain (Figure 3). Les zones plastiques se développent principalement au niveau de la zone altérée et remaniée située à l'interface entre la marne grise et le recouvrement superficiel (Figure 5) et leur surface enveloppe à une allure générale plane.

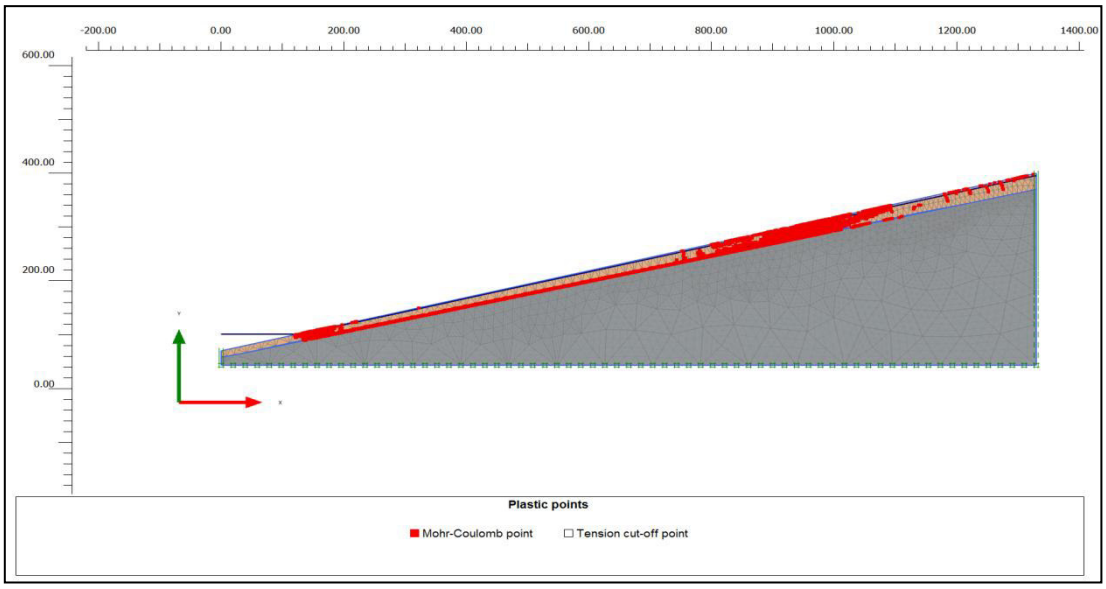


Figure 5 : Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas d'une nappe en surface.

IV-1-2.Cas d'une nappe à 12 m de profondeur

Les résultats obtenus mettent en évidence la cinématique du mouvement et l'influence du niveau de la nappe sur le coefficient de sécurité. Le coefficient de sécurité calculé est égal à 1,27(Figure 6), ce qui représente une augmentation d'environ 30 % par rapport au cas d'une nappe sub-affleurante. Le coefficient de sécurité calculé dans les mêmes conditions en considérant l'équilibre d'un versant de 15° infini avec une rupture plane parallèle à la pente à 30m de profondeur est aussi égal à 1,27 (méthode d'équilibre limite)

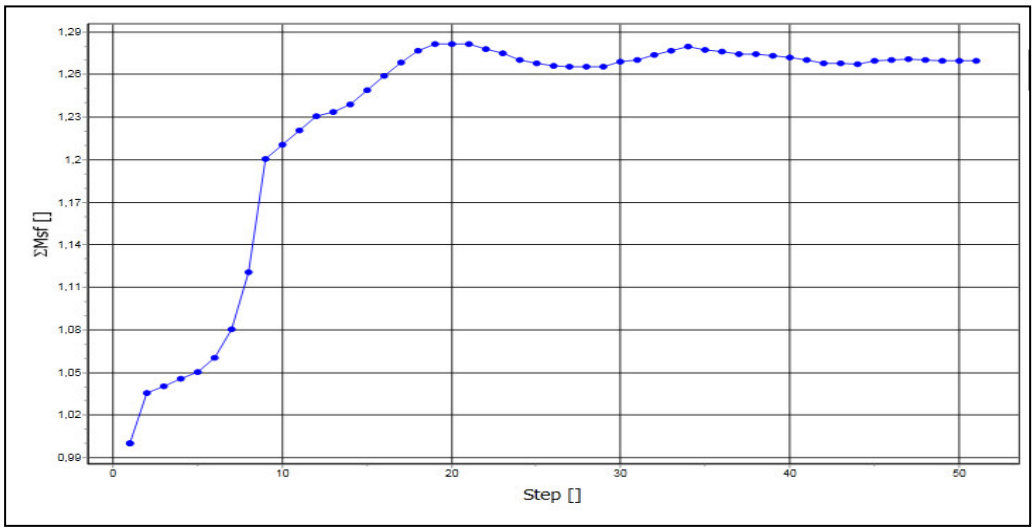


Figure 6 : Courbe de la variation du coefficient de sécurité avec la nappe a 12m de profondeur.

Les déformations obtenues sont identiques à celles obtenues pour le cas d'une nappe à 3 m de

profondeur, mais avec des amplitudes de déplacement moins importantes (Figure 7). Le déplacement horizontal maximal obtenu pour ce cas est d'environ 0,35 m et le déplacement vertical d'environ 0,27 m, avec une diminution des zones plastifiées après la déformation (Figure 8).

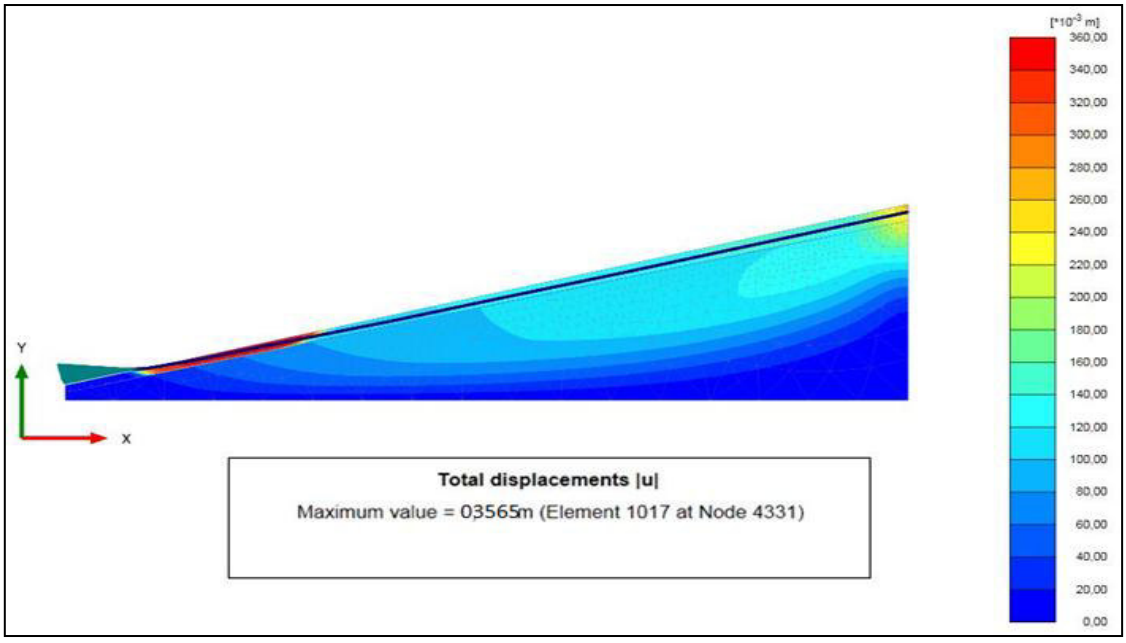


Figure 7: Champs de déplacements totaux : cas d'une nappe à une profondeur de 12m ‖U‖=0.35 m.

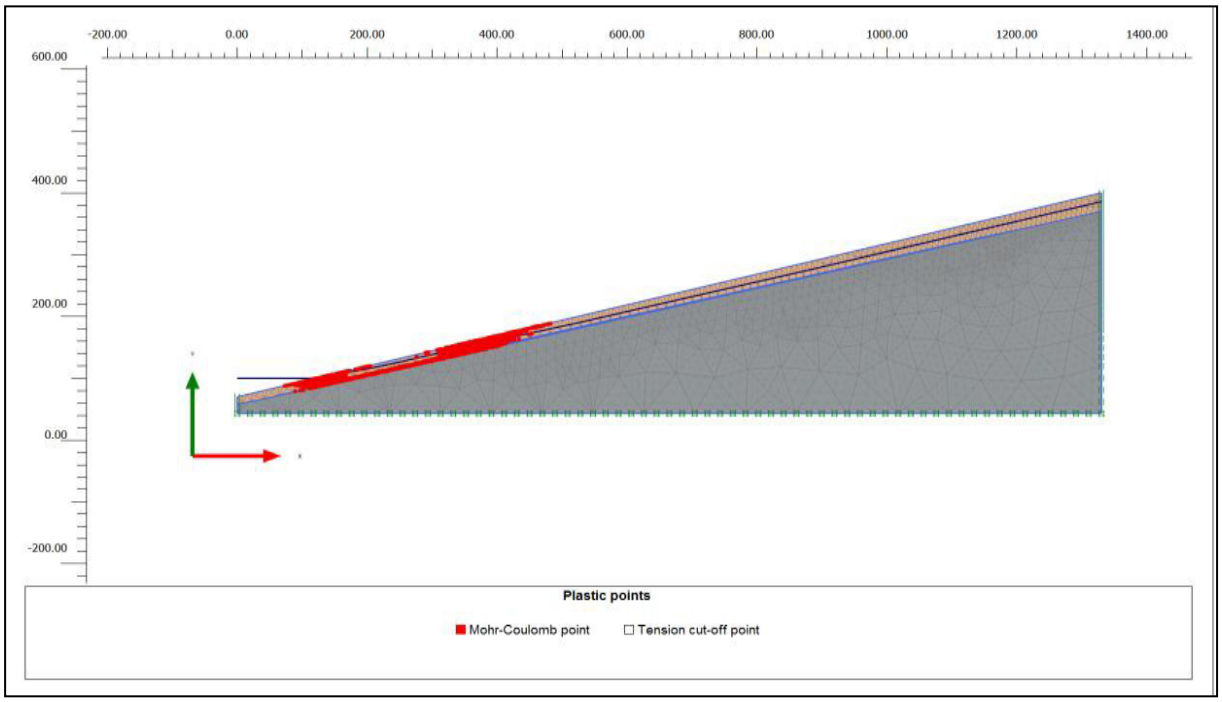


Figure 8: Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas d'une nappe 12 m de profondeur.

IV-1-3. Interprétation et Commentaires

Les caractéristiques de résistance au cisaillement des argiles marneuses, au niveau de la surface de glissement, sont éloignées des caractéristiques résiduelles attendues pour des matériaux d'une telle nature (entre 10° et 15° pour une argile principalement constituée de kaolinite et d'illite) ; ceci permet d'expliquer la rupture. Il est donc probable que l'état actuel corresponde aux premiers stades de la rupture généralisée du versant *(Picarelli et al., 2004)* et que l'activité du glissement peut s'accentuer du fait de la réduction progressive de la résistance au cisaillement (de l'ordre de 60 % pour les argiles très plastiques *(Gibo et al., 2002)*) et de la raideur des matériaux au niveau de la surface de glissement.

IV-1-4. Effet de la surcharge (urbanisation)

IV-1-4-1. Cas statique sous l'effet de l'urbanisation

Les deux tiers de la population algérienne vivent actuellement sur la frange tellienne qui ne représente que 4% du territoire national. La côte algérienne est considérée aujourd'hui comme l'une des plus peuplée du bassin méditerranéen.

Un algérien sur 10 vit dans la zone côtière algéroise dans une commune littorale; les résidents sont rejoints durant la période estivale par des millions de nationaux et d'étrangers sans parler des flux quotidiens des personnes venant des autres régions du pays.

Tigzirt (îlot en berbère) fait partie de ces zones littorales ; elle s'étend sur une superficie de 41.68km^2 et se longe sur une façade maritime de 35km, soit 41% de la côte de la wilaya de Tizi-Ouzou. Selon l'annuaire statistique de la wilaya de Tizi-Ouzou, la daïra de Tigzirt abrite en 2010 une population de 36 174 habitants, 10 595 logements et un taux d'occupations de 5.8 habitants/logements qui se répartissent entre les trois communes. La commune de Tigzirt abrite 33.99% de cette population, ce qui explique la forte attractivité économique et résidentielle de la commune ainsi que le caractère urbain de son chef-lieu (source annuaire statistique 2010 de la wilaya de Tizi-Ouzou).

La ville de Tigzirt se trouve aujourd'hui livrée à une urbanisation linéaire anarchique, sans le respect d'instruments d'urbanisme (PDAU et POS), le béton a consommé toutes les terres destinées à l'urbanisation et même les terres non urbanisables. Le périmètre urbain de la ville ne cesse de s'élargir et son linéaire urbanisé dépasse les 3km. Actuellement l'extension se fait dans tous les sens, vers le Sud, l'Est et l'Ouest.

La RN24 constitue l'axe principal du développement urbain de la ville de Tigzirt, l'extension urbaine commence à dépasser les limites Est de la ville pour atteindre dans quelques années la commune d'Iflissen. L'urbanisation rapide de la ville de Tigzirt a pour conséquence une

augmentation toujours plus grande de la demande des terres, elle exerce des pressions plus fortes sur les terres existantes dans les zones urbaines et les zones périphériques à la ville qui fait que le mouvement du terrain suit la direction de ces extensions.

Dans cette étude, la surcharge considérée est linéairement répartie de 10 KN/m le long du profil du glissement de terrain de Tigzirt, sachant que l'urbanisation est concentrée en amont de la RN24 tout en considérant que la nappe affleure le niveau du terrain naturel.

IV-1-4-2. Résultats et commentaires

Les résultats du calcul réalisé avec la prise en compte de la surcharge due à l'urbanisation montrent que l'urbanisation influe considérablement sur la stabilité du site (Figure 9). Une augmentation d'environ 40% du déplacement ainsi qu'une diminution d'environ 10% du coefficient de sécurité ont été observées pour ce cas de calcul (Figure 10).

Les zones de plastifications du versant montrent que le versant est dans un état d'instabilité précaire. Les surcharges rendent le versant encore plus vulnérable et l'effet de ces surcharges ont dédoublé le taux de déplacements en ayant une plastification concentrée au niveau de la zone de remaniement (dans la marne argileuse, couche savon) (Figure 11). Les déformations gardent la même allure sous l'effet d'une nappe sub-affleurante mais avec une nette influence de cette surcharge sur le sol environnent en diffusant le champ de déformations dans une plus grande surface jusqu'à atteindre le sommet du versant ; ce qui explique l'apparition des arrachements d'ordre métrique dans ce dernier accompagné d'un étalement latérale de 0.27m.

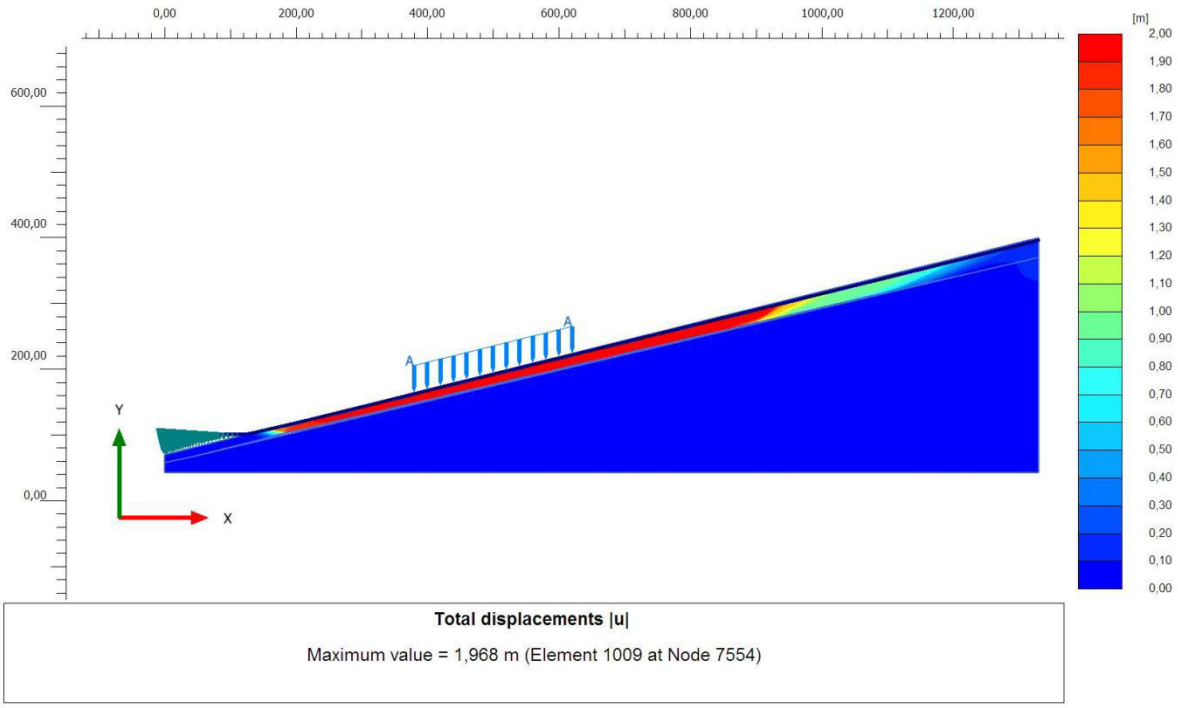


Figure 9 : Champs de déplacements totaux sous l'effet de l'urbanisation.

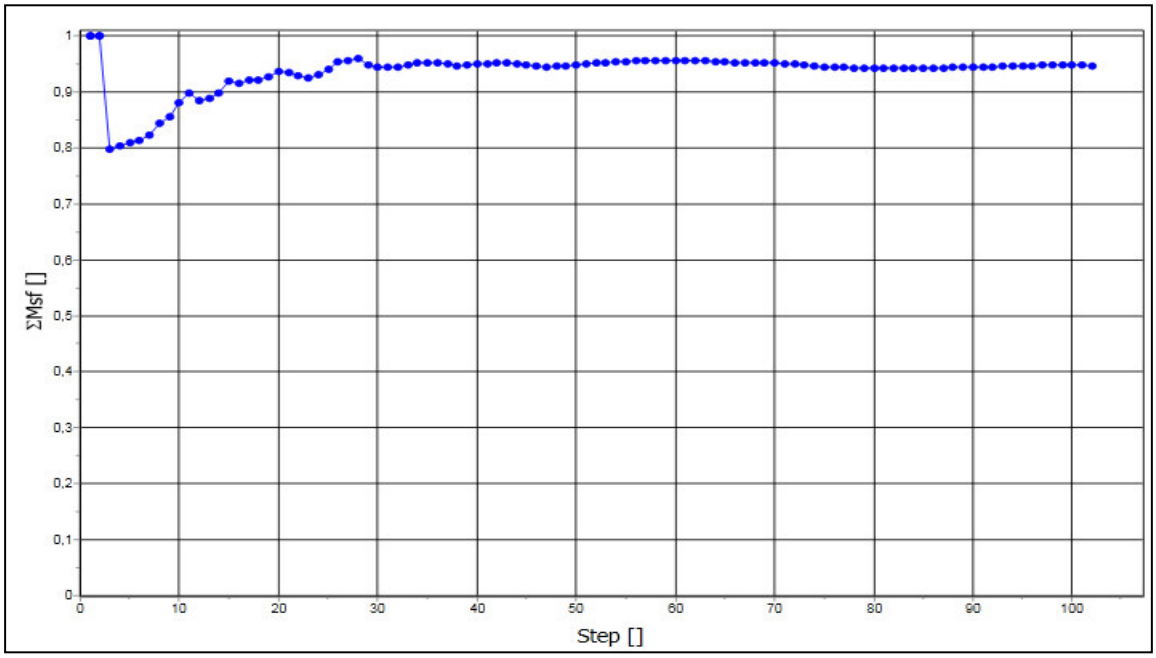


Figure 10 : Courbe de variation du coefficient de sécurité sous l'effet d'une surcharge et une nappe sub-affleurante.

