



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Frères Mentouri Constantine
Faculté des Sciences de la Technologie
Département de Génie Civil

N° d'Ordre : 29/DS/2024
N° de Série : 02/GC/2024

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de :
Doctorat en sciences : **GÉNIE CIVIL**
Spécialité : **GEOTECHNIQUE**

Thème

**Comportement des sols à problèmes et une vulnérabilité aux risques (ArcGIS)
Cas de la ville de Constantine**

Présentée par :

YKHLEF Boubakeur

Soutenue le 30/05/2024

Devant le jury composé de :

Mr BEROUAL Ahmed	Professeur	Président	Université Frères Mentouri Constantine1
Mr BELOUAR Abdelghani	Professeur	Rapporteur	Université Frères Mentouri Constantine1
Mr BENOUIS Abdelhalim	Professeur	Examineur	Université 8 Mai 1945 Guelma
Mr BENZAID Riad	Professeur	Examineur	Université Mohammed Seddik Benyahia Jijel
Mr BOUDAUD Zeineddine	Professeur	Examineur	Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi
Mr CHABANE Abdelhafid	M.C.A	Examineur	Université Frères Mentouri Constantine1

Remerciement

J'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude à Mr **BELOUAR Abdelghani Professeur en Géotechnique** au département de Génie Civil, Université Frères Mentouri Constantine1, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe de recherche et pour m'avoir orienté, dirigé et encouragé dans ce travail de doctorat. Je le remercie vivement pour ses conseils, ses orientations et ses directives tout au long de la réalisation de ce travail et durant la rédaction de cette thèse.

Je tiens à remercier vivement Mr **BEROUAL Ahmed**, Professeur en Géotechnique au département de Génie Civil, Université Frères Mentouri Constantine1, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance de cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à Mr **BENOUIS Abdelhalim**, Professeur au département de Génie Civil, Université 8 Mai 1945 Guelma, Mr **BENZAID Riad**, Professeur au département de Génie Civil, Université Mohammed Seddik Benyahia Jijel, Mr **BOUDAUD Zeineddine**, Professeur au département de Génie Civil, Université Larbi Ben M'hidi, Oum El Bouaghi et Mr **CHABANE Abdelhafid M.C.A** au département de Génie Civil, Université Frères Mentouri Constantine1, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être membres de jury de cette thèse et pour les corrections qu'ils y ont apportées.

Enfin, mes sincères remerciements s'adressent à tous les enseignants de l'université Frères Mentouri Constantine 1 et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Le présent travail examine le comportement des sols de la ville de Constantine avec la vulnérabilité aux risques glissement de terrain. La région présente des argiles sensibles, une topographie accidentée, des réseaux d'assainissement défectueux. La géologie locale est caractérisée par des terrasses alluviales, des formations argileuses, des conglomérats, des marnes grises.

Une typologie des glissements de terrain a été faite avec une identification de vingt-neuf zones propices.

Cette recherche s'est appuyée sur une base de données géotechnique dont les résultats essais recueillis des institutions de l'état et de certains laboratoires de sol. Toutes ces données ont été compilés dans des graphes, analysés et traités. L'étude révèle une faible capacité en surface. Des essais triaxiaux ont été entrepris pour comprendre le comportement des sols mettant en évidence une résistance au cisaillement assez faible sur toute la zone. Ces résultats ont été interprétés par la méthode de l'analyse critique.

Une corrélation entre différents paramètres a été effectuée pour ces types de sols et à donner de bons résultats.

Le support privilégié pour la cartographie des niveaux de susceptibilités a été fait afin d'évaluer les risques d'instabilité. Les méthodes AHP, WLC et les SIG ont été employées pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain, en considérant des facteurs déclenchants. La carte de susceptibilité montre que plus de 49 % de la zone étudiée présente une susceptibilité élevée à très élevée.

La thèse propose une approche cartographique adéquate et fiable pour évaluer et prévenir les risques de glissements de terrain dans la ville de Constantine, offrant ainsi des outils performant pour les décideurs et les gestionnaires urbain et contribuant ainsi à la planification de la gestion des catastrophes.

Mots clés : Constantine, sol sensibles, typologie, base des données, glissements de terrains et cartographie.

Abstract

The present work examines the behavior of the soils in the city of Constantine with their vulnerability to landslide risks. The region features sensitive clays, rugged topography, and defective sanitation networks. The local geology is characterized by alluvial terraces, clay formations, conglomerates, and gray marls.

A typology of landslides was developed, identifying twenty-nine susceptible zones.

This research relied on a geotechnical database whose test results were collected from state institutions and some soil laboratories. All these data were compiled into graphs, analyzed, and processed. The study reveals low surface capacity. Triaxial tests were conducted to understand the soil behavior, highlighting a relatively low shear strength throughout the area. These results were interpreted using the method of critical analysis.

A correlation between different parameters was made for these soil, yielding to a good results for this analysis.

The preferred support for mapping susceptibility levels was developed to evaluate instability risks. The AHP, WLC, and GIS methods were employed to assess landslide susceptibility, considering triggering factors. The susceptibility map shows that more than 49% of the studied area has high to very high susceptibility.

The thesis proposes an adequate and reliable cartographic approach to evaluate and prevent landslide risks in the city of Constantine, thus providing effective tools for policymakers and urban managers and contributing to disaster management planning.

Keywords: Constantine, Sensitive soils, Typology, Database, Landsliding, Mapping.

ملخص

يتناول هذا العمل سلوك التربة في مدينة قسنطينة وقابليتها التعرّض لمخاطر الانهيارات. تتميز المنطقة بوجود طين حساس، تضاريس وعرة، وشبكات صرف صحي معطوبة. تتصف الجيولوجيا المحلية بشرفات طميية، تكوينات طينية، تكتلات، وأحجار مارل رمادية.

تم إعداد تصنيف للانهيّارات التربة مع تحديد تسع وعشرين منطقة معرضة.

استند هذا البحث إلى قاعدة بيانات جيوتقنية تضمنت نتائج الاختبارات التي تم جمعها من المؤسسات الحكومية وبعض مختبرات التربة. تم تجميع جميع هذه البيانات في رسوم بيانية، تحليلها ومعالجتها. تكشف الدراسة عن قدرة مقاومة في السطح منخفضة. تم إجراء اختبارات ثلاثية المحاور ثريا كسيال لفهم سلوك التربة، مما أبرز مقاومة منخفضة للقص في جميع أنحاء المنطقة. تم تفسير هذه النتائج باستخدام منهجية التحليل الحرج.

تم إجراء علاقة ارتباط بين مختلف المعايير لهذه الأنواع من التربة وأعطت نتائج جيدة لهذا التحليل. تم استخدام الدعم المفضل لرسم خرائط مستويات الحساسية لتقييم مخاطر عدم الاستقرار. تم استخدام طرق AHP و WLC ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتقييم حساسية الانهيارات في التربة، مع الأخذ بعين الاعتبار العوامل المسببة. تظهر خريطة الحساسية أن أكثر من 49% من المنطقة المدروسة لديها حساسية عالية إلى عالية جدًا.

تقترح الأطروحة نهجًا خرائطيًا مناسبًا وموثوقًا لتقييم ومنع مخاطر الانهيارات في التربة بمدينة قسنطينة، مما يوفر أدوات فعالة لصناع القرار والمسيرين الحضريين، ويساهم في التخطيط لإدارة الكوارث.

كلمات مفتاحية: قسنطينة، التربة الحساسة، تصنيف، قاعدة البيانات، انهيارات التربة، الخرائط.

Table des matières

Résumé	i
Abstract	ii
ملخص	iii
Table des matières	iv
Table des figures	viii
Liste des tableaux	xiv
Liste des Symboles	xv
Introduction générale	1

Chapitre 1

Classification des sols avec leur géologie concernant la ville de Constantine

1.1. Introduction	7
1.2. Les sols granulaires	8
1.3. Les sols fins	12
1.4. Sols particuliers et remblais	15
1.5. Historique géologique	17
1.5.1. Litho stratigraphie	18
1.5.1.1. Trias	18
1.5.1.2. Jura	18
1.5.1.3. Crétacé	18
1.5.1.4. Crétacé supérieur et éocène moyen	19
1.5.1.5. Crétacé inférieur	20
1.5.1.6. Nappe Néritique Constantinoise	20
1.5.1.7. Mio – Pliocène	21

1.5.1.8. Quaternaire	21
1.5.1.9. Les Terrasses	22
1.5.1.10. Aperçu stratigraphique et orogénique	23
1.5.1.11. Cultures	24
1.5.1.12. Aperçu structural	24
1.5.1.13. Aperçu climatologique	27
1.5.1.14. Aperçu hydrogéologique	27
1.6. Conclusions	28

Chapitre 2

Typologie et caractéristiques des glissements de terrain affectant la ville de Constantine

2.1. Introduction	30
2.2. Typologie de certains glissements de terrain de Constantine	30
2.2.1. Université de Mentouri	32
2.2.2. Cité Boussouf	35
2.2.3. Complexe d'habitation le Ciloc	40
2.2.4. Mosquée et l'Université Islamiques Émir Abdelkader	44
2.2.5. Le glissement de Bellevue	47
2.2.6. L'hôpital El- Bir	49
2.2.7. Le Quartier Saint-Jean-Kitouni (Belouizdad)	51
2.2.8. La route nationale RN 27 (Glissement Boudraa-Salah + Ben-cheroui)	55
2.2.9. Le pont Sidi Rached	58
2.2.10. Bardo	61
2.2.11. Contournement-Sud Boussouf - Ain El Bey	64
2.3. Conclusions	73

Chapitre 3

Approche constitutive d'une base de données des sols sensibles cas de la ville de Constantine

3.1. Introduction	75
3.2. Collecte des données et organisation de la base géotechnique	76
3.3. Analyse et sélection des données	76

3.4.	Caractérisation des données retenues pour le stockage	77
3.5.	Classification des sols de la ville de Constantine	77
	3.5.1. Caractérisation géotechnique	77
	3.5.2. Caractérisation	82
3.6.	Résultats des essais	84
3.7.	Analyse et Discussion selon la théorie de l'état critique	87
3.8.	Confrontation avec les résultats de la littérature.	90
3.9.	Détermination des caractéristiques résiduelles	92
3.10.	Discussion de l'étude	93
3.11.	Conclusion.	95

Chapitre 4

Vulnérabilité au risque glissement et sa cartographie cas de la ville de Constantine

4.1.	Introduction	98
	4.1.1. Historique du risque glissement et la cartographie	98
	4.1.2. Principes de base de l'instabilité des versants	100
	4.1.3. Notions de susceptibilité	101
	4.1.4. Description et évaluation des méthodes classiques de cartographie des niveaux de Susceptibilité des Mouvements de Terrain (NSMT)	102
	4.1.4.1. Méthodes inductives	103
	4.1.4.2. Méthodes déductives	103
	4.1.4.3. Méthodes numériques	104
	4.1.5. Approche et méthode utilisés	105
	4.1.5.1. Logiciel utilisé dans cette étude	105
4.2.	L'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP)	107
	4.2.1. Principes de la méthode AHP	107
	4.2.1.1. La structuration hiérarchique de la méthode AHP	108
	4.2.1.2. Matrice de comparaison	108
	4.2.1.3. Vérification de la cohérence	109
4.3.	Identification de l'objectif de l'analyse	110
4.4.	Les couches thématiques	110
	4.4.1. La lithologie	110
	4.4.2. La Pente	112
	4.4.3. Précipitations	113

4.4.4. Distance par rapport au cours d'eau	115
4.4.5. L'altitude (Élévation)	117
4.4.6. L'occupation des sols	119
4.5. Détermination des poids	120
4.6. Délimitation de la susceptibilité des zones au glissement	121
4.7. Validation de la cartographie de zonage de susceptibilité aux glissements	123
4.8. Conclusion	126