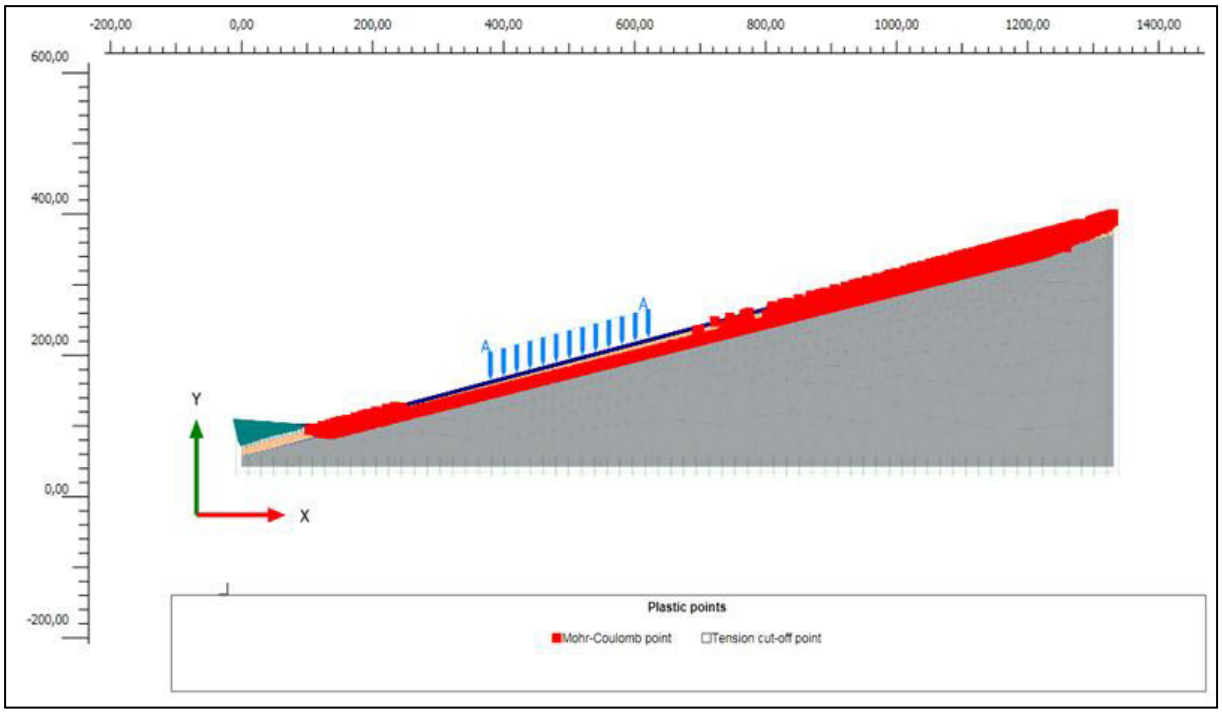


Figure11 : Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas d'une nappe en surface et sous l'effet d'une surcharge.

IV-2.Cas dynamique

La méthode (Phi et C réduction) a été utilisée et adaptée au cas dynamique.

IV-2-1. Etude paramétrique du versant de Tigzirt (cas dynamique)

Le versant de Tigzirt est sujette à des excitations sismiques qui peuvent modifier la stabilité précaire du site et peuvent le rendre vulnérable. Cette zone a été touchée par un des séismes les plus meurtriers d'Algérie : séisme de Boumerdes avec un bilan de 2278 morts, 10 147 blessés et plus de 15000 sans-abris.

Ce séisme a secoué la région de Boumerdes (50 km à l'Est d'Alger) le 21 mai 2003, de magnitude (Mw = 6.8), dont le signal sismique émis est représenté en (Figure 12).Les dégâts et les dommages ont été ressentis dans les wilayas de Boumerdes, Alger, Tizi-Ouzou et Bouira (Figure 13).

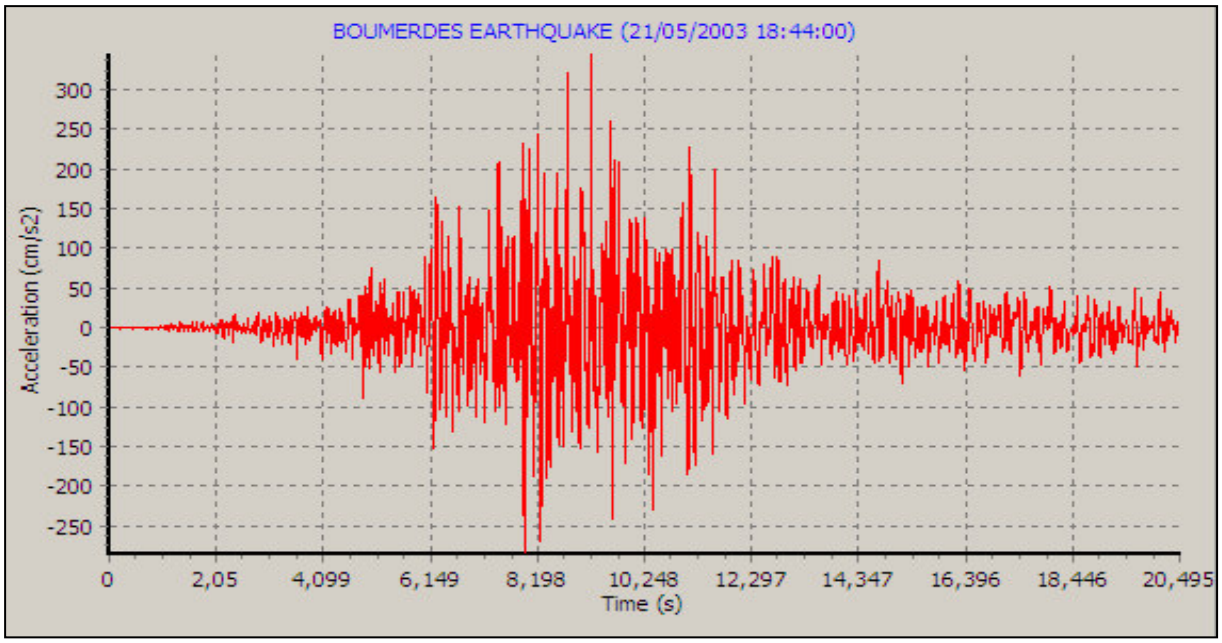


Figure12 : Le signal sismique de Boumerdes du 21-05-2003.

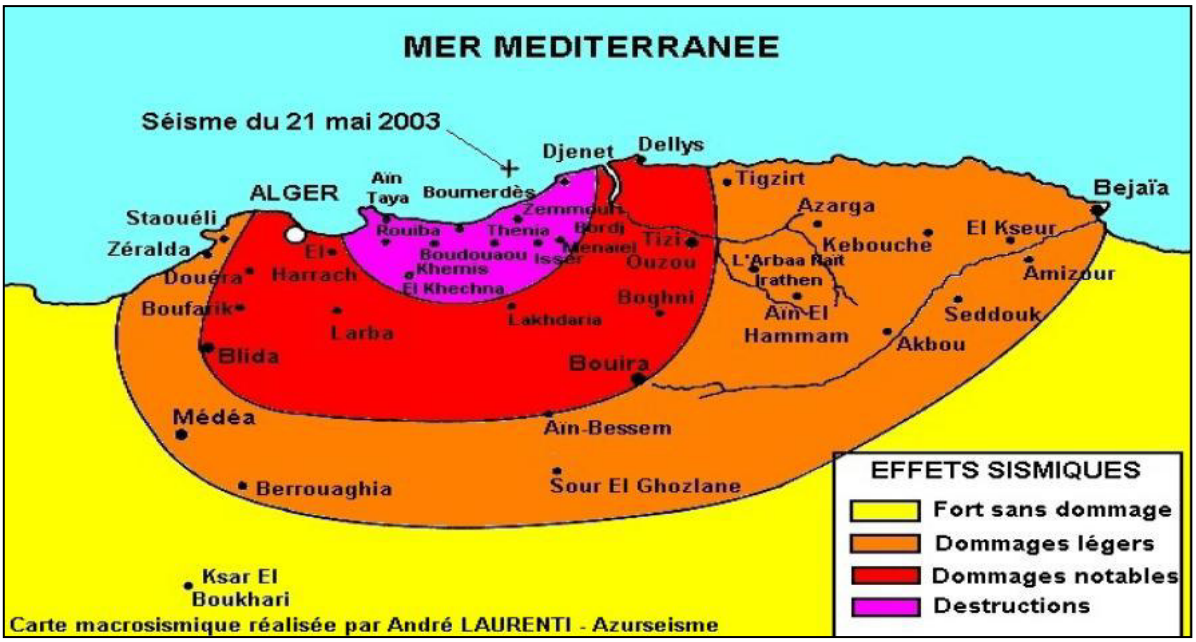


Figure 13 : Répartition des dégâts du séisme de Boumerdes (source : http://azurseisme.free.fr/index.html).

IV-2-2.Le versant de Tigzirt sous l'effet de l'excitation sismique

IV-2-2-1.Nappe en surface

Afin d'effectuer la modélisation dynamique, l'enregistrement du séisme de 21 mai 2003, Boumerdés (Mw=6.8) a été utilisé. Ce dernier a été ressenti sur un rayon de 250 Km de l'épicentre avec un enregistrement qui a atteint 0.02g (Laouami.N ; 2003). Ce choix est

justifié par le fait que la ville de Tigzirt se situe à 65 km à l'Est de l'épicentre et que ce séisme est le plus puissant enregistré dans le périmètre de cette dernière depuis 1716 (Rothé, J. P.1950). L'enregistrement de la station de Kaddara 2 N-S (Figure 12) qui a atteint 0.34g, a été choisi comme excitation sismique à la base. Le choix de cet enregistrement revient à l'emplacement de cette dernière (Figure 14) sur un affleurement rocheux (Meslem et al ; 2008). Ce calcul ne s'effectue qu'une fois le modèle est réalisé, en imposant des bandes absorbantes aux extrémités du modèle avant d'employer l'excitation sismique à la base du profil.

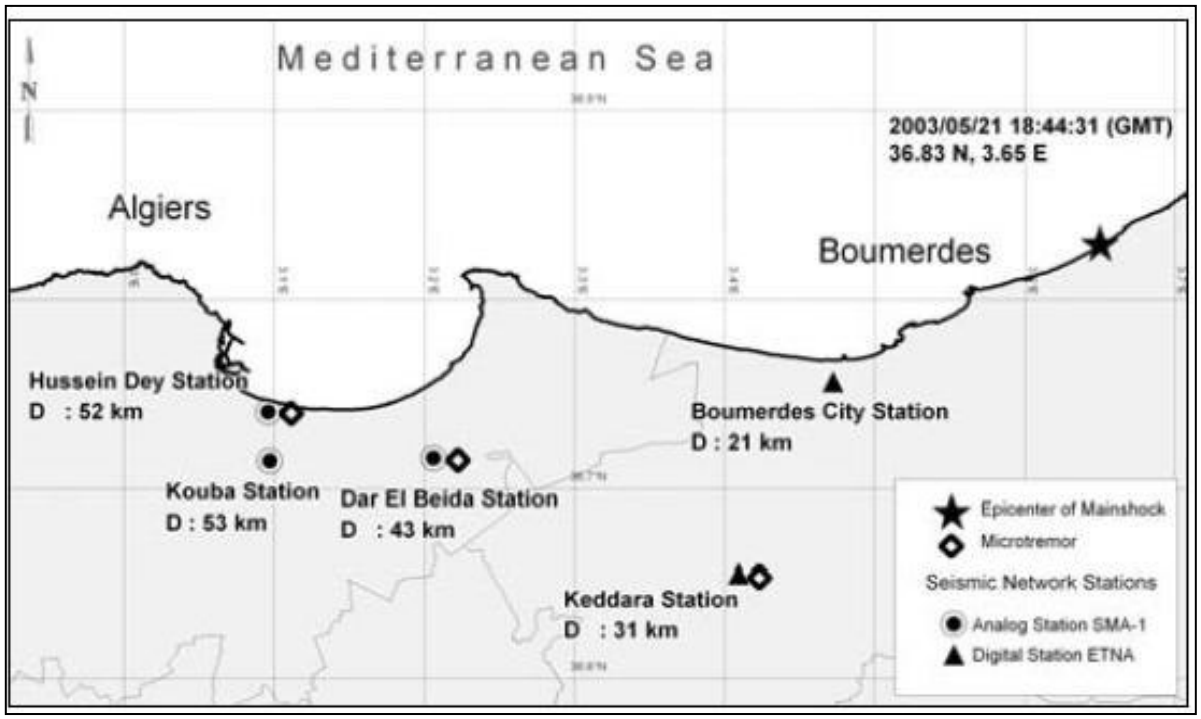


Figure 14 : Localisation des stations d'enregistrements sismiques du 21-05-2003 de Boumerdes.

IV-2-2-1.Résultats

Les résultats obtenus pour le calcul du versant de Tigzirt, sous l'effet de l'enregistrement du séisme de Boumerdés PGA= 0.34g, montrent une augmentation du déplacement maximale d'environ 88% par rapport au calcul statique. Ceci est dû à l'influence de l'effort sismique sur la stabilité du versant (Figure 15). Par ailleurs, le mouvement sismique n'a pas été amplifié par le sol (la réponse du sol en accélération maximale obtenue est d'environ ''0,14 g'' (Figure 16), avec un coefficient de sécurité inférieur à 1et est égale à 0.93.

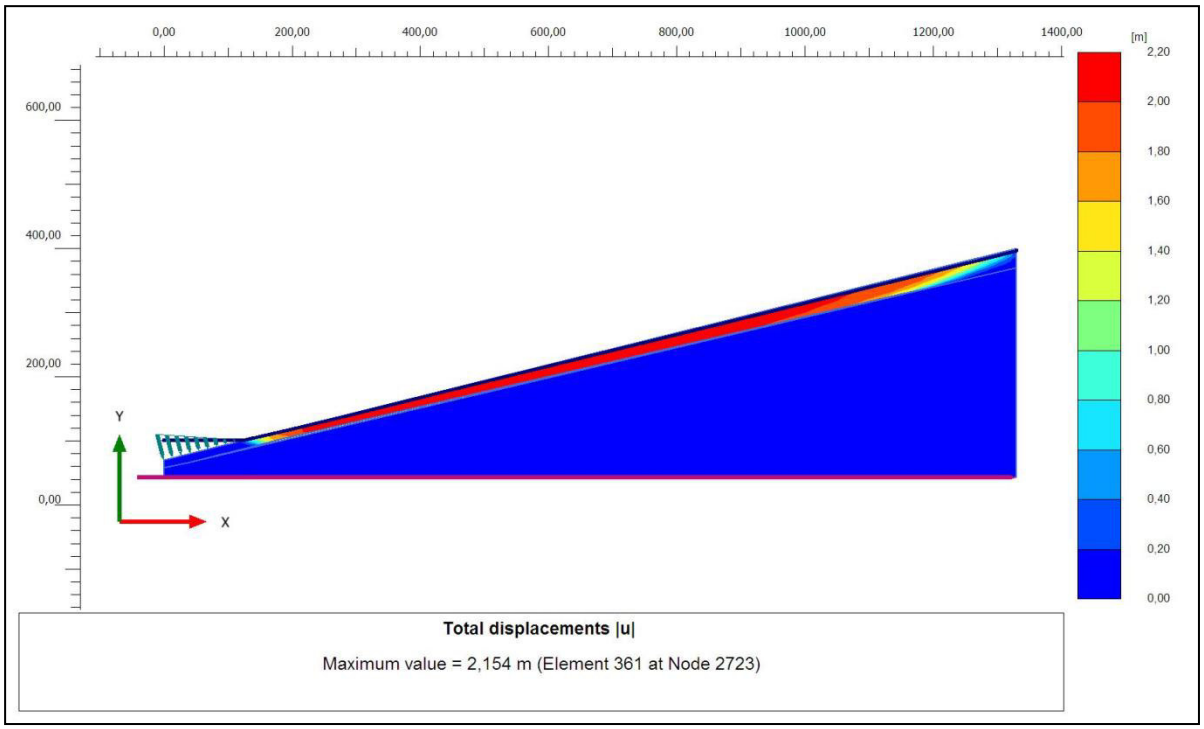


Figure 15 : Champs de déplacements totaux cas dynamique avec une nappe en surface ‖U‖=2.145 m.

La zone de plastification a atteint en profondeur la couche de remaniement, et en largeur le sommet de la colline avec une concentration au niveau des arrachements ainsi qu'au niveau du pied du versant.

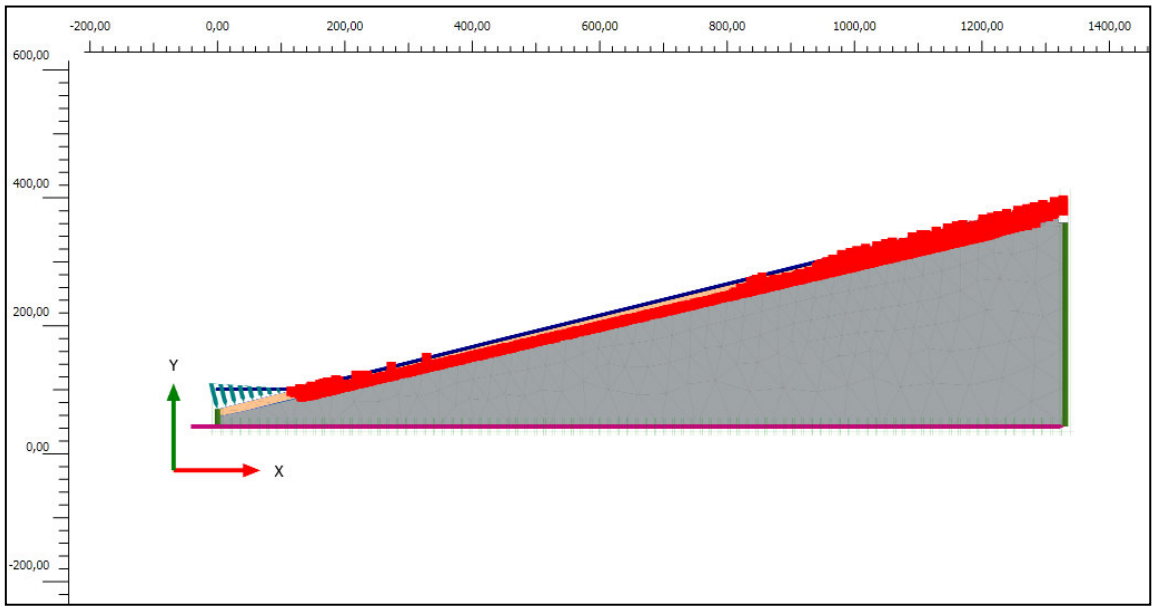


Figure 16: Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas dynamique avec une nappe en surface.