Conclusions et recommandations

1. Conclusions	129
2. Recommandations	132
Bibliographie	133

Table des figures

1.1.	Phénomène de dilatance	7
1.2.	Chaînes de contraintes dans un milieu granulaire photoélastique	9
1.3.	Coefficient de frottement apparent sable/armature dans la Terre Armée	10
1.4.	Comportement drainé et non drainé d'un sable lâche au triaxial	11
1.5.	Profil géotechnique de la rupture de la digue au port de Nice	12
1.6.	Rupture d'un remblai sur sol mou renforcé par plots pilonnés	13
1.7.	Tassements de l'aéroport d'Osaka	14
1.8.	Schéma interactif ciel et mer comme pour l'interaction géologie et le sol	16
1.9.	Géologie de Constantine	23
1.10.	Modèle topographique numérique de la ville de Constantine	25
1.11.	La carte des pentes de la ville de Constantine	26
2.1.	Principales zones de glissements localisées dans le périmètre urbain de la ville de Constantine	31
2.2.	Ligne probable du glissement de terrain du site de l'université de Mentouri de Constantine coté Oued Rhumel	32
2.3.	Profil donnant la pente du talus avec une vue d'ensemble du site de l'université de Mentouri de Constantine coté Oued Rhumel et coté Oued Boumerzoug	33
2.4.	Façade Est du bloc des classes affaissement de la chaussée au niveau du remblai autour des amphithéâtres	34
2.5.	Des dégradations de la voirie et du parking coté Est du bloc des sciences	34
2.6.	Arbres inclinés et caniveaux défectueux vers Oued Rhumel	34
2.7.	Décrochement du talus vers Oued Boumerzoug	34
2.8.	Décrochement avec inclinaison de certains arbres vers Oued Boumerzoug	34
2.9.	Affaissement et éboulement du talus vers Oued Boumerzoug	34
2.10.	Plan d'implantation des sondages carottés au site Boussouf	36
2.11.	Rupture probable d'un des glissements du site de Boussouf	36
2.12.	Profil donnant la pente d'un des talus de la zone de la cité Boussouf avec une vue d'ensemble du site	37
2.13.	Basculement du mur de soutènement avec l'ouverture du joint	38
2.14.	Basculement des bâtiments avec l'ouverture du joint	38
2.15.	Renversement du mur de soutènement	38
2.16.	Dégradation de la route cite Boussouf	38

2.17. Immeubles de la III tranche menaçant ruine (février 2023), tous les habitants ont été expulsés	38
2.18. Basculement des immeubles menaçant ruine (8 septembre 2023), tranche I cite Boussouf	39
2.19. Apparition des affaissements de la voirie et remplissage par du bitume	39
2.20. Plan d’implantation des sondages sur le site du Ciloc	40
2.21. Représentation des lignes de rupture probables pour le complexe d’habitation Ciloc avec les inclinomètres dans les sondages proposés	41
2.22. Représentation des lignes de rupture probables pour le complexe d’habitation Ciloc avec les supposées travaux de confortements par dalle en B.A plus les pieux	41
2.23. Profil donnant la pente du talus de la zone d’habitation du Ciloc	42
2.24. Renversement du mur de soutènement à l’arrière-plan du Ciloc	43
2.25. Bourrelet dans la formation argileuse du site des Ciloc	43
2.26. Arbres inclinés et escalier défectueux	43
2.27. Ligne probable du glissement du site la mosquée et l’Université Islamiques Émir Abdelkader Constantine	44
2.28. Profil donnant la pente du talus de la Mosquée et l’Université Islamiques Émir Abdelkader de Constantine	45
2.29. La Mosquée Emir Abdelkader et son talus amont	46
2.30. Stagnation d’eau provenant par le terrassement du talus amont	46
2.31. Arbres inclinés du talus site Mosquée Emir Abdelkader	46
2.32. Décollement du mur de soutènement avec des fissures en diagonale	47
2.33. Bellevue basculement du bâtiment avec dégradation du béton	47
2.34. Dégradation du béton avec des fissures diagonales dans la construction sur un talus de forte pente	47
2.35. Profil donnant la pente du talus Bellevue	48
2.36. Inclinaison des arbres sur le site de l’hôpital El Bir	49
2.37. Rupture des canalisations	49
2.38. Vue arrière du site de l’hôpital El Bir	49
2.39. Profil donnant la pente du talus de la zone Cite El Bir	50
2.40. Zone probable de rupture du quartier surpeuplé au centre de la ville de Constantine	51
2.41. Profil donnant la pente du talus de Saint-Jean-Kitouni	52
2.42. Tassement différentiel avec des fissures diagonales dans la construction	54
2.43. Dégradation du béton avec des fissures diagonales	54
2.44. Tassement différentiel avec dégradation du béton avec des fissures diagonales dans la construction	54

2.45.	Rupture d'une partie de la structure avec dégradation dans la partie restante de la construction	54
2.46.	Ligne probable de rupture de deux talus avec la RN 27	55
2.47.	Profil donnant la pente du talus de la zone Ben-Chergui Boudraa-Salah avec vue d'ensemble du site	56
2.48.	Mur de soutènement fondé sur pieux dans le site de Ben-chergui durant l'année 2013 . .	57
2.49.	Eroulement du versant des conglomérats rouges du Moi- pliocène	57
2.50.	Versant conglomératique du site de Ben-chergui	57
2.51.	Quelques glissements concernant le tissu urbain de la ville de Constantine	58
2.52.	Profil donnant la pente du talus de la zone du Pont Sidi Rached	59
2.53.	Dégradation des maisons du côté amont du pont de Sid Rached	60
2.54.	Source captée dans les marnes du Crétacé schisteuse en amont du pont de Sidi Rached .	60
2.55.	Maisons et hangars fissurés et basculés au pied de la culée du pont de Sidi Rached	60
2.56.	Source captée dans les marnes du Crétacé schisteuse en amont du pont de Sidi Rached .	60
2.57.	Arbres inclinés sur le versant marno-schisteux	60
2.58.	Banquette pour le talus renforcé par gabionnage (gabionnage déformé)	60
2.59.	Ligne de rupture probable pour le glissement du Bardo	61
2.60.	Profil donnant la pente du talus de la zone de Bardo avec sa zone urbaine	62
2.61.	Versant du site Bardo vers Oued Rhumel	63
2.62.	Versant du site Bardo vers Oued Rhumel	63
2.63.	Ligne de rupture probable rétrogressive du contournement Sud Boussouf – Ain El Bey	64
2.64.	Versant instable renforcé par palplanche et gabionnage	64
2.65.	Versant montrant des instabilités (arbres inclinés et caniveaux défectueux)	65
2.66.	Chaussée défectueuse montrant des anomalies au sein de la route Contournement-Sud . .	65
2.67.	Déplacement des palplanches et du gabionnage sur l'axe routier Contournement-Sud . .	65
2.68.	Profil donnant la pente du talus du contournement-Sud Boussouf -Ain El Bey	68
2.69.	Profil montrant des différents sites étudiés en mouvement dans la ville de Constantine (Algérie)	67
2.70.	Profil A-A montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : Ben-Chergui, Maquisard, Saint Jean Kitouni, Bardo, Sidi Rached	68
2.71.	Profil B-B montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : Ben-Chergui, Hattabia-Bachir-Samir, Boudraa-Salah, Ciloc, Bellevue, Université-coté-Oued-Boumerzoug	69
2.72.	Profil C-C montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : Boussouf, El-Hadaba, Contournement-Sud Boussouf Ain El Bey, Eucalyptus-Siège-Air-Algérie, Eucalyptus	70

2.73.	Profil D-D montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : Boussouf, Zaouch, Cité El-Bir, Boudraa-Salah, Maquisard, Boufenara-Cimetière, Aouinet-Foul, Chemin des Chutes	71
2.74.	Profil E-E montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : El-Hadaba, Contournement-Sud Boussouf Ain El Bey, Université-coté-Oued-Rhumel, Université-coté-Oued-Boumerzoug	72
3.1.	Densité humide contre profondeur	78
3.2.	Densité sèche contre profondeur	78
3.3.	Teneur en eau contre profondeur	78
3.4.	Degré de saturation contre profondeur	78
3.5.	Cohésion non drainée contre profondeur	78
3.6.	Angle de frottement contre profondeur	78
3.7.	Pression de consolidation contre profondeur	78
3.8.	Limite de liquidité contre indice de plasticité	78
3.9.	Densité humide contre profondeur	79
3.10.	Densité sèche contre profondeur	79
3.11.	Teneur en eau contre profondeur	79
3.12.	Degré de saturation contre profondeur	79
3.13.	Cohésion non drainée contre profondeur	79
3.14.	Angle de frottement contre profondeur	79
3.15.	Pression de consolidation contre profondeur	79
3.16.	Limite de liquidité contre indice de plasticité	79
3.17.	Densité humide contre profondeur	80
3.18.	Densité sèche contre profondeur	80
3.19.	Teneur en eau contre profondeur	80
3.20.	Degré de saturation contre profondeur	80
3.21.	Cohésion non drainée contre profondeur	80
3.22.	Angle de frottement contre profondeur	80
3.23.	Pression de consolidation contre profondeur	80
3.24.	Limite de liquidité contre indice de plasticité	80
3.25.	Densité humide contre profondeur	81
3.26.	Densité sèche contre profondeur	81
3.27.	Teneur en eau contre profondeur	81
3.28.	Degré de saturation contre profondeur	81
3.29.	Cohésion non drainée contre profondeur	81

3.30.	Angle de frottement contre profondeur	81
3.31.	Pression de consolidation contre profondeur	81
3.32.	Limite de liquidité contre indice de plasticité	81
3.33.	Diffraction des rayons X d'argile intacte	83
3.34.	Organigramme du concept d'essai	84
3.35.	Déviateur de contrainte contre la déformation axiale pour les échantillons étudiés	85
3.36.	Pourcentage de la teneur en eau contre la déformation axiale pour les échantillons étudiés	85
3.37.	Déviateur de contrainte contre la contrainte moyenne effective pour les échantillons étudiés	85
3.38.	Pourcentage de la teneur en eau contre la contrainte moyenne pour les échantillons étudiés	86
3.39.	Résultats du coefficient latéral au repos et l'angle interne de frottement de la ville de Constantine	87
3.40.	Line de consolidation et la ligne de rupture pour une teneur en eau normalise	88
3.41.	Ligne de consolidation à l'état critique pour un volume spécifique et une contrainte de consolidation	88
3.42.	Déviateur de contrainte et contrainte moyenne effective pour les échantillons étudiés	89
3.43.	Enveloppe critique dans le domaine q'/p' pour les échantillons étudiés	89
3.44.	Teneur en eau et compression non drainée	90
3.45.	Relation entre C_u/P_o et I_p pour les argiles de Boussouf	92
3.46.	Relation entre l'indice de liquidité et la résistance à la compression simple pour le site de Boussouf	92
4.1.	Structure d'un SIG	106
4.2.	La structure hiérarchique de la méthode AHP	108
4.3.	Carte lithologique de la zone d'étude en utilisant ArcGIS	111
4.4.	Histogramme montrant le pourcentage de différents types lithologiques	112
4.5.	Carte des pentes de la zone d'étude en cinq classes	112
4.6.	Histogramme présente le pourcentage de différentes classes des pentes	113
4.7.	Histogramme représentant la moyenne pluviométrique de la ville de Constantine	114
4.8.	Carte des précipitations de la zone d'étude	114
4.9.	Histogramme en pourcentage des différentes classes de la précipitation	115
4.10.	Carte de distance aux cours d'eau de la zone d'étude	116
4.11.	Histogramme en pourcentage des différentes classes de la distance aux cours d'eau	117
4.12.	Carte d'élévation de la zone d'étude	117
4.13.	Carte d'élévation en courbe de niveau de la zone d'étude	118
4.14.	Histogramme des surfaces en pourcentage des différentes classes d'élévation	118

4.15.	Carte d'occupation des sols de la zone d'étude	119
4.16.	Histogramme en pourcentage des différentes classes d'occupation des sols	120
4.17.	Susceptibilité aux glissements de terrain de la ville de Constantine selon le modèle AHP	120
4.18.	Carte de susceptibilité aux glissements de terrain de la zone d'étude	122
4.19.	Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de susceptibilité	123
4.20.	Cartographie des zones susceptibles aux glissements obtenue par AHP et validation des résultats de la méthode sur quelques sites bien connus pour leurs mouvements	124

Liste des tableaux

1.1.	Formations géologiques de la partie Ouest de Constantine	22
1.2.	La superficie des pentes dans la partie Ouest de la ville de Constantine	26
3.1.	Propriétés géotechniques de certains spécimens dans la région de Constantine	83
4.1.	L'échelle fondamentale des valeurs absolus de Saaty	108
4.2.	Indice de cohérence aléatoire	109
4.3.	Les surfaces des formations lithologiques de la zone d'étude	111
4.4.	Les surfaces des différentes classes des pentes dans la zone d'étude	113
4.5.	Les surfaces des classes de la précipitation dans la zone d'étude	115
4.6.	Les surfaces des classes de la distance aux cours d'eau dans la zone d'étude	116
4.7.	Les surfaces des classes d'élévation dans la zone d'étude	118
4.8.	Les surfaces des classes d'occupation des sols dans la zone d'étude	120
4.9.	Matrice de comparaison par paire de différents critères	121
4.10.	Surfaces des glissements de terrain pour les différentes zones de susceptibilité	123