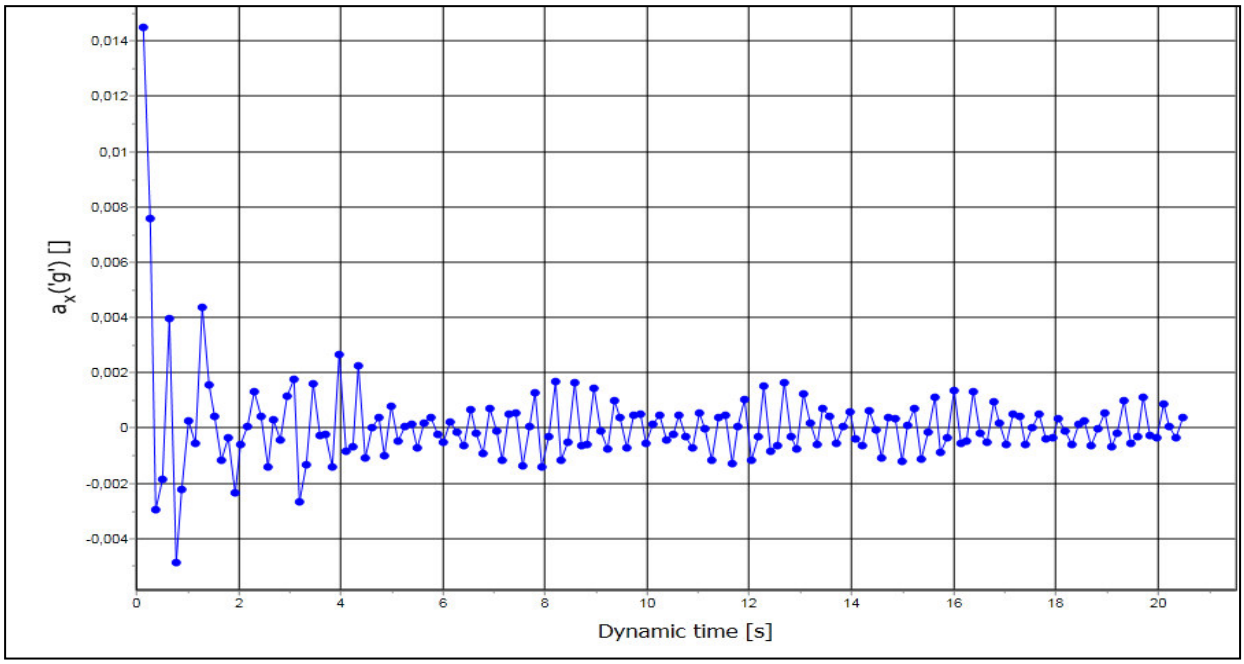


Figure 17: Désamplication du signal sismique de Boumerdes de 21-05-2003

On constate une désamplification du signal sismique ce qui veut dire qu'il n y a pas eu d'effet de site.

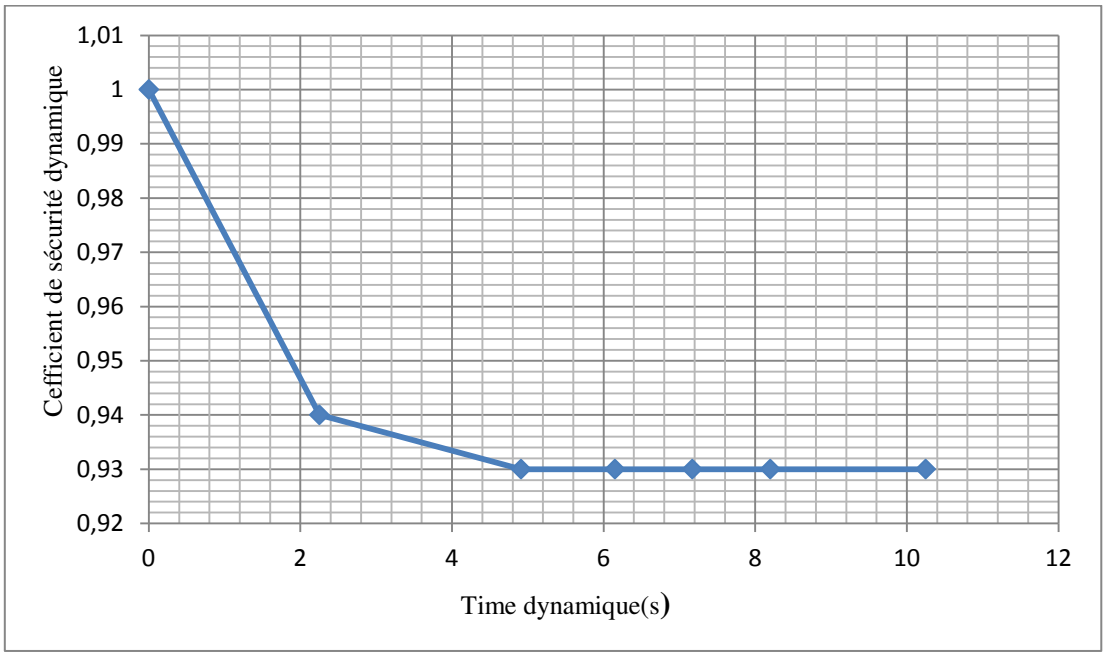


Figure 18: Calcul du coefficient de sécurité dynamique cas d'une nappe en surface.

IV-2-3.Nappe à 6m de profondeur

Dans ce cas, le calcul dynamique a été relancé en considérant un rabattement de la nappe de 6 m de profondeur, en considérant les mêmes conditions aux extrémités et en employant des bandes absorbantes, les résultats sont présentés sur les figures 19, 20 et 21.

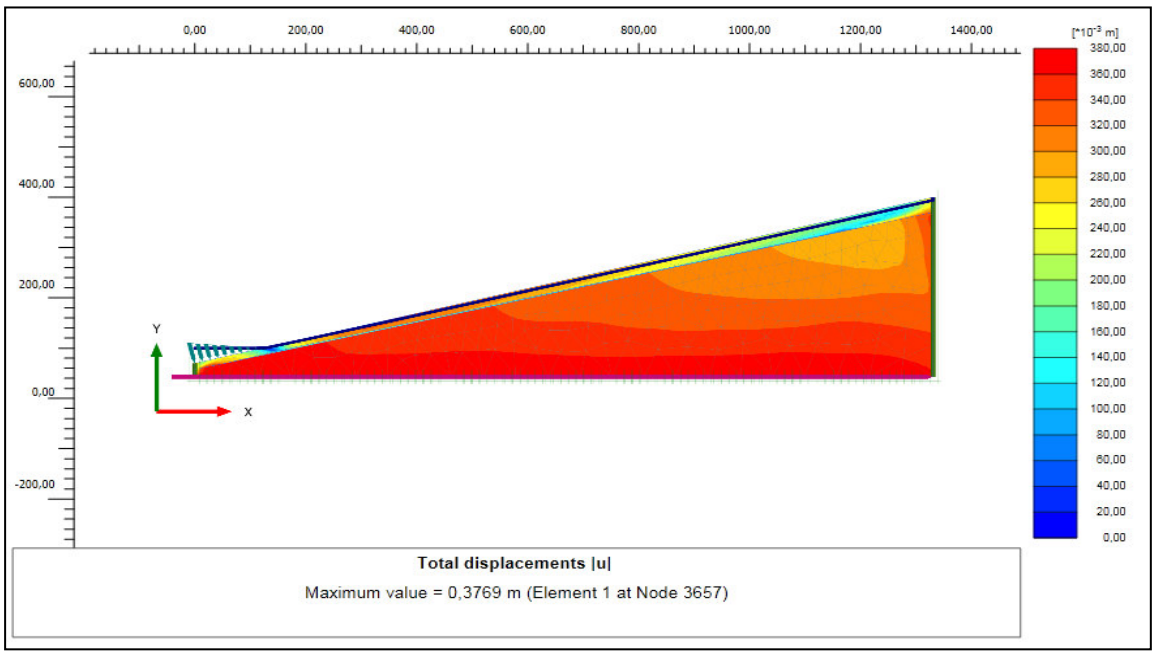


Figure 19 : Champs de déplacements totaux cas dynamique avec une nappe à 6m de profondeur ‖U‖=0.377 m.

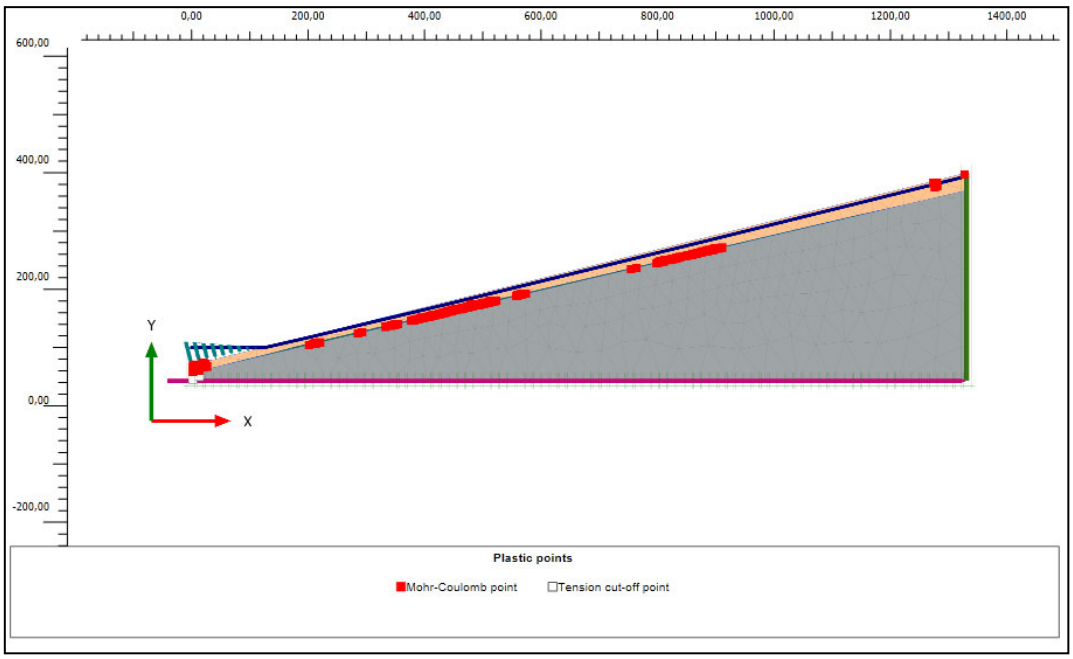


Figure 20: Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas dynamique avec une nappe à 6m de profondeur.

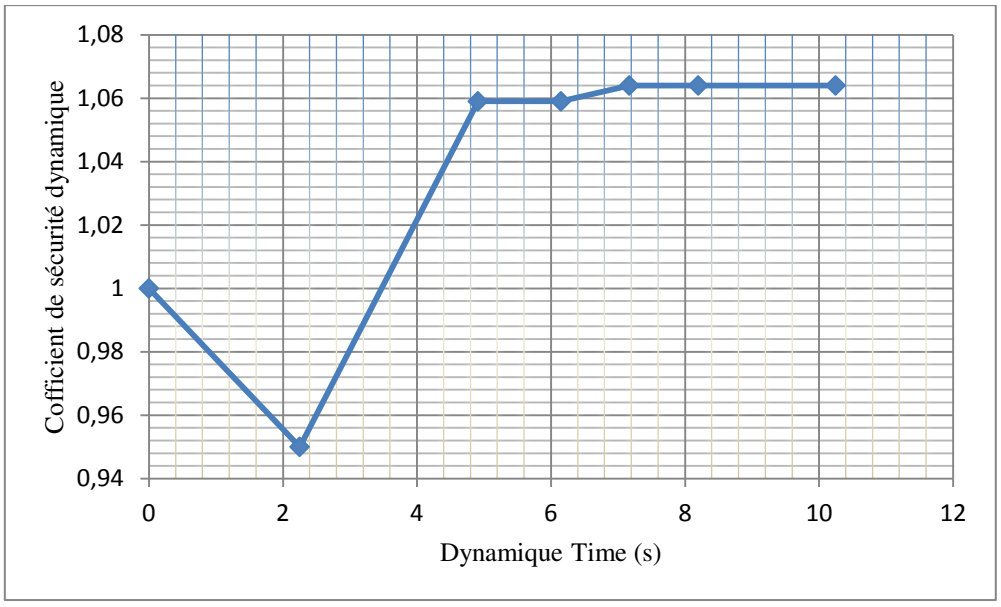


Figure 21 : Calcul du coefficient de sécurité dynamique : cas d'une nappe à 6m de profondeur.

IV-2-3-1. Résultats et commentaires

Dans ce cas, une diminution du taux de déplacement a été constatée qui est de l'ordre de 82% (figure 19) par-rapport au cas dynamique avec une nappe en surface et qui est de l'ordre de 67% par rapport au cas statique avec une nappe en surface. Quant au remaniement, il est moins important et ne touche pas le sommet (fig. 20).En effet, La zone plastifiée diminue considérablement par rapport au cas d'une nappe en surface avec chargement sismique, et met en valeur le rôle joué par la zone remaniée dans la mobilité du versant.

Le coefficient de sécurité obtenu varie $0.95 \leq Fs \leq 1.07$ (fig. 21); cela prouve que le versant est en état de stabilité précaire. En outre, le taux de déplacement (figure 19) a augmenté de 61% par rapport au cas dynamique sans surcharge ; ce qui reflète le danger auquel est soumis le versant urbanisé de Tigzirt. La nappe joue aussi un rôle prépondérant tant en surface qu'en profondeur. En effet, elle fragilise le poids du versant en lui introduisant un effort moteur.

IV-2-4.Nappe à 9m de profondeur

On procède à un rabattement de 3m de profondeur de la nappe par rapport au cas précédent (Nappe à 9 m de profondeur).

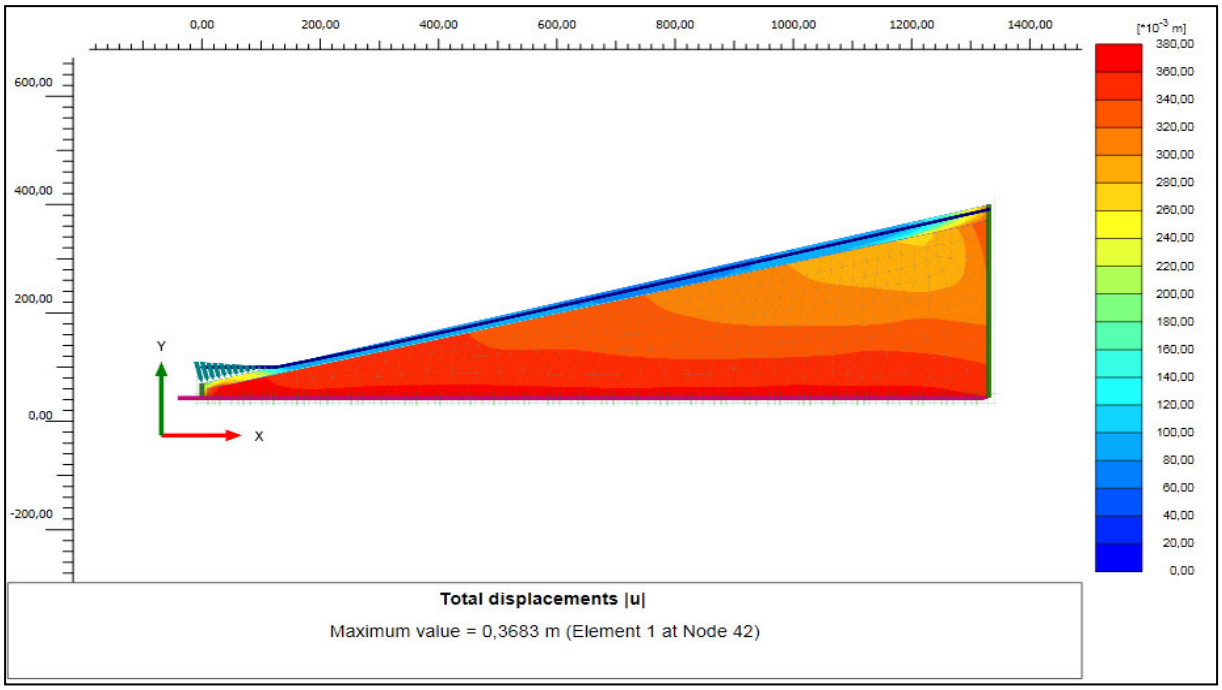


Figure 22 : Champs de déplacements totaux cas dynamique avec une nappe en surface ‖U‖=0.368m

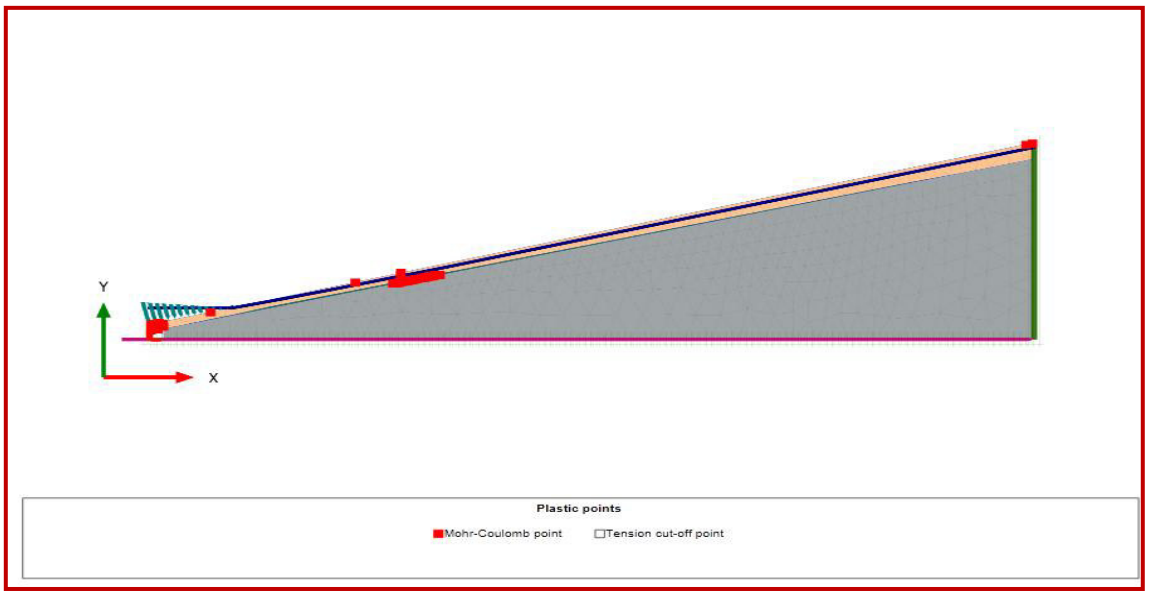


Figure 23: Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas dynamique avec une nappe à 9m de profondeur.