Liste des Symboles

γ_h	Densité humide (t/m^3)
γ_d	Densité sèche (t/m^3)
S_r	Degré de saturation (t/m^3)
ω	Teneur en eau (%)
ϕ	Angle de frottement ($^\circ$)
C_u	Cohésion non drainée (kg/cm^2)
P_c	Pression de consolidation (kg/cm^2)
W_L	Limite de liquidité (%)
W_p	Limite de plasticité (%)
I_p	Indice de plasticité (%)
Z	Profondeur (m)
UU	Essai non consolidé non drainé
CU	Essai consolidé non drainé
K_0	Coefficient des terres au repos
q'	Pression déviatorique (kN/m^2)
p'	Moyenne sphérique des contraintes (kN/m^2)
m	Pente de la courbe d'état critique dans le plan (p',q')
ψ	Angle de dilatance du sol ($^\circ$)
ν	Coefficient de Poisson
σ'_h	Contrainte effective horizontale (kN/m^2)
σ'_v	Contrainte effective verticale (kN/m^2)
R_c	Résistance à la compression
ϕ_r'	Angle de frottement résiduel
C_r	Cohésion résiduelle
F_s	Facteur de sécurité
NSMT	Niveaux de susceptibilité des mouvements de terrain
RC	Ratio de cohérence (Consistency Ratio)
RI	Indice de cohérence aléatoire (Random Consistency Index)
CI	Indice de cohérence (CI : Consistency Index)
CSG	Coefficient de susceptibilité aux glissements de terrain

INTRODUCTION GENERALE

« Quel beau sujet de dispute sophistiqué tu nous apporte là, Ménon ; c'est la théorie selon laquelle on ne peut chercher ni ce qu'on connaît, ni ce qu'on ne connaît pas : ce qu'on connaît parce que, le connaissant, on n'a pas besoin de le chercher, ce qu'on ne connaît pas parce qu'on ne sait pas ce qu'on doit chercher ».

Platon.

Introduction générale

Les sols sensibles constituent une thématique très intéressante de nos jours pour les ingénieurs en génie civil. Malgré les grandes éventualités de modélisation numérique offertes par le développement de l'outil informatique en géotechnique, les phénomènes liés au comportement des sols restent aléatoires. En effet les concepteurs en génie civil doivent être très informés et avertis sur ces difficultés que constitue cette problématique qui continue à faire des désordres très importants. Ainsi lors de la 20^{ème} Conférence Karl Terzaghi donnée par le Prof. J. K. Mitchell de l'Université de Berkeley en 1986 sur le sujet « Practical problems from surprising soil behavior » a représenté une contribution importante sur le sujet. Il y montrait combien notre prévision du comportement des sols était dans de nombreux cas inadéquate sur quatre exemples :

- 1) L'amélioration assez rapide, à teneur en eau constante, de la résistance des échantillons d'argile sensible ;
- 2) Le phénomène de perte de résistance suivi d'un regain ;
- 3) Un sol apparemment correctement stabilisé et qui gonfle et se désintègre ;
- 4) Des surpressions interstitielles dans un sol argileux qui ne se dissipent pas comme prévu.

Pour montrer combien le comportement des sols est peu intuitif et finalement peu connu en dehors des spécialistes, nous citerons deux exemples. Le premier est relatif au phénomène mouvements de terrain qui affecte la ville de Constantine en Algérie, pour constituer un désenclavement de la vieille ville et construire toute une rangée de bâtiments sur des talus plus ou moins à la limite de la stabilité qui, quelques mois après le déblaiement de ces terrains se trouvèrent toutes fissurées. Les ingénieurs chargés des projets furent désagréablement surpris d'apprendre ces désordres, ne comprenant pas comment faire afin d'atténuer ces désordres (c'est le cas de la cité Boussouf actuellement).

Le deuxième exemple est le cas du tunnel de Djebel El Ouach qui s'est avéré au moment de la construction quelques difficultés ont apparus dans le sol au-dessus comportant des lacs d'eau créant un déséquilibre brutal d'où la rupture du tunnel, ne provoquant heureusement que des dégâts matériels mais conduisant à un retard imprévu.

Afin de réduire le coût exorbitant de ces sinistres pour la collectivité, on se propose de développer des actions de prévention. Il s'agit d'informer les constructeurs de l'existence de ces sols sensibles au phénomène de glissements spécialement en zone urbaine où les vies de personnes est en danger ainsi que leurs biens et de réglementer les constructions dans ces zones, au moyen de la cartographie de la susceptibilité aux glissements des sites anciens et réactivés ou des futurs sites pouvant

se mettre en mouvements. Le respect des règles de la construction relativement simples à mettre en œuvre et peu coûteuses permet, en effet, de s'affranchir de la plupart des désordres.

Depuis quelques décennies maintenant, la ville de Constantine, située sur des terrains très escarpés et sismiquement actifs, a connu épisodiquement de graves problèmes de glissements. Ces derniers se sont manifestés parallèlement à une urbanisation rapide et anarchique autour du site de l'ancienne ville. Ces mouvements se sont aggravés lors des pluies orageuses de 1987, de juillet août 1994 et septembre 1998. En effet, la plupart des glissements de terrains se sont réactivés au cours des hivers où la pluviométrie moyenne varie de 415mm à 950mm.

De plus, la vétusté des réseaux enterrés de l'assainissement et de l'eau potable a subi des dommages, non localisés, ayant entraîné des fuites qui favorisent la lubrification des surfaces de décollement, aggravant de cette manière le problème.

Sur l'ensemble de la zone urbaine (ancien et nouveau tissu urbain), vingt-neuf (29) sites présentant un fort potentiel de glissement ont été recensés.

Suite à ces mouvements de sol, plusieurs interventions ponctuelles des services techniques de l'urbanisme ont permis d'évacuer des bâtiments voire des quartiers entiers.

Depuis 1998, des expertises effectuées par des spécialistes internationaux et nationaux sur l'ensemble des sites ont débouché sur des conclusions recommandant des études très ciblées sur chaque site afin de stabiliser, quand cela est possible, les mouvements du sol et d'instrumenter chaque zone à des fins de prévention.

La zone urbaine de Constantine d'une superficie de 5006 ha présente une trentaine zones de glissements inventoriés et représentant une surface totale de 1230 ha soit 26 % avec une grande concentration d'habitants. Des quartiers entiers avec des centaines habitations sont concernées, endommagées, détruites par ce phénomène ou en voie de destructions.

Il m'ait paru très intéressant de mener un travail plus approfondi dans cette thèse sur l'ensemble de ces activités qui ont été conduites dans ce cadre tant sur le plan des études réalisées, des réglementations mises sur pied, que des faits marquants (accidents ou interventions diverses) et ce jusqu'à présent.

L'analyse des mouvements de terrains observés sur la région de Constantine a conduit à préciser certains facteurs de déclenchement tel que la lithologie, la pente, les précipitations, l'occupation des sols, l'élévation et les distances par rapport aux différents cours d'eaux. Chaque critère déstabilisant a son poids selon la méthode de l'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP) pour pouvoir déterminer le pourcentage préconisé du risque en fonction de la méthode utilisée.

Ce travail débute par une présentation de la classification des sols à problème dans les deux cas de figures (sol pulvérulent et cohérent) suivi par la présentation du cadre naturel de la ville de Constantine. Etant donné que la géologie du site était jusqu'à présent imprécise et assez complexe (carte géologique datant de 1901). Une analyse détaillée de toutes les études géologiques a été faite depuis 1912 jusqu'à 1999. En confrontant les hypothèses émises, nous avons essayé d'homogénéiser les données afin de les utiliser dans notre travail, qui est une partie considérable dans le comportement des sols à problème dans la région de Constantine.

Le deuxième chapitre, concerne les différents mouvements de terrains à travers la zone d'étude et leurs importances. Ils ont des effets souvent considérables sur le bâti qui vont de simples fissurations des crépis à l'obligation d'abandonner jusqu'à des cités entières devenues dangereuses. Les effets sur l'environnement sont variables et sont redoutables. On essaiera d'orienter ce chapitre, pour la détermination d'une typologie ainsi que les caractéristiques de ces glissements.

Dans le troisième chapitre, une approche de constitution et de réalisation d'une base de données géotechnique de Constantine. En effet, après analyse des différentes méthodes de programmation, le choix a été porté sur les logiciels Excel, Une vérification du facteur de sécurité a été faite par Plaxis. Une méthodologie précise a été suivie pour la conception et la réalisation d'une base de données géotechnique.

Elle comprend trois phases :

- Description des données sans l'intervention de l'outil informatique débouchant sur un schéma conceptuel de traitement de la base de données en utilisant Excel.
- La phase concrète de la réalisation de la base de données avec le stockage de tous les sondages réalisés sur tous les sites touchés par le phénomène des glissements de terrains avec tous les résultats d'essais physico-mécanique réalisés au sein du laboratoire L.T.P Est de Constantine, la relation du fichier, la mise à jour, l'édition des informations et la modification ou la suppression éventuelle de la structure des fichiers. Durant toute cette étape, la saisie des données a été accompagnée par un contrôle systématique de la validité des données.
- L'exploitation et la consultation des enregistrements pour une application directe (quatre cas de figures ont été envisagés).
 - Teneur en eau naturelle ;
 - Pression de consolidation ;
 - Cohésion ;
 - Angle interne de frottement.

Un exemple concret d'une interrogation de la base de données géotechnique de Constantine pour une comparaison entre les différents sites concernant ces paramètres avec comme référence le site, le sondage, la profondeur et la même valeur de l'attribut à savoir la cohésion ou autre. La réalisation des fichiers de travail pour le traçage automatique des coupes lithologiques, des coupes transversales des différents talus en fonction de leurs lithologies, des graphes de corrélations entre divers paramètres mécaniques ou physiques versus la profondeur ou de la confrontation avec les résultats de la littérature.

Le quatrième chapitre étudie l'éventualité d'une cartographie concernant la susceptibilité aux glissements de terrain pour la ville de Constantine à l'aide de l'ArcGIS qui est un logiciel très performant pour la cartographie. La méthodologie proposée est basée sur une approche statistique des paramètres pouvant influencer les mouvements de terrains spécialement en zone argilo-marneuse. Les méthodes AHP (Analytic Hierarchy Process), WLC (Weighted Linear Combination), et les SIG (Systèmes d'Information Géographique) ont été employés pour évaluer la susceptibilité aux glissements. Les SIG ont été utilisés pour l'identification des zones d'étude, la manipulation des données recueillis, le traitement des cartes, et la présentation finale des résultats. L'AHP a été essentiel dans l'attribution des poids aux différents facteurs, et la méthode de combinaison linéaire pondérée (WLC) a été utilisée pour convertir les données pondérées de chaque facteur en un indice de susceptibilité aux glissements de terrain. Six facteurs ont été considérés, à savoir : la lithologie, la pente, les précipitations, l'élévation, la distance par rapport aux cours d'eau et l'occupation des sols. Le choix de ces facteurs repose sur leur pertinence par rapport aux occurrences de glissements de terrain.

Au sein de cette étude, la corrélation spatiale entre les événements de glissement de terrain survenus sur place et les facteurs déclenchants tels que la lithologie, la pente, les précipitations, la distance aux cours d'eau, l'élévation et l'occupation des sols a été examinée en utilisant des techniques de Systèmes d'Information Géographique (SIG) combinées aux méthodes d'évaluation multicritères WLC et AHP.

Le résultat de cette méthodologie a donné pleinement satisfaction puisque qu'il reflète bien la réalité du terrain.

Des conclusions et des perspectives ont été proposées.

CHAPITRE 1

CLASSIFICATION DES SOLS AVEC LEUR GEOLOGIE CONCERNANT LA VILLE DE CONSTANTINE

« Ainsi Dieu connaît le monde, parce qu'il l'a conçu dans son esprit, comme de l'extérieur, avant qu'il fût créé, alors que nous, nous n'en connaissons pas la règle, car nous vivons à l'intérieur du monde, l'ayant trouvé déjà fait ».