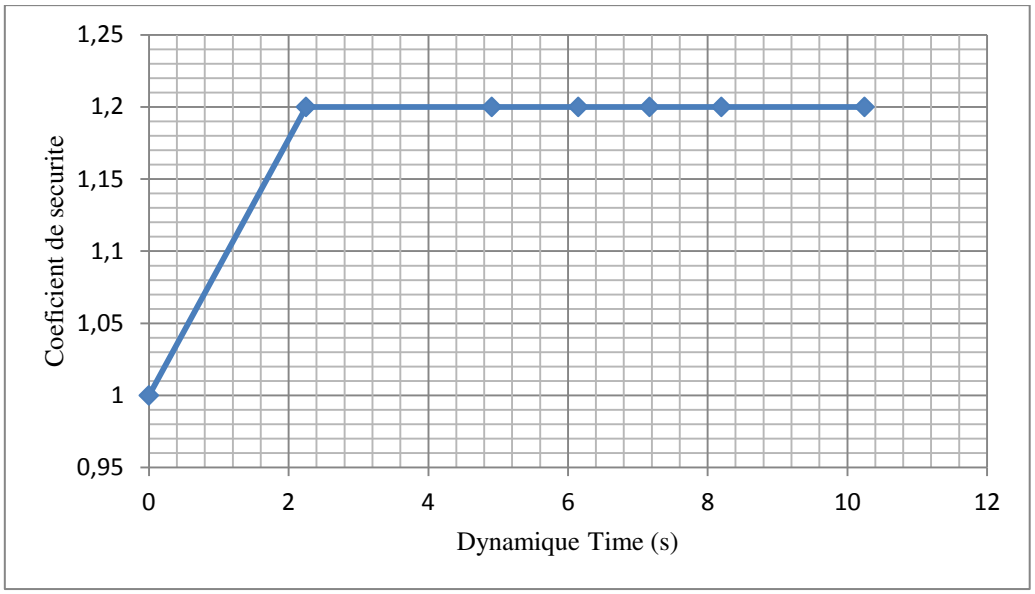


Figure 24: Calcul du Fs dynamique cas d'une nappe à 9m de profondeur.

IV-2-4-1.Résultats et commentaires

Le déplacement totale obtenu est de l'ordre 0.368m (fig. 22), ce qui montre qu'il n y a pas une grande variation par-rapport au cas précédant. Il y a une réduction de l'ordre 2% des déplacements, et une augmentation importante du facteur de sécurité de l'ordre de 77% par rapport au cas du chargement sismique avec une nappe en surface. Ce coefficient de sécurité obtenu est égal à 1.2 (Fig. 24); donc la stabilité est atteinte (Fs > 1). Ceci représente le cas réel du versant lors de la saison estivale où le niveau de la nappe est le plus bas. La zone de remaniement est diminuée lorsque le niveau est à 9 m et elle se localise uniquement sous la surcharge et au pied (Fig. 23). vu que la combinaison de l'action du séisme est largement influencée par la variation de la nappe. Donc la stabilité du versant dépend du niveau de la nappe et surtout lorsque celle-ci est combinée avec l'action sismique.

IV-2-5.Nappe à 12m de profondeur

En combinant l'action sismique et le niveau de la nappe à 12 m de profondeur, on obtient les résultats représentés par les figures 25, 26 et 27 suivantes :

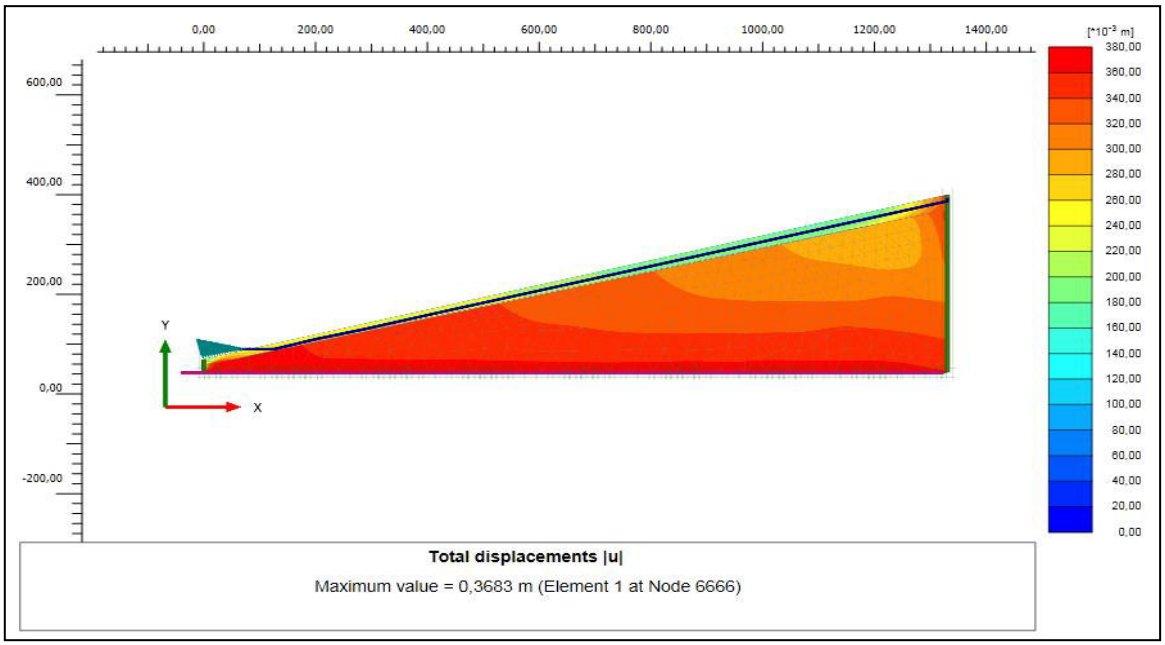


Figure 25 : Champs de déplacements totaux cas dynamique avec une nappe à 12m de profondeur ‖U‖=0.368 m.

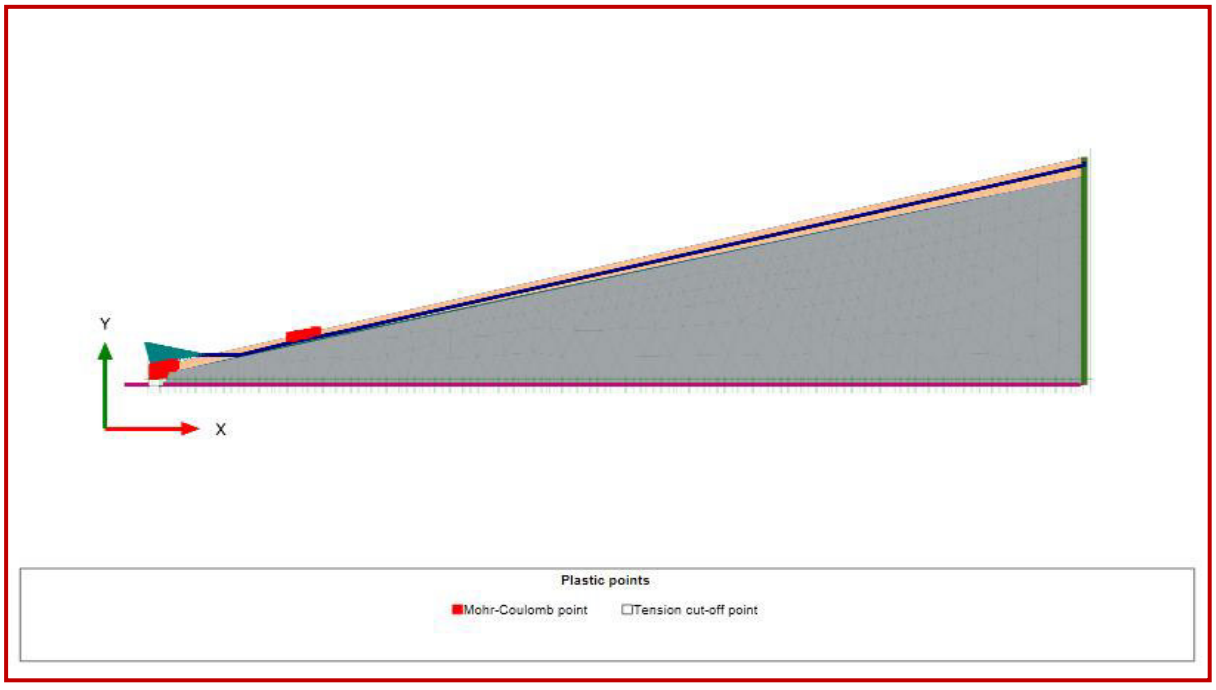


Figure 26: Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas dynamique avec une nappe à 12m de profondeur.

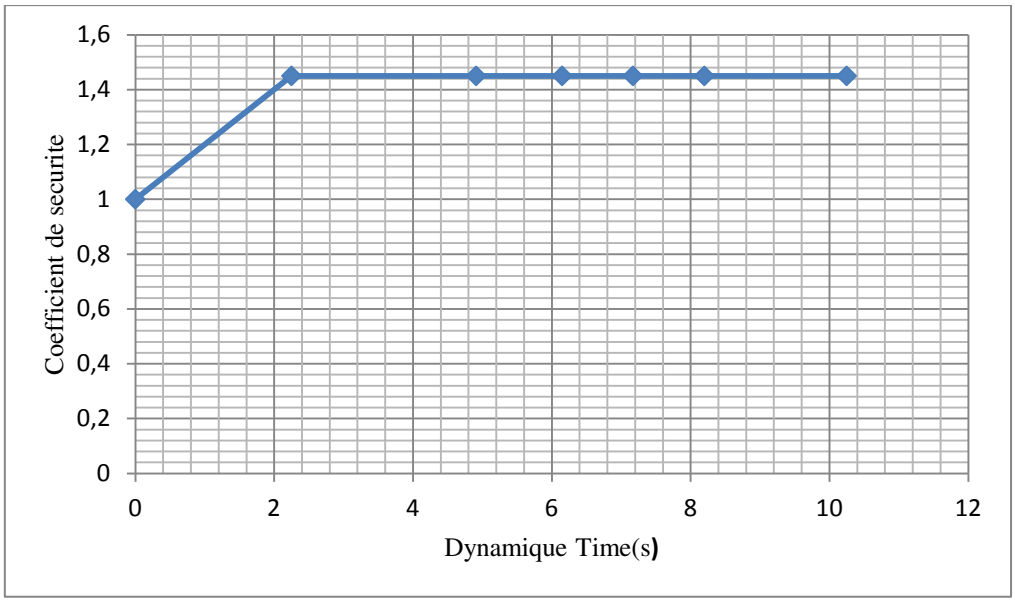


Figure27 : Calcul du Fs dynamique : cas d'une nappe à 12m de profondeur.

IV-2-5-1.Résultats et commentaires

Le déplacement lorsque la nappe est à 12m de profondeur n'a pas changé par rapport au niveau de la nappe à 9 m de profondeur qui est de 0.368m (fig. 25). Par contre, le coefficient de sécurité a augmenté de 20% qui est de l'ordre 1,42(fig. 27) et qui assure la stabilité du versant. Mais le taux de déplacement a diminué de 82% par rapport au cas statique avec surcharge et une nappe sub-afleurante. De plus, il n y a pas eu d'influence sur la zone de remaniement au-delà de 9m de profondeur pour la nappe (fig. 26).

Ce qui nous permet de conclure que le versant tend à se stabiliser au fur et à mesure que le niveau de la nappe baisse. Lorsque la nappe atteint 9m de profondeur le taux de déplacement ne varie pas, ce qui correspond en quelque sorte à la profondeur de la couche remaniée et à la rencontre du substratum ce qui limite les déplacements et qui explique leur non variation.

IV-2-6. Synthèses des résultats

Le taux de déplacement maximum pour le versant de Tigzirt est enregistré lorsque le versant est soumis à une excitation sismique sous la condition d'une nappe en surface, et on remarque que dès que la nappe se rabat à 6 m de profondeur une diminution considérable de déplacements est remarquée qui est de l'ordre de 82%. En outre, on constate que la nappe n'a plus d'influence sur ce taux de déplacement lorsqu'elle dépasse les 9 m de profondeur. L'excitation sismique a une influence sur le versant car elle le mobilise davantage par rapport au cas statique.

La zone plastifiée varie en fonction du niveau de la nappe combinée avec l'action sismique. Le cas le plus défavorable est celui du versant soumis à un chargement dynamique avec une nappe en surface. Le remaniement touche tout le long du versant. Celui-ci est marqué tant au sommet où il y a eu des arrachements qu'au pied où la nappe est sub-afleurante. Lorsque la nappe est rabattue à 6 m de profondeur, le remaniement est sur tout le long du versant mais moins accentué au niveau du sommet. Ce remaniement diminue au fur et à mesure que la nappe se rabat. A 9 m de profondeur, il ne touchera que le pied et le milieu du profil, mais à 12 m de profondeur, il ne touchera que le pied.

Le versant est instable dans le cas où la charge sismique est associée à une nappe en surface. Cette stabilité est mesurée au moyen d'un coefficient de sécurité égal à 0.93. Lorsque la nappe se rabat à 6 m de profondeur, la stabilité reste toujours précaire car le coefficient de sécurité est compris entre $0.95 \leq Fs \leq 1.07$. Dés qu'elle atteint les 9 m de profondeur, le versant acquiert une certaine stabilité avec Fs=1.2 ; et si elle se rabat à 12 m, cette stabilité est totalement assurée avec Fs=1.42.

IV-2-7.Cas dynamique avec une surcharge

Pour connaître les territoires les plus exposés (zones à risque) et pouvoir réduire la vulnérabilité des populations et des biens existants, les autorités locales utilisent une réglementation qui tient compte des risques naturels (aléas, enjeux, vulnérabilité).Par contre, les extensions urbaines, surtout dans les quartiers non préalablement aménagés et s'aventurant sur des terrains dont la stabilité est par endroit précaire, sont sous la menace permanente d'un glissement.

Dans le cas de l'effet de la surcharge, quatre calculs ont été lancés en faisant varier la nappe à chaque fois de 3m de profondeur et en maintenant cette surcharge égale à 10 KN/m.

IV-2-7-1.Nappe en surface

L'application d'une surcharge de 10 KN/m au pied du versant avec une excitation de 0.34g à la base a permis non seulement de détecter la zone la plus sensible en terme d'instabilité mais aussi la couche où le choc n'est pas amorti mais amplifié.

Les résultats obtenus montrent l'influence de la surcharge due à l'urbanisation sur la réponse dynamique du versant du centre-ville de Tigzirt. Le déplacement maximal obtenu avec cette configuration est de l'ordre de 12.92 m (Fig. 28). Ce déplacement est six fois plus élevé par

rapport au déplacement trouvé sans application d'une surcharge et sans excitation sismique. Une amplification du mouvement sismique a été observée au niveau de la couche d'argile remaniée (fig. 30) avec une réponse du sol en accélération maximale d'environ 0,58 g, alors qu'il y a eu désamplification du signal sismique de 0.14g lors de l'application de la même excitation sismique sans surcharge et avec nappe au niveau du terrain naturel.

Les zones de plasticité engendrées par ces deux effets ont accentué et aggravé le mouvement (fig. 29). En effet, la zone remaniée prend de l'ampleur en sa frange d'altération en s'élargissant, ainsi que la contrainte maximale est observée sous la surcharge, avec un effet global tout le long du versant mobilisé.

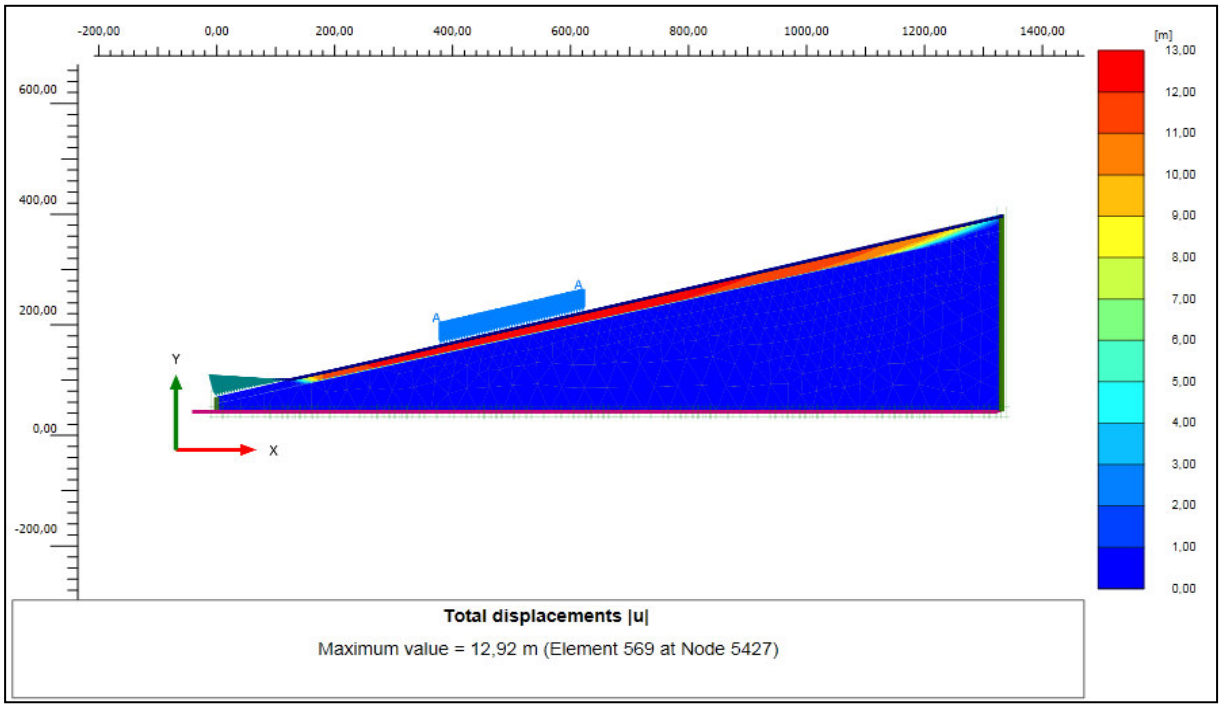


Figure 28 : Champs de déplacements totaux ‖U‖=12.92m sous l'effet d'urbanisation et excitation sismique.

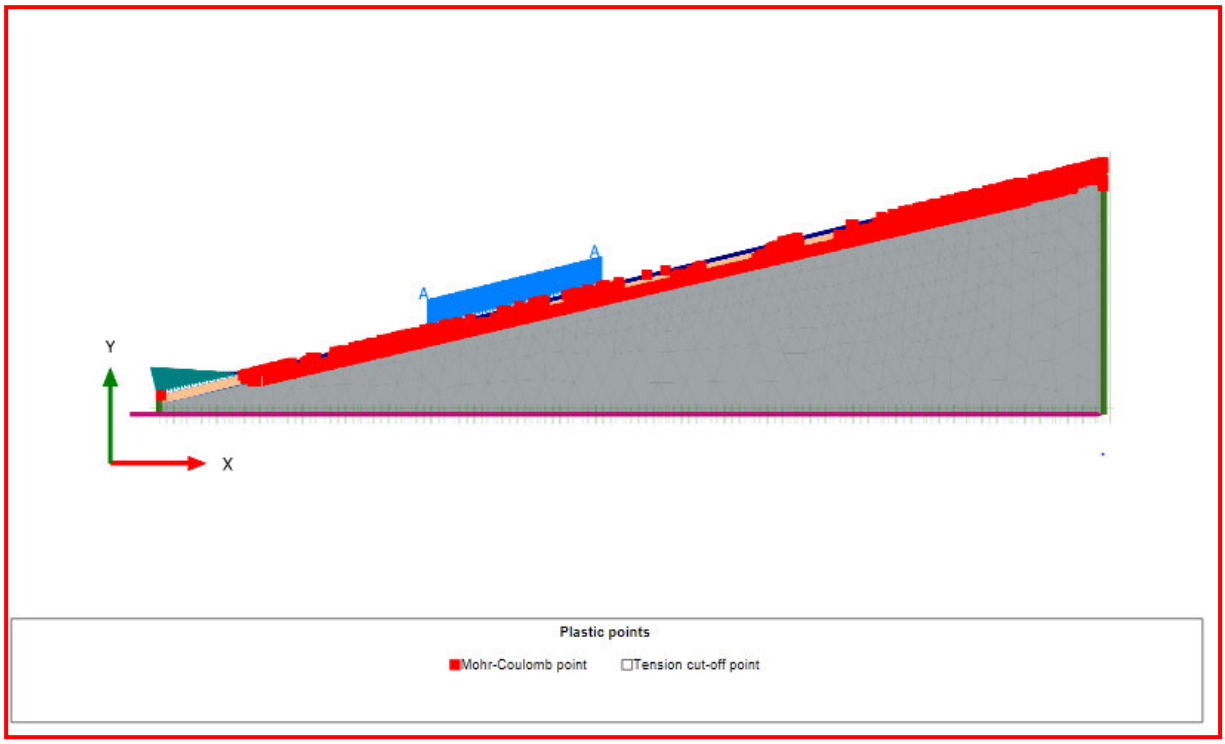


Figure 29 : Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas d'une nappe au niveau du terrain naturel et sous l'effet d'une surcharge et une excitation sismique.