Umberto Ecco.

Chapitre 1

Classification des sols avec leur géologie concernant la ville de Constantine

Introduction

Il convient de rappeler les principales caractéristiques du comportement du squelette des sols : la non linéarité de la courbe contrainte-déformation, l'absence de réversibilité et donc de comportement élastique, le fluage (notamment dans les sols argileux saturés) et surtout le phénomène de dilatance. Ce dernier distingue très fortement les sols des matériaux à comportement linéairement élastique. Il se caractérise, comme le montre la figure 1.1, par des variations de volume sous contrainte de cisaillement, ses conséquences et ses applications sont particulièrement importantes en géosciences et plus particulièrement mécanique des sols.

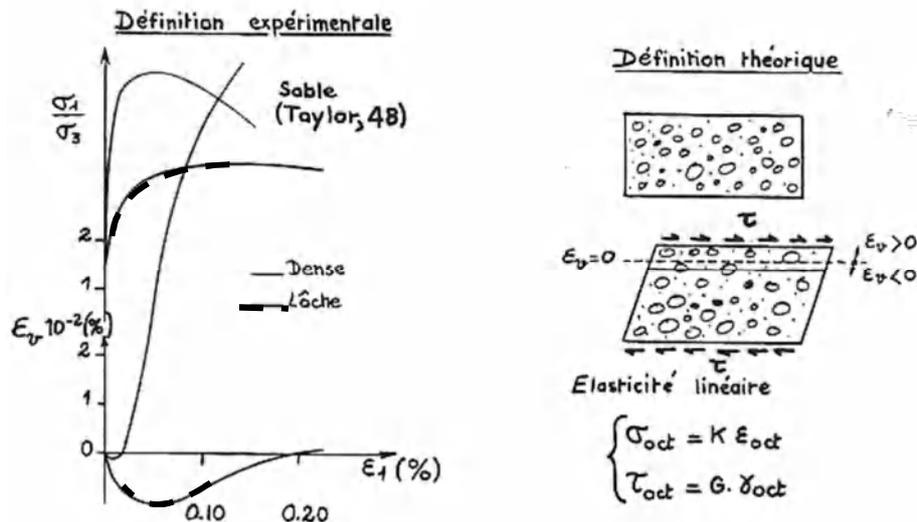


Figure 1.1. Phénomène de dilatance (Mitchell, 1986).

Le couplage avec l'eau interstitielle introduit une notable complication. La première conséquence en est la loi de Terzaghi, c'est à dire dans les sols saturés la répartition des contraintes totales en contraintes effectives et pressions interstitielles.

On distingue les sols granulaires, les sols fins saturés et non saturés en insistant sur les argiles, les sols et remblais particuliers, notamment les sols anthropiques, enfin les sols très hétérogènes et difficiles à reconnaître.

La classification est la suivante :

Sols granulaires.

- a) Cimentation des dépôts de sols granulaires lâches (loess).

- b) Résistance in situ des sables lâches propres.
- c) Fluage des sables.
- d) Courbe intrinsèque des sables.
- e) Liquéfaction statique des sables lâches.
- f) Phénomène de dilatance dans les sables (frottement sol /structure).

Sols fins saturés et non saturés.

- a) Sensibilité des argiles.
- b) Résistance des argiles très plastiques (Cas de la région de Constantine).
- c) Inefficacité de drains verticaux dans des argiles molles.
- d) Consolidation des argiles molles.
- e) Fluage des argiles et consolidation secondaire.
- f) Sols gonflants et sols à retrait (Cas de la région de Constantine).

Sols et remblais particuliers.

- a) Les résidus argileux miniers et industriels.
- b) Les scories de haut fourneau.

Sols hétérogènes et difficultés de reconnaissance.

- a) Les couches savons.
- b) Les sols karstiques.
- c) Les sols gypseux.

La classification précédente ne relève sans doute pas tous les phénomènes conduisant à des problèmes de sols dans la pratique, mais elle permet déjà d'en situer les grands axes.

On essaye de donner ci-après quelques exemples de cette classification

III. Les sols granulaires

Un certain nombre de phénomènes particuliers observés dans les dépôts des sables lâches en place, saturés ou non, proviennent du fait que tous les sables en place ont des liaisons entre leurs grains provenant soit de la percolation des eaux superficielles dans le cas des sables non saturés, soit de la précipitation de matériau en solution ou en suspension dans l'eau interstitielle. Mitchell (1986) a traité

le cas de la densification de sables lâches sous la fondation d'un futur barrage par vibro-compactage jusqu'à vingt-cinq mètres (25 m) de profondeur, puis par explosifs jusqu'à quarante-deux mètres (42 m). De façon surprenante la résistance des sables mesurée au pénétromètre immédiatement après la densification était inférieure à leur résistance initiale. Cependant en quelques mois cette résistance avait retrouvé sa valeur initiale, puis la dépassait pour atteindre les valeurs prévues par la densification. L'explication en est la reconstitution des liaisons entre les grains. Le cas de l'effondrement statique des loëss rencontrés sur le site du train à grande vitesse (TGV Nord) en France résulte également de ce phénomène de liaison entre les grains. Les loëss sont des dépôts de sable lâche non saturés formés par le vent et dont les grains ont été progressivement cimentés. Cette cimentation peut être en particulier détruite par une forte imbibition ou quasi saturation d'eau ; il en résulte alors un effondrement et une densification du loëss. La couche de loëss du TGV Nord repose sur la craie et se trouve protégée des imbibitions par la couche de terre végétale en surface. Il a été observé que lorsque cette couche était ponctuellement enlevée, il se produisait un effondrement local du loëss par suite de la dissolution de la cimentation entre les grains. Ce phénomène, qui a été beaucoup étudié par Abelev et al en URSS (1986), peut avoir été l'une des causes d'un déraillement du TGV dans le site des loëss peu de temps après sa mise en service.

Le fluage des sables est un phénomène peu connu, qui est lié aux chaînes de contraintes (figure.1.2) qui se développent dans les milieux granulaires et dont la réorientation à la suite d'un chargement n'est pas instantanée mais progressive, et cela d'autant plus que l'on se rapproche de la rupture.