Avec l'application uniquement du chargement sismique, la couche remaniée s'est localisée au niveau du sommet et on a remarqué une accentuation du remaniement au niveau du pied. Par contre, avec l'effet de la surcharge, une nouvelle zone s'est développée et l'ampleur du remaniement s'est accentué et a rendu le versant facilement mobilisable. Le coefficient de sécurité obtenu est de 0,93 (fig. 31) et prouve l'instabilité de ce versant. Il est à noter que dans ce cas, l'effet de site a amplifié l'excitation sismique jusqu'à 0.58g.

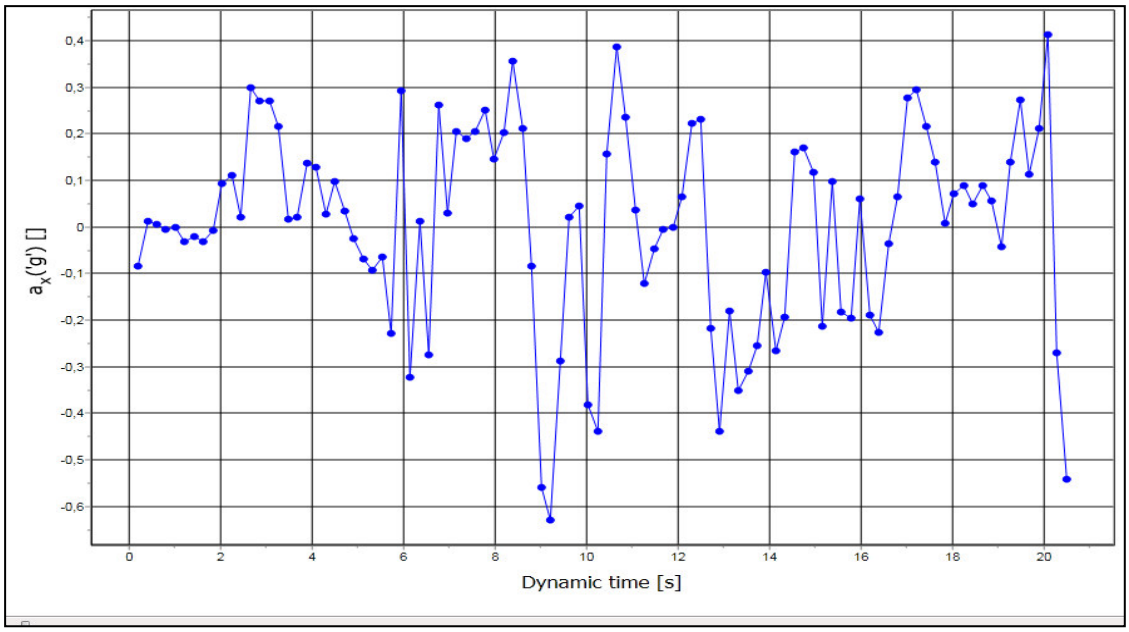


Figure 30 : Amplification du signal sismique au niveau de la couche remaniée en-dessous de la surcharge.

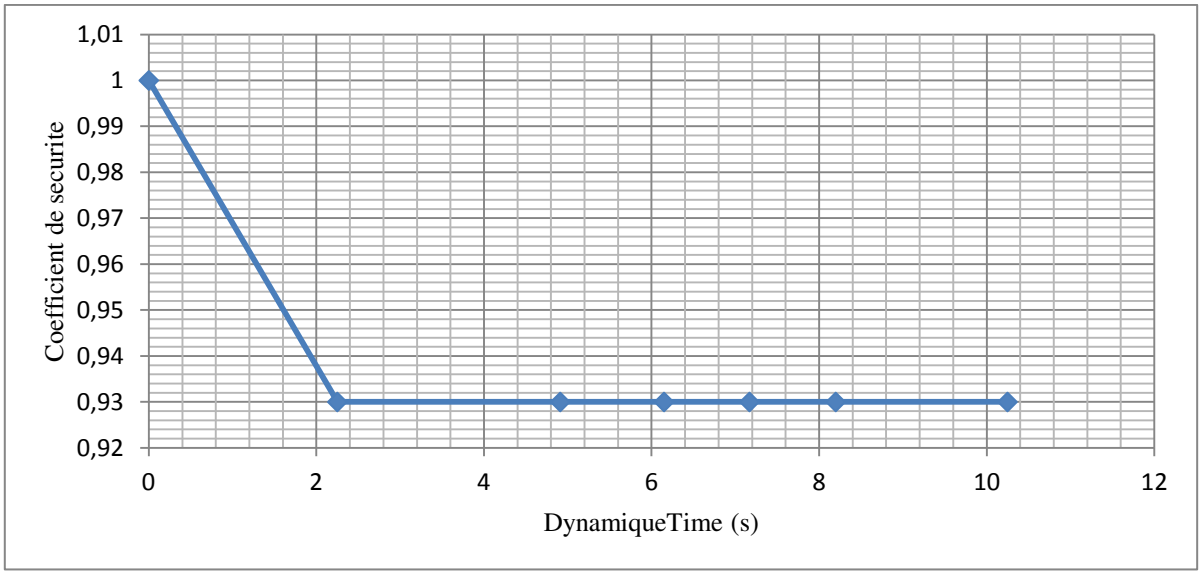


Figure 31: Courbe de variation du coefficient de sécurité sous l'effet d'une surcharge et d'un séisme a une nappe qui affleure le niveau du terrain naturel.

IV-2-7-2.Nappe à 6m de profondeur

Le calcul dynamique est mené sur le versant de Tigzirt avec une même surcharge de 10 KN/m et une nappe à 6m de profondeur. Les résultats obtenus sont portés sur les figures 32, 33 et 34.

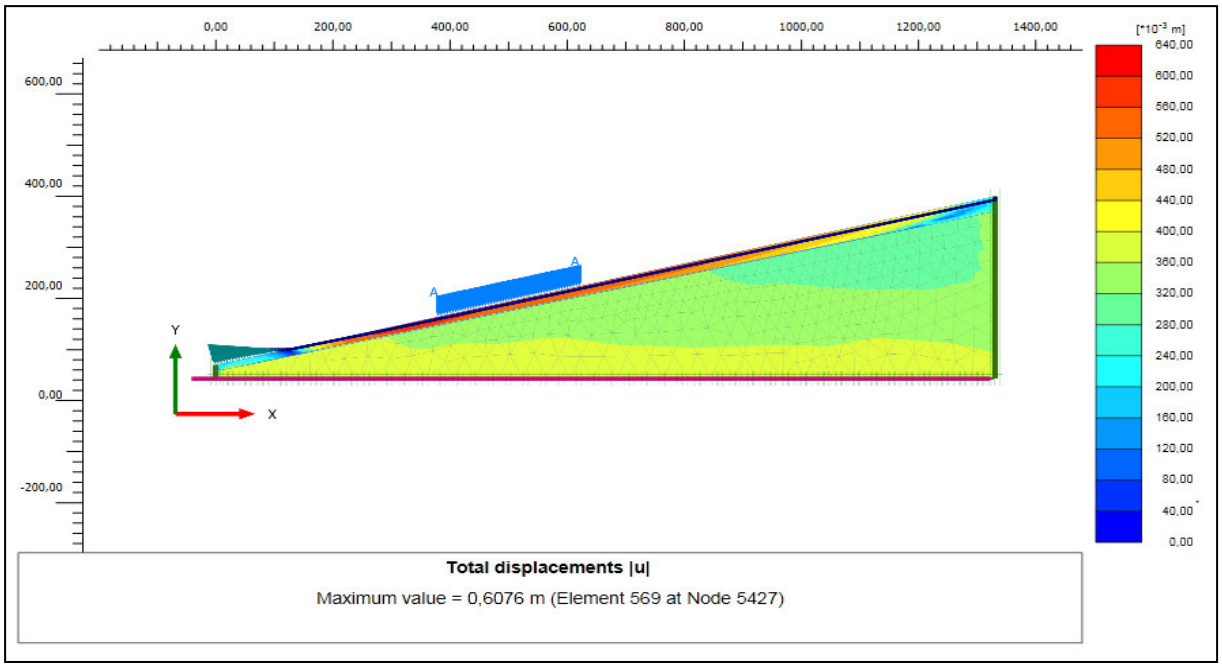


Figure 32 : Champs de déplacements‖U‖=0.6067m du versant sous l'effet d'excitation sismique et une nappe à 6m de profondeur avec surcharge.

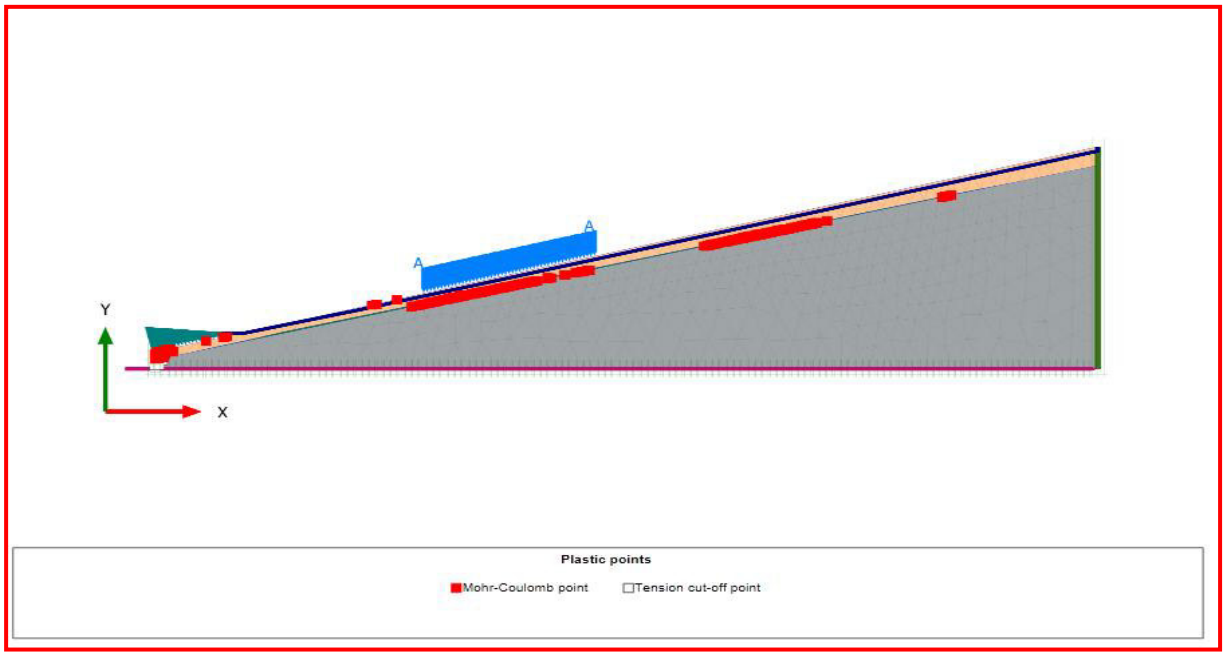


Figure 33: Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas d'une nappe à 6m de profondeur et sous l'effet d'une surcharge et une excitation sismique.

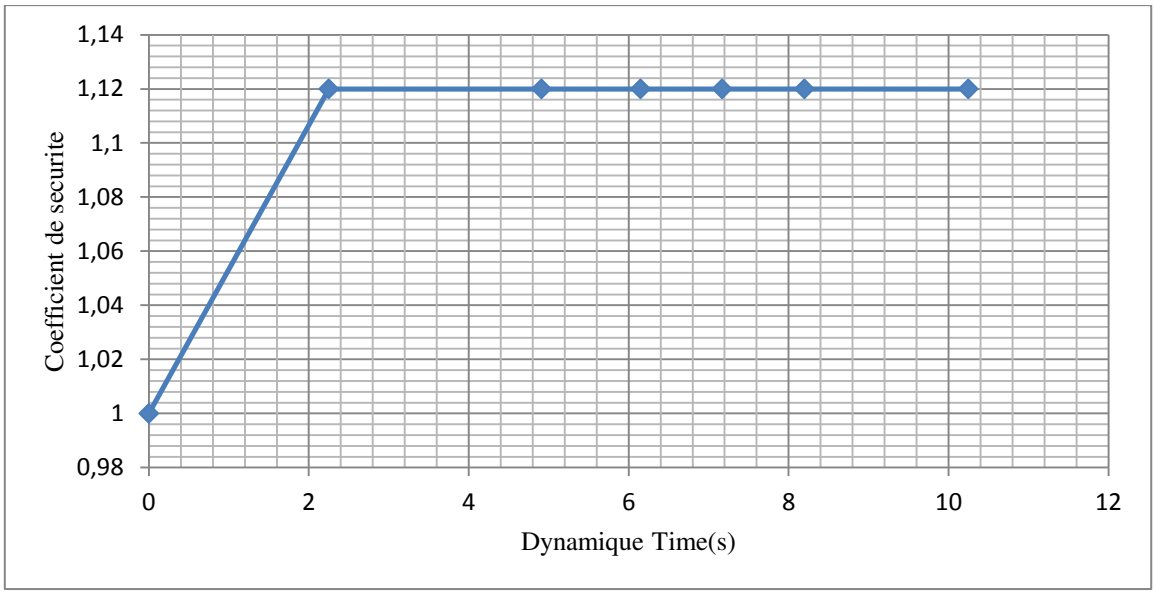


Figure 34: Courbe de variation du coefficient de sécurité sous l'effet d'une surcharge et d'un séisme.

Le taux de déplacement diminue de l'ordre de 95% par-rapport au cas dynamique avec une nappe en surface. Le coefficient de sécurité obtenu est de 1.12 ; ce qui montre que le versant est en état de stabilité précaire. Par contre, ce taux de déplacement augmente de l'ordre de 61% par rapport au cas dynamique sans surcharge ; ce qui reflète le danger auquel le versant de Tigzirt urbanisé est soumis. La nappe joue donc un rôle prépondérant car elle fragilise le versant en lui introduisant un effort moteur.

Le cas le plus défavorable est le versant présentant la nappe en surface avec un taux de déplacement estimé à 20 fois celui de la nappe située à 6m de profondeur. Cette instabilité est accentuée avec l'effet de la surcharge. Les contraintes appliquées sous l'effet de cette surcharge ont accentuées surtout au niveau du milieu du Profil (la partie amont du profil où l'urbanisation s'est focalisée particulièrement sous la RN24), ainsi qu'au pied du versant.

IV-2-7-4.Nappe à 9m de profondeur

En considérant la nappe à 9 m de profondeur et en maintenant la charge d'urbanisation égale à 10 KN/m, les résultats obtenus sont portés sur les figures 35, 36 et 37.

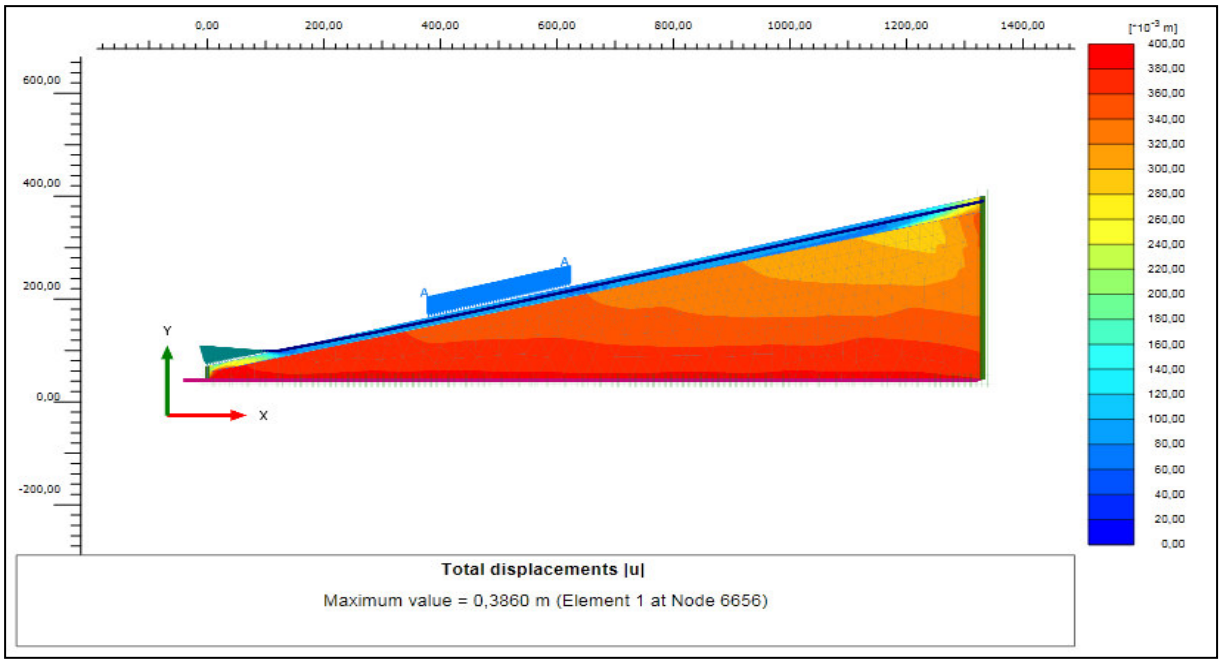


Figure 35: Champs de déplacements‖U‖=0.386m du versant sous l'effet d'excitation sismique et une nappe à 6m de profondeur avec surcharge.

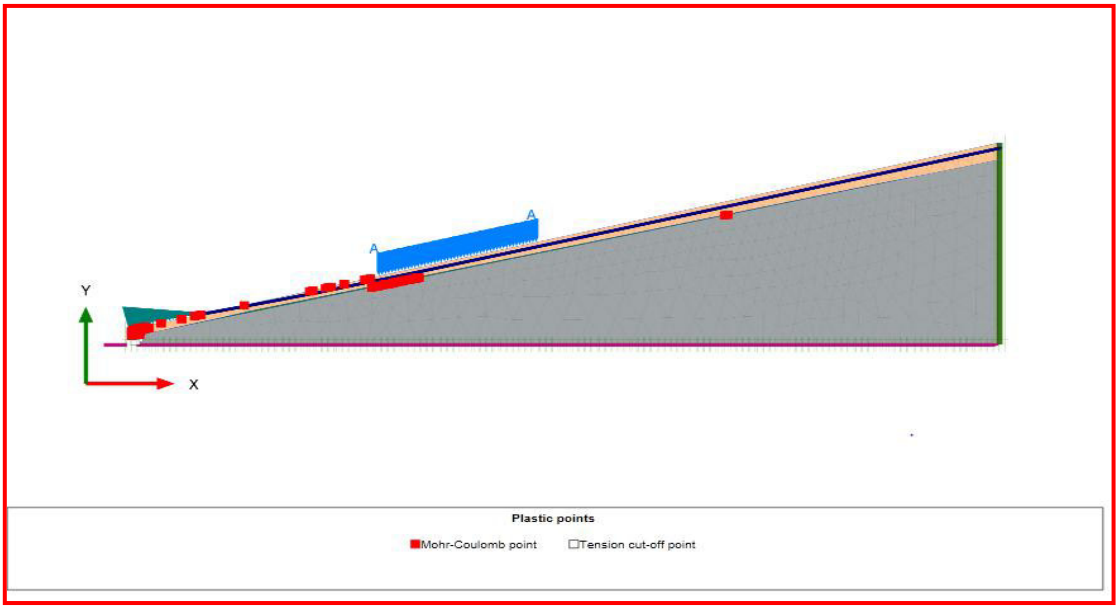


Figure 36: Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas d'une nappe à 9m de profondeur et sous l'effet d'une surcharge et une excitation sismique.

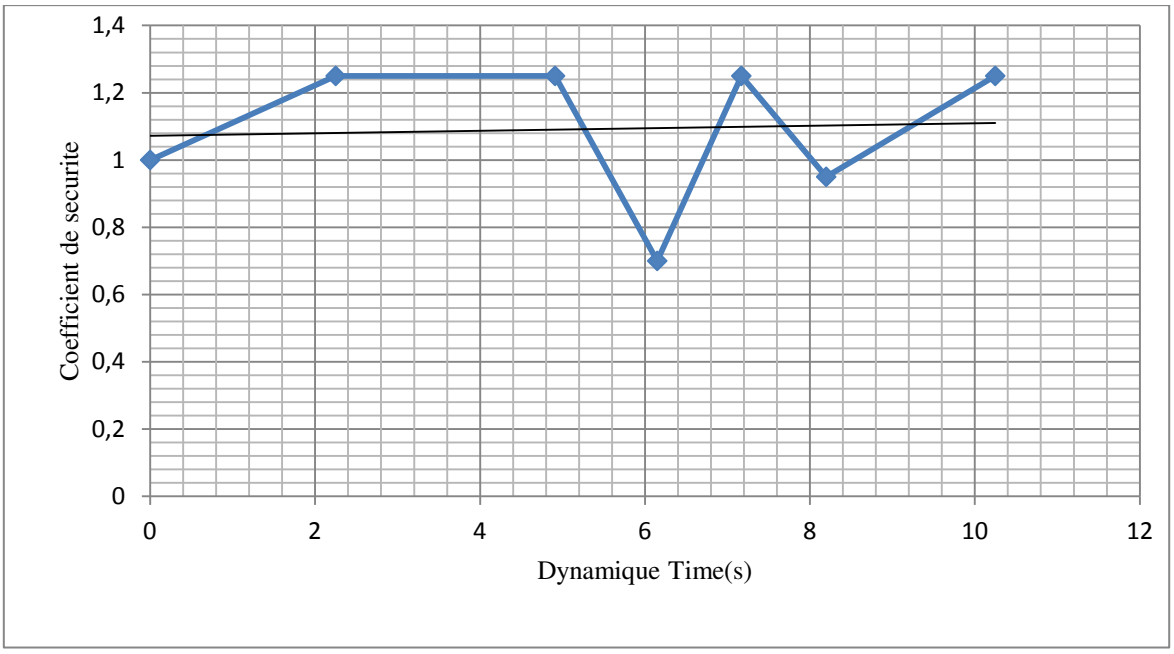


Figure 37 : Courbe de variation du coefficient de sécurité sous l'effet d'une surcharge et d'un séisme pour une nappe de profondeur 9m.

Le taux de déplacements diminue de 36% par-rapport au cas dynamique avec surcharge et nappe à 6m de profondeur. Par contre, ce taux augmente de 4% dans le cas dynamique sans surcharge. Donc, l'effet de la surcharge varie en fonction de la position de la nappe et cet effet est accentué lorsque la nappe est proche de la surface. Le coefficient de sécurité obtenu varie de $0.65 \leq Fs \leq 1.3$ (fig. 37) ; le versant ne gagnera pas une stabilité certaine comme dans le cas dynamique sans surcharge à 9m de profondeur où $Fs = 1.2$; donc la couche savon sera plus sollicitée sous l'effet des surcharges.

IV-2-7-5.Nappe à 12m de profondeur

Dans ce cas, la stabilité du versant est analysée pour une nappe à 12 m de profondeur avec une même charge d'urbanisation. Les résultats obtenus sont portés sur les figures 38, 39 et 40.

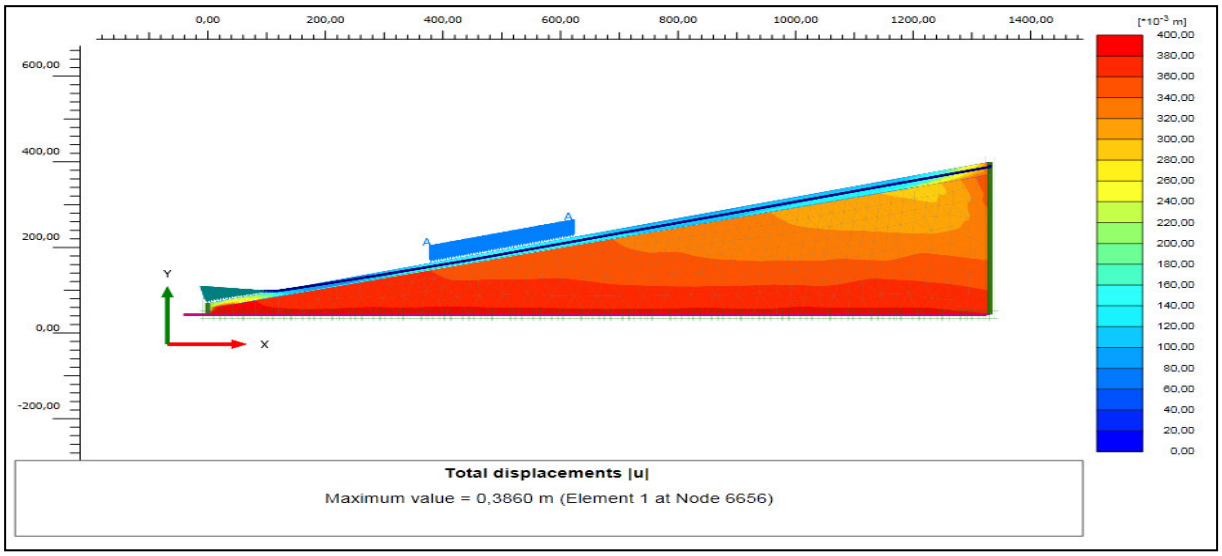


Figure 38 : Champs de déplacements‖U‖=0.386m du versant sous l'effet d'excitation sismique et d'une nappe à 12m de profondeur.

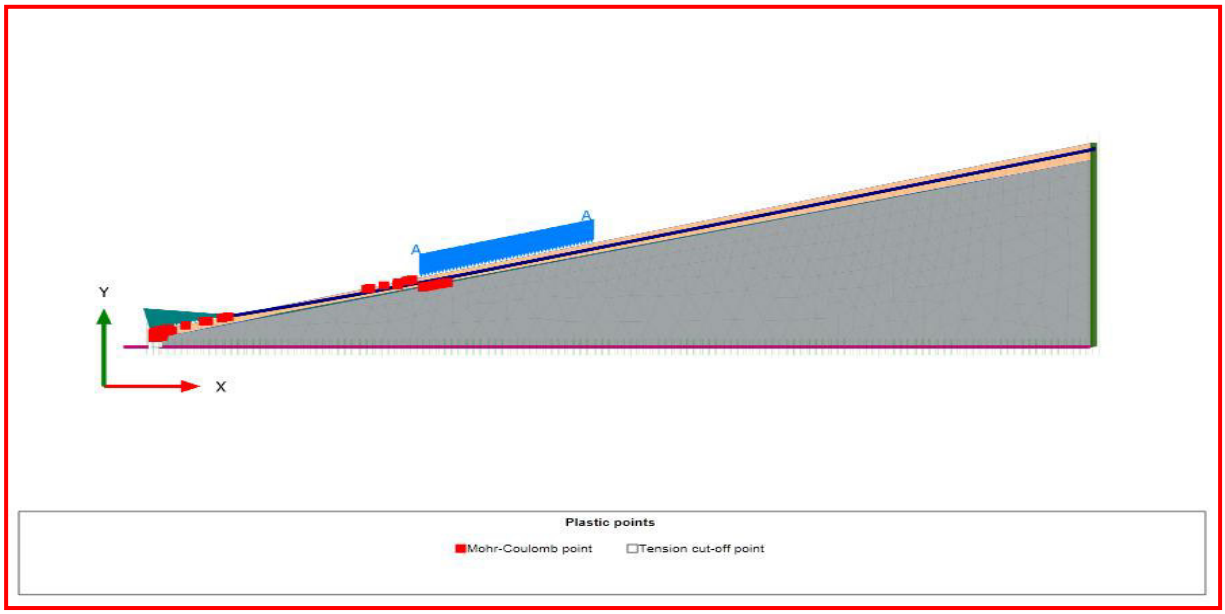


Figure 39 : Localisation des zones plastifiées du versant pour le cas d'une nappe à 12m de profondeur et sous l'effet d'une surcharge et une excitation sismique.

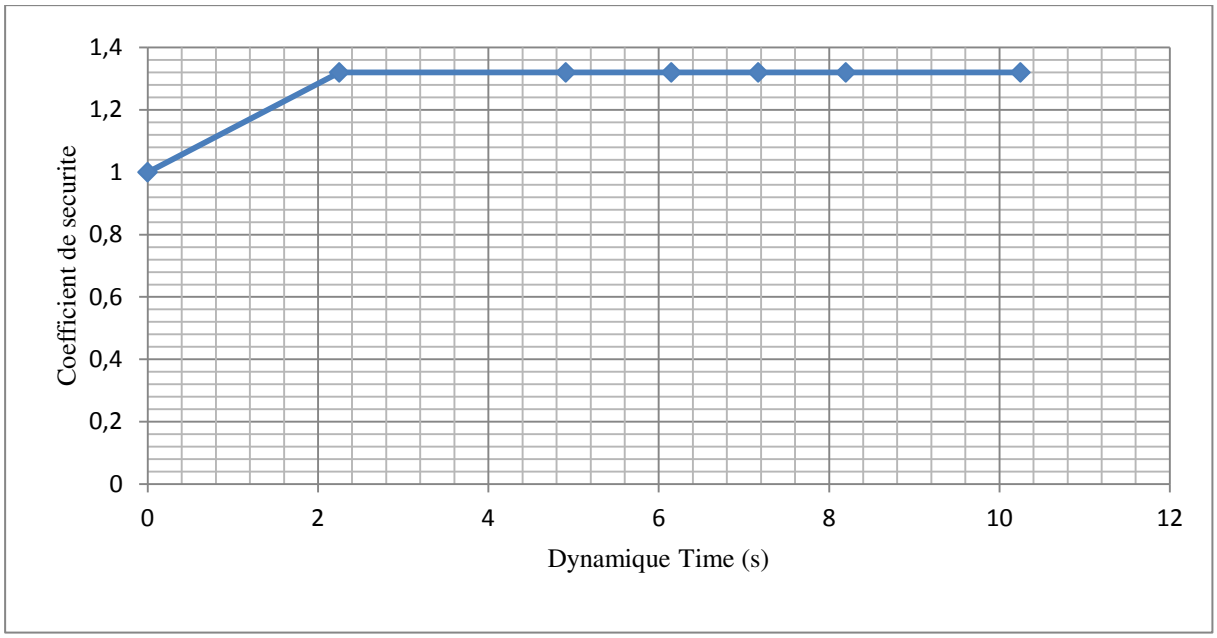


Figure 40 : Courbe de variation du coefficient de sécurité sous l'effet d'une surcharge et d'un séisme pour une nappe de profondeur de 12 m.

Dans ce cas (fig. 38), le déplacement (0,386 m) n'a subi aucune variation par-rapport au cas dynamique avec surcharge et nappe à 9 m de profondeur. Nous pouvons donc conclure qu'au-delà de 9 m de profondeur, l'effet combiné de la nappe et de la surcharge n'influe pas sur le taux de déplacement. Par contre, le coefficient de sécurité obtenu est de 1,3 (fig. 40), a permis au versant d'atteindre sa stabilité. Ceci n'est pas le cas lorsque la nappe est à 9 m de profondeur où la stabilité n'est pas certaine. La zone de remaniement se focalise au niveau de la partie amont sous la surcharge jusqu'au pied (fig. 39), qui diffère de peu par rapport au cas dynamique sans surcharge qui a touché seulement le pied.

IV-3. Synthèse des résultats

Le versant de Tigzirt, pour ce cas de figure, est soumis à une excitation sismique et une surcharge tout en faisant varier le niveau de la nappe. Le taux de déplacement varie en fonction du niveau de la nappe et a atteint une valeur maximale de 12,92 m pour la nappe au niveau du terrain naturel. Lorsque la nappe se rabat à 6m de profondeur, on constate une grande diminution du taux de déplacement qui est de 95%et qui est considérable lorsque le versant n'est pas soumis à une surcharge. Lorsque cette nappe est à 9m de profondeur, ce taux de déplacement diminue davantage. Mais, dès que cette nappe dépasse les 9m de profondeur, ce taux de déplacement reste inchangé et donc ne dépend plus de la profondeur de la nappe.

Les calculs montrent que ce versant se mobilise sur une couche plane remaniée. Son degré de remaniement varie en fonction du niveau de la nappe. Il est à son maximum lorsque la nappe

est en surface. Les instabilités se localisent au sommet par des zones d'arrachements, au pied et sous la surcharge. A 6m de profondeur, le remaniement est moins important et ne touche que peu le sommet. A 9m de profondeur, la zone remaniée se localise sous la surcharge et au pied. Dès que la nappe est au-dessous de ce niveau, elle n'a plus d'influence sur la zone de remaniement. La progression du remaniement est assez nette lorsque le versant n'est soumis qu'au séisme.

La stabilité du versant dépend donc de la nappe, du chargement sismique et de la surcharge (urbanisation du versant de Tigzirt). Lorsque le versant est surchargé et soumis à un séisme avec la nappe en surface, le coefficient de sécurité représentant l'instabilité du versant est de Fs=0.93. Si la nappe est à 6m de profondeur, le versant est dans un état de stabilité précaire avec Fs=1.12, et lorsque la nappe est à 9m de profondeur, le coefficient de sécurité est compris entre $0.5 \leq Fs \leq 1.2$. Le versant ne se stabilise que lorsque la nappe atteint 12m de profondeur avec un Fs=1,3.

V-CONCLUSION

Trois paramètres prépondérant sont influencé la stabilité du glissement de Tigzirt : la nappe d'eau, la surcharge qui est due à l'urbanisation et le séisme. La variation de ces trois paramètres permet de passer d'une instabilité à une stabilité précaire puis à une stabilité totale.

Le calcul dynamique est mis en évidence par l'effet de séisme. L'instabilité du versant par le calcul dynamique est accélérée de 47% lorsque la nappe est sub-affleurante par rapport au cas statique. Les taux de déformations se localisent, dans ce cas, tout le long du versant et qui s'accentuent dans les zones d'arrachements au niveau du sommet et au niveau du pied. Cette nappe sub-affleurante acquière au versant une instabilité à elle seule. En l'associant au séisme, les déplacements augmentent de 50% environ.

Le rabattement de la nappe n'acquière pas forcément une stabilité définitive au versant mais elle lui donne une certaine stabilité précaire qui peut basculer d'un état le plus défavorable (nappe en surface) à un état de stabilité lorsque la nappe est au-delà de 9 m de profondeur.

Lorsque le versant est soumis à une surcharge avec une nappe sub-affleurante, le déplacement du versant est de 1.96m, alors qu'il est de 1,14 dans le cas statique sans surcharge ; ce qui montre que l'instabilité du versant s'accentue avec la présence de l'urbanisation, ceci reflète les arrachements en tête du versant.

Dans le cas d'une action combinée (surcharge + séisme) sur le versant, ce dernier se mobilise davantage, surtout lorsque la nappe est sub-affleurante où le taux de déplacements augmente de 84% et la zone remaniée s'élargit sur tout le long du versant. Lorsque la nappe se rabat à 6m de profondeur, le mécanisme de rupture est focalisé surtout au niveau du pied du versant jusqu'à la partie aval de l'application de la surcharge. Lorsque la nappe est au-delà de 9 m de profondeur, le mécanisme de rupture est focalisé seulement au pied du versant.

CONCLUSION GENERALE

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 aux agressions soit naturels climatologiques ou physico-chimiques sont des paramètres fondamentaux, plus ou moins constants sur de longues périodes ; ils déterminent la prédisposition générale du terrain aux phénomènes d'instabilité. La région de Tizi-Ouzou est une région montagneuse où les glissements de terrains sont répandus, particulièrement ces dernières années. A ce titre, Tigzirt petite ville côtière présente un versant instable pour lequel le mouvement de masses et son étendue sont importants. De surcroît la présence d'enjeux socio-économiques marquants rend difficile la résolution des problèmes posés par ce glissement. Cette instabilité, connue depuis l'année 1977, présente plusieurs réactivations survenues suite aux intempéries de [1999 ; 2002 ; 2009 ; 2011 ; 2012]. Elle se manifeste essentiellement sur la zone centrale mettant en évidences trois formations géologiques : une couche de remblais, une couche d'éboulis composée d'une matrice argileuse contenant des blocs de Grès ; cette couche assurant le rôle de frange lubrifiante, favorise le glissement des éboulis sur le toit de la marne. Plusieurs indices morphologiques typiques y sont observés depuis de nombreuses années. Les causes de l'instabilité sont diverses, mais les variations du niveau piézométrique, l'érosion marine et la nature des terrains restent les facteurs les plus influents.

Les études réalisés par le LNHC et Géomica nous ont servi de base de données et ont révélé que les paramètres C'et ϕ' à prendre en compte dans les calculs de stabilité, le long de la surface de glissement, sont proches des caractéristiques résiduelles, et ils varient en fonction du niveau de la nappe et de la profondeur du versant. Vu l'ampleur du glissement et les grandes variations des caractéristiques mécaniques, il est assez difficile de cerner le mécanisme du déclenchement de ce dernier et son évolution dans le temps. Afin de palier à ce manque de données et à la complexité des causes du mouvement, un Système d'Information géographique a été mis au point. Il a permis une bonne appréciation des conditions hydriques et géomorphologiques du glissement ainsi que la détermination de la surface instable et des mécanismes du mouvement.

Un profil géologique a été défini pour ce versant en exploitant les résultats des analyses spatiales des données. Une modélisation numérique du versant a été ensuite réalisée à l'aide du logiciel d'éléments finis PLAXIS^{2D} avec la prise en compte de l'effet du niveau de la nappe, de la charge d'urbanisation et de l'activité sismique sur la stabilité du site. Les études effectuées montrent l'importante influence des facteurs hydriques sur l'activité du mouvement et sur le coefficient de sécurité.

En effet, les résultats de l'analyse numérique sous sollicitations statiques montrent que la déformation du versant obtenue par modélisation aux éléments finis est en bon accord avec les indices morphologiques observés sur le terrain. Le rabattement de la nappe (d'une profondeur d'environ 12 m) pendant les périodes estivales permet d'augmenter significativement le coefficient de sécurité et diminue considérablement les déplacements, mais reste insuffisant pour assurer la stabilité totale du site.

En outre, les résultats de l'analyse numérique sous sollicitations dynamiques ont montré que le versant de la région de Tigzirt est fortement influencé par le niveau de la nappe, l'urbanisation et l'activité sismique. En effet, pour une nappe en surface, une amplification importante du signal sismique est observée pour le calcul au niveau de la zone remaniée du versant. Ainsi, les zones de plasticité engendrées par ces trois effets ont accentué et aggravé le mouvement et la zone remaniée s'est élargie. Les déplacements enregistrés sont maximaux lorsque la nappe est en surface. Lorsque le niveau de la nappe baisse, on enregistre une diminution non négligeable du taux de déplacement qui se stabilise lorsque la nappe atteint 9m. Ainsi le degré de remaniement de la couche savon (zone remaniée) varie en fonction de la variation du niveau de la nappe.

En comparant la stabilité du versant sous les deux sollicitations statique et dynamique, les résultats ont montré que l'instabilité du versant par le calcul dynamique est accélérée de 47% lorsque la nappe est sub-affleurante par rapport au cas statique et Les déplacements augmentent de 50% environ par rapport au cas statique. Ces déplacements sont six fois plus élevés par rapport au déplacement trouvé sans application d'une surcharge et sans excitation sismique.

La stabilisation du glissement de terrain nécessiterait le renforcement de sa surveillance et la mise en œuvre d'un système de drainage superficiel et profond, visant un rabattement de la nappe jusqu'à une profondeur suffisante pour assurer la stabilité (environ 12 m de profondeur sur toute l'étendue du glissement), ainsi que la réalisation d'ouvrages en enrochement pour la protection du pied du versant contre l'érosion marine.

Perspectives

Plusieurs recommandations peuvent être émises afin de permettre de mieux délimiter les zones instables et les positions des plans de rupture :

- la réalisation d'une reconnaissance géologique et géotechnique complémentaire qui englobera toutes les zones de la ville affectées par ces mouvements ;
- la réalisation d'un suivi régulier des mouvements du versant ;
- l'implantation de stations météorologiques dans les zones de glissement ;
- l'installation de sondages piézométriques et inclinométriques qui permettront l'analyse de l'évolution du mouvement en fonction des fluctuations de la nappe.
- Diminuer l'effet de houle sur le versant qui accentue l'érosion en amont et qui supprime l'effet de butée du profil.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- **ABACHA.I., (2015),** Étude de la sismicité de la région nord-est de l'Algérie. Thèse de doctorat en sismologie, Université Ferhat Abbas-Sétif (Algérie).
- **AMIRECHE H. (2001),** L'eau**,** le substrat**,** la tectonique et l'anthropisation dans les processus érosifs du tell nord**-**constantinois**.** Thèse de doctorat d'Etat**,** Université Mentouri de Constantine**.**
- **AMIRECHE H., (2005,** Croissance urbaine et vulnérabilité du site dans l'Est algérien : cas de la ville de Constantine. Revue sciences humaines n°24, pp. 75-80.
- **ARONOFF S., (1989)**, Geographical Information systems: a management perspective. Book reviews (Ottawa: WDL Publications, 1989).
- **ASHOK. K. CHUG (1982)**. Slope stability analysis for earthquakes. International journal for numerical and analytical methods in Geomechanics. Vol. 6, issue 3, p. 307-322.
- **AVENARD J.M., (1962),** La solifluxion ou quelques méthodes de mécanique des sols appliquées au problème géomorphologique des versants. Mémoire de la revue de Géomorphologie dynamique, n° 1, Édition. Sedes, Paris, 164 p.
- **AYADI K., BOUTIBA M., (2012),** L'érosion côtière un mal qui ronge la côte sableuse entre Zeralda et Douaouda-Marine (Ouest d'Alger). 1er Séminaire National sur les Géorisques, 4 et 5 décembre 2012, Jijel, Algérie, pp 140–150.
- **AYADI A., DORBATH C., OUSADOU F., MAOUCHE S., CHIKH M., BOUNIF M. A., and MEGHRAOUI M., (2008),** Zemmouri earthquake rupture zone Mw=6;8, Algéria: Aftershocks sequence relocation and 3D velocity model. Journal of geophysical research, Vol. 113, B09301.
- **BELDJOUDI H., KHERROUBI A., GUEMACHE M.A., SEMMANE F., HANED A., YELLES-CHAOUCHE K., DJELLIT H., HANED S.A., DERAMCHI A., (2006),** The Laâlam (Béjaïa, North-East Algeria) moderate earthquake of March 20th, 2006 (Ml:5.8). First European conference on earthquake engineering and seismology, Geneva, Switzerland, abstracts volume, p 152, September 2006.
- **BELDJOUDI H., (2011),** Etude de la sismicité du Nord Algérien. Thèse de doctorat en géophysique de l'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen
- **BELABBES S., (2008),** Caractérisation de la déformation active par l'Interférométrie Radar (InSAR) : Failles sismiques aveugles et cachées de l'Atlas Tellien (Algérie) et du Rif (Maroc) le long de la limite des plaques Afrique-Eurasie. Thèse de doctorat de l'Université Louis Pasteur-Strasbourg I (France**)**
- **BELABBES S., WICKS C., ZIYADIN C.A. and MEGHRAOUI M., (2009),** Rupture parameters of the 2003 Zemmouri (Mw 6.8), Algeria, earthquake from joint inversion of interferometric synthetic aperture radar, coastal uplift, and GPS. Journal of geophysical research, vol.114.
- **BELHABIB D., PAULY D., HARPER S. and ZELLER D., (2013),** Reconstruction of marine fisheries catches for Algeria, 1950-2010.
- **BELHADJ-MOSTEFA S., (2007),** Analyse expérimentale de la distribution des contraintes dynamiques à l'interface sol-fondation. Thèse de doctorat d'Etat de l'Université Mentouri de Constantine.

- **BENAISSA A., (1989)** Contribution à l'étude des mouvements de terrain de la région de Constantine (Algérie), Institut de Recherche de Géologie Appliquée de l'université Joseph-Fourier - Grenoble I, 1989.
- **BERTHOUMIEUX JUNIOR J., (2012),** Etude pluridisciplinaire de la stabilité des pentes, Application au glissement de Kenscoff-Mahotière (Haiti).Thèse de docteur en sciences de l'ingénieur, Ecole polytechnique de Louvain.
- **BHAT D.R., BHANDERY N.P., YATABE R., (2013),** Experimental study of strength recovery from residual strength on kaolin clay. Int. J Civil Archit. Sci. Eng. 7(1):1338–1344**.**
- **BIRCH G., WARREN C., (2006),**Technical developments in the monitoring of the Folkestone Warren landslide complex. IAEG2006, Paper number 78.
- **BISHOP, A.W., (1955),** "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes", Geotechnique, Vol. 5, pp 7 - 17.
- **BJERRUM L. and SIMONS N.E., (1960),** Comparison of shear strength characteristics of normaly consolidation clays. Proc ASCE Research conf on shear strength of cohesive soils, boulder, pp.711-726.
- **BLIVET JC (1993),** Note Technique—Suivi d'un versant instable à Sainte-Adresse., Revue Française de Géotechnique, N °64, pp 63–65.
- **BOSSIERE G, RAYMOND D (1984),** Carte géologique de Tizi-Ouzou/Dellys au 1/50000e (2e édition). Service Géologique National, Alger.
- **SAHI M., et BOUAICHA M., (2003),** La pêche artisanale en Algérie. FAO Copemed.
- **BOUAKLIBNE S, BOUTIBA M, GUETTOUCHE M (2012),** Érosion de la côte Ouest d'Alger: Diagnostic et mesures GPS., 1er Séminaire National sur les Géorisques, 4 et 5 décembre 2012, Jijel, Algérie, pp 151–158.
- **BOUAZIZ N., MELBOUCI B. (2013),** les mouvements de terrain en grande Kabylie, cas de la coulée boueuse d'Illilten. Séminaire international sur l'hydrogéologie et l'environnement 5–7 Novembre 2013, Ouargla (Algérie).
- **BOUDIAF A., RITZ J. F., PHILIP H. (1998),** Drainage diversions as evidence of propagating active faults: example of the El Asnam and Thenia fault, Algeria. Terra Nova 10: 236–244.
- **BOUDIAF A., PHILLIP H., COUTELLE A. et RITZ J.F. (1999),** Découverte d'un chevauchement d'âge Quaternaire au sud de la Grande Kabylie (Algérie). *Geodinamica Acta*, vol. 12, n° 2, p. 71-80.
- **BOUHEDJA S., El KECHEBOUR B. and BOUKHALED A. (2015),** Behavior of Buildings in Reinforced Concrete During an Earthquake. Engineering Geology for Society and Territory-Volume 8, Springer.
- **BOURDEAU C., (2005),** Effets de sites et mouvement de versant en zones sismiques : Apport de la modélisation numérique. Thèse de doctorat de l'école des mines de Paris, spécialité « géologie de l'ingénieur », 290 pages**.**
- **BOUTIBA M., DJOUDER F., SEMAOUNE A. (2012),** Évaluation de la vulnérabilité de la côte Ouest du golfe de Béjaia (Algérie centrale) à l'élévation du niveau de la mer., 1er Séminaire National sur les Géorisques, 4 et 5 décembre 2012, Jijel, Algérie, pp 159–165.
- **BELMOUDEN Y., and LESTTUZZI P., (2006),** Evaluation de la vulnerabilté des bâtiments existants en Suisse. Rapport de recherche.de l'école Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)-IMAC.
- **CAIRE A., (1954),** L'Atlas tellien méridional entre la chaîne du Djurdjura et la partie

occidentale des Monts du Hodna (Algérie). Annales scientifiques de l'Université de Besançon, France 2:35–82.

- **CALAIS E., DE METS C., NOCQUET J.M., (2003),** Evidence for a post-3,16 - Ma change in Nubia–Eurasia–NorthAmerica plate motions, Earth Planet Sci. Lett. 216:81–92.
- **CHACON, J., IRIGARAY, C., FERNANDEZ, T., AND EL HAMDOUNI, R. (2006),** Engineering geology maps: landslides and Geographical Information Systems (GIS), Bull. Eng. Geol. Environ., 65, 341–411..
- **CHALHOUB. M. Y., (2006),** Apports des méthodes d'homogénéisation numériques à la classification des massifs rocheux fracturés. Thèse de docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Spécialité 'Géologie de l'Ingénieur'.
- **CLOUGH R. W., and CHOPRA A. K., (1966).** Earthquake Stress analysis in earth dams. Journal of the engineering Mechanics division, ASCE, Vol. 92, N°.EM2.
- **COJEAN R., DURVILLE J. L., GAUCHEZ J., POTHERAT P. (2009),** Glissement de terrain et barrages naturels induits par le séisme du 12 mai 2008 au Sichuan (Chine)- Retour d'expérience. Comité français de géologie de l'ingénieur et de l'environnement- Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer ; Décembre 2009.
- **CUVILLIER A., MROUEH H., et VAN LAETHEM F., (2004),** Modélisation numérique du recul de falaises argileuses. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lille 2004 (28 - 30 juin).
- **DAI F. C., LEE F. C., (2002).** Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. Journal of geomorphology 42, pp. 213-228.
- **DUNCAN, J. M., 1996,** "State of the Art: Limit Equilibrium and Finite Element Analysis of Slopes," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 122 (7); 577-596.
- **DUNCAN, J. M., WRIGHT S. G., (2005),** Soil strength and slope stability. John Wiley and Sons Inc. Hoboken, New Jersey.
- **DEL GAUDIO, V., and WASOWSKI J. (2007),** Directivity of slope dynamic response to seismic shaking, Analysis Geophysical Research Letters, 34, L12, 301.
- **DELOUIS B., VALLEE M., MEGHRAOUI M., CALAIS E., MAOUCHE S., LAMMALI K., MAHSAS A., BRIOLE P., BENHAMOUDA F., and YELLES K., (2004),** Slip distribution of the 2003 Boumerdes-Zemmouri earthquake, Algeria, from teleseismic, GPS, and coastal uplift data. geophysical research letters, vol. 31, l1860
- **DEVERCHERE J., YELLES K., DOMZIG A., MERCIER DE LEPINAY B., BOUILLIN J.P., GAULLIER V., BRACENE R., CALAIS E., SAVOYE B., KHERROUBI A., LE ROY P., PAUC H., AND DAN G., (2005).** Active thrust faulting offshore Boumerdes, Algeria and its relations to the 2003 Mw 6.9 earthquake. Geophysical Research Letters, 32, L04311.
- **DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROT L., IBSENM L., (1996),** Landslide recognition: identification, movement and courses. Report no 1, Euro-pean Commission Environment Program, John Wiley and Sons, 1996,247 p.
- **DJERBAL L., MELBOUCI B., (2012),** Le glissement de terrain d'Aïn-El-Hammam: causes et évolution. Bull. Eng. Geol. Environ. 71(3):587–597.
- **DUFFAUT P. (2004)**, Manuel de mécanique des roches. Édit. École des mines de Paris, 459 p.
- **DUNCAN J. M., (1996),** State of the art: limit equilibrium and finite element analysis of slopes. Journal of Geotechnical Engineering, 122(7):577–596.

- **DURVILLE J.L., MENEROUD J.P., (1982),** Phénomènes géomorphologiques induits par le séisme d'El Asnam, Algérie. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées 120:13–23.
- **DURVILLE J.L., SÈVE G., (1996),** Stabilité des pentes—Glissements en terrain meuble, Techniques de l'ingénieur, n°C254.
- **ESPINOZA R. D., REPETTO P. C., and MUHUNTHAN B., (1992),** General framework for stability analysis of slopes. Géotechnique, 42(4):603–615.
- **FARES A., ROLLE M., BROQUET P., (1994),** Méthodologie de la cartographie des risques naturels liés aux mouvements de terrain, (Région de Taounate -Rif, Nord du Maroc). Revue Française De Géotechnique 4e trimestre 1994.
- **FAURE R. M., (2000),** L'évolution des méthodes de calcul en stabilité de pentes Partie I : Méthodes à la rupture. Revue Française de Géotechnique N°99 3e trimestre 2000.
- **FAURE F., (1996)**, An energy based Approach for contact force computation. Journal of Computer graphics forum, Volume15, issue3, p. 357-366.
- **FELLIENIUS W., (1927).** Erdstatische Nerechnungen mit Reibung and Kohansion. Ernst, Berlin, 40pp.
- **FELLIENIUS W.,** (1936). Calculation of the stability of earth dams. In2nd International Congress on Large Dams, volume 4, page 445. Washington D.C.
- **FERNÁNDEZ T., PÉREZ J.L., MOZAS A., CARDENAL J., DELGADO J., El HAMDOUNI R., SPATIAL J., (2006),** Quality of a landslide databases obtained with digital photogrammetry techniques. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B8. Beijing.
- **FINN, W. D. L., K. W. LEE, MAARTMAN, AND R. LO., (1978),**"Cyclic Pore Pressures under Anisotropic Conditions" pp. 457-491 in Proceedings of the ASCE Specialty Conference on Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Volume 1, ASCE, New York.
- **FIORILLO F. (2003),**Geological features and landslide mechanisms of an unstable coastal slope (Petacciato, Italy). Eng. Geol. 67:255–267.
- **FRESSARD M., MAQUAIRE O., THIERY Y., DAVIDSON R., LISSAK C., (2016),** Multi-method characterisation of an active landslide: Case study in the Pays d'Auge plateau (Normandy, France). Publication: geomorphology, Volume 270, p. 22-39, Elsevier.
- **FLAGEOLLET, J. C. (1989**), Les mouvement de terrain et leur prévision Edition Masson, Paris, 224p.
- **GARCIA C., (2011**) – Mountain risk management : integrated people centred early warning system as a risk reduction strategy, Northern Italy*, PhD* dissertation, Università degli Studi di Milano Bicocca, Milan.
- **GEOMECA (2009)**, rapport interne – étude géotechnique du glissement de Tigzirt.
- **GIBO S., EGASHIRA K., OHTSUBO M., NAKAMURA S., (2002),** Strength recovery from residual state in reactivated landslides. Geotechnique 52(9): 683–686.
- **GLADE T., ANDERSON M. G. and CROZIER M., (2005),** The nature of landslide hazard impact. Encyclopedia of earth sciences séries, Chichester: Wiley, pp. 43–74.
- **GOFF J. and De FREITAS C. R., (2016),** Natural hazards in Australasia, Cambridge university press.
- **GRANDJEAN G, BITRI G.A, PENNETIER O. MERIC J.P. et MALET J.P (2006),** Caractérisation de la structure interne et de l'état hydrique de glissements argilo-marneux par tomographie géophysique : l'exemple du glissement-coulée de Super-Sauze. *C. R.*

Geoscience, vol. 338, p. 587-595.

- **GUGLIELMI G., (1995),** Quantitative computed tomography (QCT) and dual X-ray absorptiometry (DXA) in the diagnosis of osteoporosis. Eur. J. Radiol. 1995; 20:185-187.
- **GUILLARD C. (2009)**, Evaluation et cartographie du risque glissement de terrain d'une zone située au Nord de Lisbonne. Mémoire du master « système territoriaux, développement durable et aide à la décision ». Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne (France).
- **GUIROUS L., DJERBAL L., ALIMRINA N., MELBOUCI B., BAHAR R. (2013),** Caractérisation des glissements de terrain de la région de Tizi-Ouzou (Algérie). First International Conference on Landslides Risk, Tabarka, Tunisie, 14–16 mars, pp 117–127.
- **GUZZETTI F. (2003),** Landslide hazard assessment and risk evaluation: limits and prospectives. Mediterranean storms (proceedings of the 4thegsplinius conference held at mallorca, spain, october 2002.
- **GUZZETTI F., CARRARA A., CARDINALI M., PAOLA (1999),** Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology 31pp.181–216.
- **HABIB P., (1984),** les surfaces de glissement en mécanique des sols. Revue Française de Géotechnique, vol. 27, pp. 7-24.
- **HADJ HAÏSSA R., (2013),** Stratégie nationale de gestion intégrée des zones côtières (GIZC) pour l'Algérie. Conférence au Ministère de l'Aménagement du territoire et de l'environnement d'Algérie.
- **HANCOX G. T., PERRIN N. D., and DELLOW G. D., (2002),** Recent studies of historical earthquake-induced landsliding, ground damage, and MM intensity in New Zealand. Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering (1999) , 35(2):59–95, 2002.
- **HARP E.L. et WILSON R. C. (1995),** Shaking intensity thresholds rock falls and slides: evidence from 1987 whittier Norrows and superstition hills earthquakes. Bulletin of the seismology society of America, 85, N°6, pp. 1739-1757.
- **HAVENIK H.B., VANINI M., JONGMANS D. et FACCIOLI E. (2003),** Initiation of earthquake induced slope failure: influence of topographical and other site specific implication effects. Journal of seismology, pp. 397-412.
- **HOEK E., (1987),** Practical rock engineering. Ed. https://www.rocscience.com
- **HUGHES T. P., (1987).** The evolution of large technological systems. MIT Press-Cambridge, Massachusetts, London England
- **HOSEOP M., WONSEOK K. & HANS ENUKWA E. (2016)**, Influence of Cumulative Rainfall on the Occurrence of Landslides in Korea. Journal of Geography and Geology; Vol. 8, No. 2; 2016.
- **JAMBU N. ; (1968),** Slope stability computations. Soil mechanics and foundation engineering report, Technical University of Norway, Trondheim.
- **JIANG G. L., AND J.P.MAGNAN J. P., (1997).** Stability analysis of embankments: comparison of limit analysis with methods of slices, Géotechnique , Volume 47 Issue 4, September 1997, pp. 857-872.
- **KAABECHE T., et MEBRAK A., (2010),** contribution à l'étude des risques naturels (sismique et mouvement de terrain) dans la Wilaya de Sétif. Mémoire de master en géologie, université de Sétif.

- **KEEFER, D. K., (1984),** Landslides caused by earthquake. Bulletin of the Geological Society of America. 95 (4), 406-421.
- **KEEFER, D. K., (2002),** Investigating landslides caused by earthquakes - A historical review. Surveys in Geophysics. 23 (6), 473-510.
- **KEEFER, D. K., (1984),** "Landslide caused by earthquakes". Geological Society of America Bulletin 95. 406-421.
- **KEEFER, D. K., (2002),** "Investigating landslides caused by earthquakes" - a historical review, Surveys in Geophysics, 23, 473-510.
- **KEEFER, D. K., & WILSON, R. C., (1989),** Predicting Earthquake-induced Landslides, with Emphasis on Arid and Semiarid Environments, Inland Geological Society of Southern California Publications, Riverside, California, 2, part 1, pp. 118–149.
- **KHEMISSA M. (2006),** Méthodes d'analyse de la stabilité et techniques de stabilisation des pentes. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - JNGG' 2006 Lyon (France).
- **KHERROUBI, A., DEVERCHERE, J., YELLES, A., MERCIER DE LEPINAY, B., DOMZIG, A., CATTANEO, A., BRACENE, R., GAULLIER, V. AND GRAINDORGE, D., (2009)**, Recent and active deformation pattern off the easternmost algerian margin, western Mediterranean Sea : New evidence for contractional tectonic reactivation, Marine geology, 261, 17-32.
- **KRAMER S. L., (1996),** Geotechnical Earthquake Engineering. University of Washington, Prentice-Hall.
- **KRAMER S. L., and SMITH M. W., (1997),** Modified Newmark model for seismic displacements of compliant slopes. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 123 (7) (1997), pp. 635–644.
- **KYOJI S., CANUTI P. (2009),** Landslides - disaster risk reduction. Springer, Berlin International consortium on landslides.
- **LA MISSION AFPS., (2003),** Le séisme du 21 mai 2003 en Algérie. 6ème colloque national, organisée avec le concours du ministère de l'écologie et du développement durable (MEDD/DPPR/SDPRM), Algérie, Version du 8 juillet 2003.
- **LANG P. J., BRADLEY M. M., CUTHBERT B. N., (1999),** International affective picture system (IAPS): Technical manual and affective ratings. University of Florida, Center for Research in Psychophysiology; Gainesville.
- **LAOUAMI, N., SLIMANI, A., BOUHADAD, Y., CHIKH, M., LARBES, S., HADDOUCHE, D. (2006),** Rapport préliminaire sur la caractérisation du séisme de Laâlam (choc principal du 20/03/2006). CGS unpublished report.
- **LARBES S., (2003),** Analysis of strong ground motions recorded during the 21st May, 2003 Boumerdes, Algeria, earthquake. European Mediterranean Seismological Centre Newsletter (EMSC), September N° 20: 5-7.
- **LEI C. I., (2012),** Earthquake-Triggered Landslides. 1st Civil and Environmental Engineering Student Conference 25-26 June 2012 Imperial College London.
- **LISSAK C., (2012),** Les glissements de terrain des versants côtiers du Pays d'Auge (Calvados): Morphologie, fonctionnement et gestion du risque. Thèse de doctorat de l'Université de Caen Basse-Normandie, France.
- **LNHC (2002),** Étude géotechnique de la zone de glissement—Première tranche—Tigzirt., rapport n°6.0.120.2002.
- **MACHANE D., BOUHADAD Y., OUBAICHE E., HELLEL M., AMROUCHE F.,**

ABBES K., MESSAOUDI K. M., et CHEIKH LOUNIS G., (2004) : description morphologique des effets induits par le seisme de Boumerdes (Algérie) du 21 mai 2003 (Mw=6.8) ; Mém. Serv. Géol. Alg. N° 12 pp. 133 -146, 2004.

- **MACHANE. D., GUILLIER B. B., CHATELAIN J. L., BOUILLIN J. P., HADDOUM H., GUEMACHE M. A., ZETOUTOU S., AOURARI S., DJADIA L. et BENELHADJ Z., (2009),** Le séisme (mw = 5) de Laalam (Kabylie, Algérie) du 20 mars 2006 : prospections géologiques et géophysiques (bruit vibratoire ambiant) et corrélations avec les dommages. Bulletin du service géologique national vol. 20, n° 3, pp. 357 – 373.
- **MAKDISI F. I., SEED. H. B., (1978),** Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations. Journal of Geotechnical Engineering, 104 (7) (1978), pp. 849–867.
- **MANUEL PLAXIS 2D V10** : Edited by R.B.J Brinkgreve, W.M.SWOLFS AND E. Engin.
- **MARRE A., BEAUDET G., (1988).** Géomorphologie du Tell oriental algérien, Méditerranée, Volume 63, Numéro 1, pp. 68-70;
- **MASSARSCH, K. R., (1980),** Earthquake effects on slope stability, State-of-the-art Report, Proceedings of the Seventh Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, Vol. 10, 23p.
- **MAYER R. E., (2003)**, Géomorphologie : principes, méthodes et pratique. Édit. GUÉRIN, Chamonix, 496 p.
- **MEGHRAOUI M., PONDRELLI S., (2012),** Active faulting and transpression tectonics along the plate boundary in North Africa. Annals of Geophysics, 55 (5), pp 955-967.
- **MEGHRAOUI M., MAOUCHE S., CHEMAA B., CAKIR Z., AOUDIA A., HARBI A., ALASSET P. J., AYADI A., BOUHADAD Y., and BENHAMOUDA F., (2004),** Coastal uplift and thrust faulting associated with the Mw=6.8 Zemmouri (Algeria) earthquake of 21 may 2003. Geophysical Research Letters 31.
- **MEGHRAOUI M., and DOUMAZ F., (1996),** Earthquake-induced flooding and paleoseismicity of the El-Asnam, Algeria, fault-related fold. J. Geophys Res. 101(B8):17617–17644.
- **MEYER B., AVOUAC J. P., TAPPONNIER P., et MEGHRAOUI M., (1990),** Mesures topographiques sur le segment SW de la zone faillée d'El Asnam et interprétation mécanique des relations entre failles inverses et normales. Bulletin de la Société Géologique de France. Volume, N°3, Page 447-456.
- **MEGHRAOUI M., MAOUCHE S., CHEMAA B., CAKIR Z., AOUDIA A., HARBI A., ALASSET P.J., AYADI A., BOUHADAD Y., BENHAMOUDA F., (2004),** Coastal uplift and thrust faulting associated with the Mw = 6.8 Zemmouri (Algeria) earthquake of 21 May, 2003. Geophys. Res. Lett. 31: L19605.
- **MEGHRAOUI, M., (1989),** Blind reverse faulting system associated with the Mont Chenoua Tipaza earthquake of 29 October (north-central Algeria), Terra Nova, 3, 84-93, 1991.
- **MEGHRAOUI M., (1988),** Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie. paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris Sud, 356 pp.
- **MERIC O. (2006),** Etude des mouvements de terrain par mesures géophysiques, PHD thesis PHD, University Joseph Fourier, Grenoble, France.

- **MORGENSTERN N. R., and PRICE V. E., (1965).** The analysis of the stability of general slip surface. Geotechnique Volume 15 Issue 1, pp. 79-93.
- **MOORE R., CAREY J. M., MCINNES R. G., (2010),** Landslide behavior and climate change: predictable consequences for the Ventnor Undercliff, Isle of Wight. J. Eng. Geol. Hydrogeol. 43:447–460.
- **MOUROUX P., MARGRON P., & PINTE J.C., (1988),** La construction économique sur sols gonflants. Edition BRGM, 125 p.
- **MOUSSAOUI N., (2011**), Etude de la micro-sismicité de la région de Kherrata. Mémoire de MAGISTER Option : Sismologie, Université Ferhat Abbas de Sétif, (Algérie).
- **MURTHY V. N. S., (2002),** Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Textbook, CRC Press, 1056 pages.
- **NAYLOR. J.C. and SMITH A. F. M., (1982)**, Applications of a method for the efficient computation of posterior distributions. Applied statistics, Vol. 31, N°3, page214-225.
- **NEBOIT R., (1991),** L'homme et l'érosion. L'érosion des sols dans le monde. Publications de la Faculté des Lettres de Clermont-Ferrand II, n° 34, 269 p.
- **NEWMARK N. M., (1965),** Effects of earthquakes on dams and embankments. Geotechnique, 15 (2) (1965), pp. 139–160.
- **NOCQUET J.M., CALAIS E., (2004),** Geodetic measurements of crustal deformation in the Western Mediterranean and Europe. Pure Appl. Geophys.161:661–681.
- **OUAYED M., YIELDING G., HAIZFELD D., KING G.C.P., (1983)**, An aftershock study of the El Asnam (Algeria) earthquaque of 1980 october 10. Geophys.J.R.Aster.Soc.,Oxford,73, pp. 605-639.
- **PAETSCH F., EBERLEIN A., MAURER F., (2003),** Requirements engineering and agile software development. Proceedings of the Twelfth IEEE International workshops on Enabling Technologies.
- **PECKER A., (1984)**, Dynamique des sols. Edition presses de L'Ecole Nationale des ponts et Chaussées, Paris, France
- **RAMDANI N., MESLEM N., CANDAU.Y., (2008),** Reahability analysis of uncertain nonlinear systems using guaranteed set integration. 17th IFAC Word Congress, pp8972-8977.
- **Rapport AFPS**, Le séisme du 21 mai 2003 en Algérie. Rapport préliminaire de la mission AFPS organisée avec le concours du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD/DPPR/SDPRM), France (2003).
- **Rat M., (1981),** Étude hydrogéologique des formations de pente et de leur drainage. Bulletin de liaison des laboratoires des Ponts et Chaussées 115:7–14**.**
- **RAY R. L., AND J.M. JACOBS J. M., (2007),** Relationships among remotely sensed soil moisture, precipitation and landslide events.Natural Hazards, 43(2):211–222, 2007.
- **RODRIGUEZ C.E., BOMMER J.J., et CHANDLER J.R., (1999),** Earthquake induced landslides: 1980-1997. Soil dynamics earthquake engineering, 18, pp. 325-346.
- **ROTHE, J.P., (1950)**, Les séismes de Kerrata et la séismicité de l'Algérie, Pub. Serv., Cartes. Géol. Algérie, 40 pp.
- **ATTARI N.A., (RPA 2003),** Règles Parasismiques Algeriennes RPA99 VERSION 2003.pdf
- **SAADALLAH.A K., (1992),** Le Cristallin de la Grande Kabylie (Algérie) : sa place dans la chaine des Maghrébides. Thèse doctorat ès Sciences : Géologie - option

Géologie structurale : Université des sciences et de la technologie Houari-Boumediene (USTHD).

- **SARMA S. K., (1973),** Stability analysis of embankments and slopes. geotechnique, Vol: 23, Pages: 423-433.
- **SARMA S. K., (1979),** Stability analysis of embankments and slopes, journal of the geotechnical engineering division-ASCE, Vol: 105, Pages: 1511-1524.
- **SEDDIKI A., (2008),** Analyse de la stabilité des pentes sous seisme. Mémoire de .Magister en Géotechnique, Université Mohamed Boudiaf M'sila.
- **SEED H. B., and GOODMAN, R. E., (1964),**"Earthquake stability of slopes of cohesion less soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 90, No. SM6, 43-74.
- **SEED H. B., (1979), 19th Rankine Lecture:** "Considerations in the Earthquake Resistant Design of Earth and Rockftll Dams ", Geotechnique, Vol. 29, No. 3, pp. 215-263.
- **SEED H. B., (1987),**"Design problems in Soil Liquefaction". American Society of Civil Engineers, ASCE, JGED, Vol. 113, No. 7 August, pp.827-845.
- **SEED H. B., (1976),**"Evaluation of Soil Liquefaction Effects on Level Ground During Earthquakes". Liquefaction Problems in geotechnical Engineering, ASCE Annual Convention and Exposition, Philadelphia, PA, October, pp 1-109.
- **SEED H. B., ROMO M.P., (1986),**"Analytical Modelling of Dynamics Soil Response in the Mexico Earthquake of September 19, 1985". ASCE, 148-162. Nueva York, USA.
- **SEED H. B., (1967),** "Slope stability during earthquakes", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 93, No. SM4, 13-41**.**
- **SEMMANE F., (2005),** Caractérisation de la source sismique à partir des données en champ proche. Application aux séismes de Tottori (Japon) et Boumerdès (Algérie). Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, France, 178 p.
- **SERPELLONI E., VANNUCCI G., PONDRELLI S., ARGNANI A., CASULA G.; ANZIDEI M., BALDI P., GASPERINI P., (2007),** Kinematics of the western Africa–Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. Geophys. J. Int. 169(3):1180–1200**.**
- **SLIMI A., et LARUE J.P., (2013),** Infrastructures routières et risque de tassement : le cas du viaduc de Berrahmoune, Boudouaou, Algérie. geomaghreb n°9, pp. 29-46.
- **SLIMI A., et LARUE J. P., (2010),** Risques de glissement et aménagements : l'exemple du glissement d'un remblai autoroutier à l'ouest de Bouira (Grande Kabylie, Algérie). Revue géographie physique et environnement p. 87-106.
- **SOURIS M., (1992**), Les principes de systèmes d'information géographique: Principes, algorithmes et architecture du système Savane. Thèse de doctorat, Université d'Orsay.
- **SPENCER E., TECH A. M. SC., (1967),** Method of analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces. Volume 17 Issue 1, pp. 11-26.
- **TERZAGHI K., (1925),** Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage. Franz Deuticke, Liepzig-Vienna.
- **TERZAGHI K., (1950),** Mechanism of landsiides.Application of geology to engineering practice. Geol. Soc. of America, New York, Berley, 1950, p. 83-123.
- **TERZAGHI K., (1960),** From Theory to Practice in Soil Mechanics - Karl Terzaghi by Bjerrum, et al., John Wiley and Sons.
- **TRITSCH J. J., DIDIER C., (1996),** Méthodologie pour la connaissance et l'identification des risqué de mouvements de terrain. Rapport final du projet de recherché, INERIS, France.

- **UGAI K., (1990),** Availability of shear strength reduction method in stability analysis- Suchi-to-Kiso, 38(1), pp. 67-72.
- **VAN ASCH T.W.J., BUMA J., et VAN BEEK L.P.H., (1999)**, A view on some hydrological triggering systems in landslides. *Geomorphology*, vol. 30, p. 25-32.
- **VAN ASCH T.W.J, MALET J.P., VAN BEEK L.P.H. et AMITRANO D. (2007)**, Techniques, issues and advances in numerical modelling of landslide hazard. *Bulletin de la Société Géologique de France*, vol. 178, n° 2, p. 65-88.
- **VARNES D.J., (1978),** Slopes movement types and processes. Landslides, analysis and control. Ed. Schuster R.L. et Krizek R.J., transportation research board special report, 176, National academy of sciences, Washington D.C. , pp. 11-33.
- **WANG S., (2009)**, Seismic geo-hazard assessment of engineering sites in China. Bull. Eng. Geol. Environ. 68, n°2, pp. 145-159.
- **WINTER T., BES DE BERC S., COVA P., SEDAN O., AUDRU J.C., TERRIER M.,** (2008), « Méthodologie pour la réalisation d'un exercice de crise sismique de type Richter », Rapport BRGM/RP-57237-FR, 2008, 229 p.
- **YAHIAOUI M., (2008)**. Contribution à l'analyse dynamique des terrains en pentes sous séisme par logiciel PLAXIS. Mémoire de Magister. Spécialité : Génie Civil. Option : Géotechnique, Université Abou Bekr Belkaid.
- **YAGI N., YAMAGAM T.,.,JIANG. J. C., (1999),** Slope stability engineering. Proceedings of the international symposium on slope stability engineering- Shikoku'99 /japan/ 8-11 november 1999, volume 1, Balkema.
- **YELLES-CHAOUCHE A., BOUDIAF A., DJELLIT H., BRACENE R. (2006),** La tectonique active de la région Nord Algérienne. C.R. géoscience 338:126–139.
- **YELLES-CHAOUCHE A., BOUDIAF A., DJELLIT H. et BRACÈNE R. (2006),** La tectonique active de la région nord algérienne. C. R. Geoscience, vol. 338, p. 126-139.
- **ZACEK M., (2014).** Conception parasismique des bâtiments, Conseil en construction parasismique. Centre Technique des Matériaux Naturels de Construction.

Résumé : *Le présent travail constitue une contribution à la caractérisation et à la modélisation numérique du glissement de terrain affectant le versant côtier du centre-ville de Tigzirt (Algérie). Ce versant est caractérisé par une pente relativement faible (de 13° à 15°), composée de deux formations géologiques principales (un substratum marneux surmonté par des dépôts quaternaires récents). Plusieurs facteurs ont agi conjointement et expliquent l'activité de ce glissement : il s'agit de l'effet des contextes géologique, morphologique et hydrogéologique du site combiné à des facteurs déclenchants d'origines diverses (anthropiques, climatiques et sismiques). Ce glissement de terrain est caractérisé par une surface de rupture plane qui mobilise un mécanisme de déformation global en translation vers la mer.*

Les résultats des calculs numériques avec le code plaxis^{2D}, tant statique que dynamique confirment l'état de stabilité précaire du versant. En effet, l'influence de l'effort sismique sur la stabilité du versant a engendré une augmentation du déplacement maximal d'environ 50% par rapport au cas statique. La surcharge et l'effet de la nappe ont une grande influence sur la réponse dynamique du versant. En effet, l'instabilité du versant s'est accentuée avec la présence de l'urbanisation particulièrement lorsque la nappe est en surface. L'action combinée (surcharge + séisme) mobilise davantage le versant avec un taux de déplacements qui augmente de 84% et la zone remaniée s'élargit sur tout le long du versant. Ce taux de déplacements et l'effet de la zone remaniée diminuent en fonction de la profondeur de la nappe.

Mots clés *: mouvement de terrain, caractérisation, SIG, modélisation, sollicitation statique, sollicitation dynamique.*

Abstract: This *work is a contribution to the characterization and the numerical modeling of the landslide affecting the coastal hillside of downtown of Tigzirt (Algeria). This hillside is characterized by a relatively low slope (13° to 15°), consisting of two main geological formations (a marly substratum surmounted by recent Quaternary deposits). Several factors have acted jointly and explain the activity of this slip: it is about the effect of the geological, morphological and hydrogeological contexts of the site combined with triggering factors of various origins (anthropic, climatic and seismic). This landslide is characterized by a plane rupture surface which mobilizes a mechanism of global deformation in translation towards the sea.*

The results of the numerical calculations with the plaxis^{2D} code, both static and dynamic, confirm the precarious state of stability of the Coastal hillside. Indeed, the influence of the seismic force on the stability of the hillside generated a maximum displacement increase of about 50% compared to the static case. The overload and the effect of the water table have a great influence on the dynamic response of the hillside. Indeed, the instability of the Coastal hillside was accentuated with the presence of the urbanization especially when the groundwater is on the surface. Combined action (overload + earthquake) mobilizes more the hillside with a displacement rate that increases by 84% and the disturbed zone expands along the entire Coastal hillside. This rate of displacement and the effect of the disturbed zone decrease as a function of the depth of the water table.

Key words: landslide, characterization, GIS, modeling, static stress, dynamic stress.