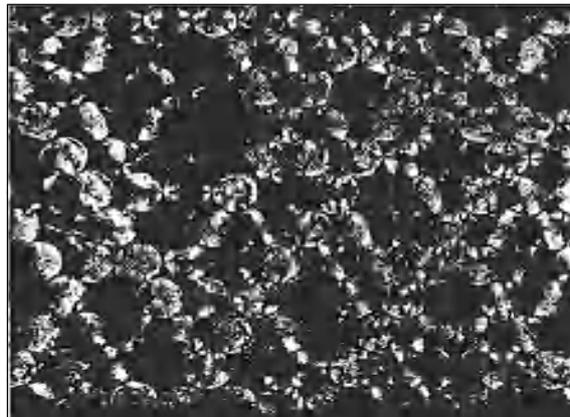


Figure 1.2. Chaînes de contraintes dans un milieu granulaire photoélastique (Travers et al, 1988).

La courbe intrinsèque d'un sable propre n'est pas entièrement linéaire, elle présente aux faibles contraintes une forme parabolique qui lui confère une cohésion apparente et un angle de frottement interne qui peut atteindre 60° et plus à l'origine.

La dilatance joue un rôle important dans le frottement des sables denses avec les structures enterrées (pieux, tunnelier, ancrages linéaires) en augmentant de façon souvent importante la contrainte

de cisaillement limite à l'interface. La figure 1.3 montre ce phénomène pour les armatures en terre Armée qui sont des plats métalliques. Les contraintes de cisaillement qui se développent sur leur pourtour ont tendance à faire augmenter de volume le sol avoisinant par effet de dilatance. Mais cette augmentation de volume est empêchée par le sol situé au-delà et il en résulte une augmentation de la contrainte normale v d'autant plus importante que celle-ci est initialement plus faible, car la dilatance est d'autant plus forte que la contrainte de confinement est plus faible. C'est le phénomène de la dilatance empêchée (Schlosser et Elias, 1978), lequel constitue un élément positif dans le renforcement des sols. En pratique, on utilise un coefficient de frottement apparent dont les valeurs sont déterminées expérimentalement et dépendent de l'état de surface de l'armature (lisse ou nervuré) en plus de la hauteur de remblai au-dessus de l'armature.

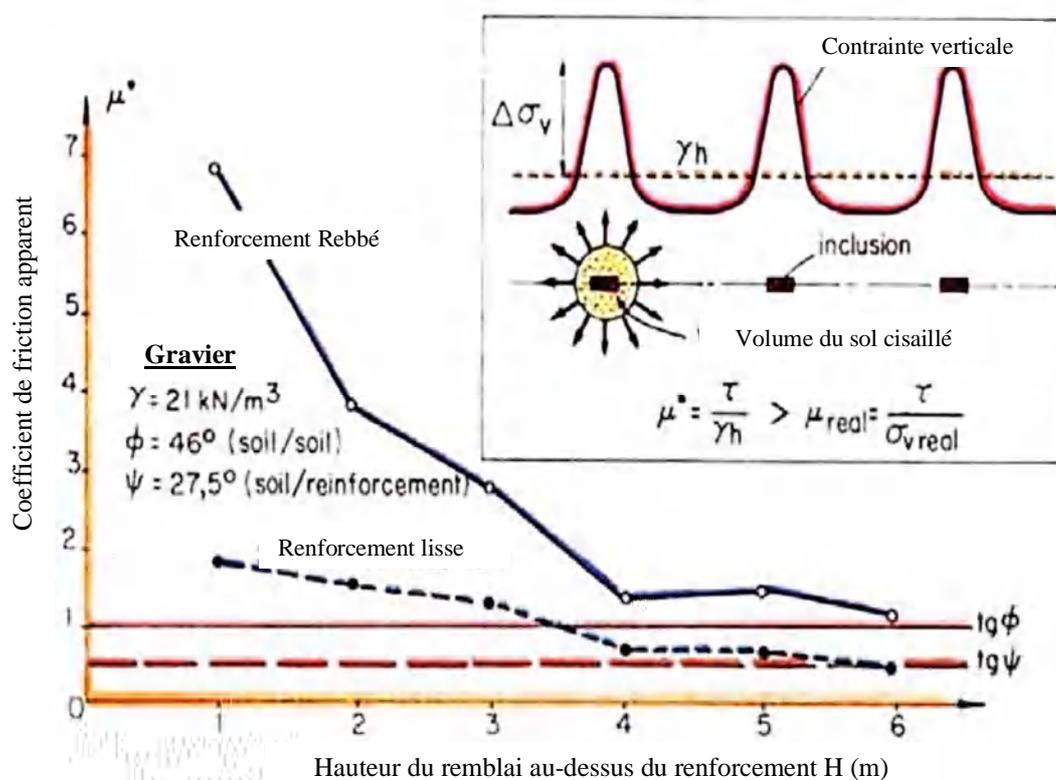


Figure 1.3. Coefficient de frottement sable/armature dans la Terre Armée (Schlosser et Elias, 1978).

La dilatance s'avère également importante dans le comportement des sables lâches saturés. En effet, lorsqu'un sable est soumis à des efforts de cisaillement en condition non drainée, les efforts de cisaillement auxquels il est soumis se transforment par effet de dilatance en surpressions interstitielles positives. Il peut alors en résulter un phénomène de liquéfaction lorsque la surpression interstitielle devient égale à la contrainte normale totale, puisque la contrainte normale effective σ'_v devient alors nulle. La liquéfaction dynamique des sables lâches est bien connue dans le cas des sollicitations cycliques et notamment sismiques. La liquéfaction, dite statique, des sables lâches sous un chargement rapide mais monotone n'était pratiquement pas connue avant la rupture du nouveau port de Nice le 16 octobre 1979.

Comme le montre la figure 1.4, la liquéfaction statique d'un sable lâche, en condition non drainée et à partir d'un état de contrainte anisotrope, à l'appareil triaxial s'obtient pour un supplément très faible de contrainte de cisaillement comparé à un essai de cisaillement en condition drainée. Le comportement du sable est assez sensible avec une résistance résiduelle provoquant la rupture par liquéfaction partielle égale à la moitié de la résistance de pic. La rupture du port de Nice, qui a provoqué la perte de 11 vies humaines et d'importants dégâts, a fait l'objet d'une expertise judiciaire d'une durée de 10 ans.

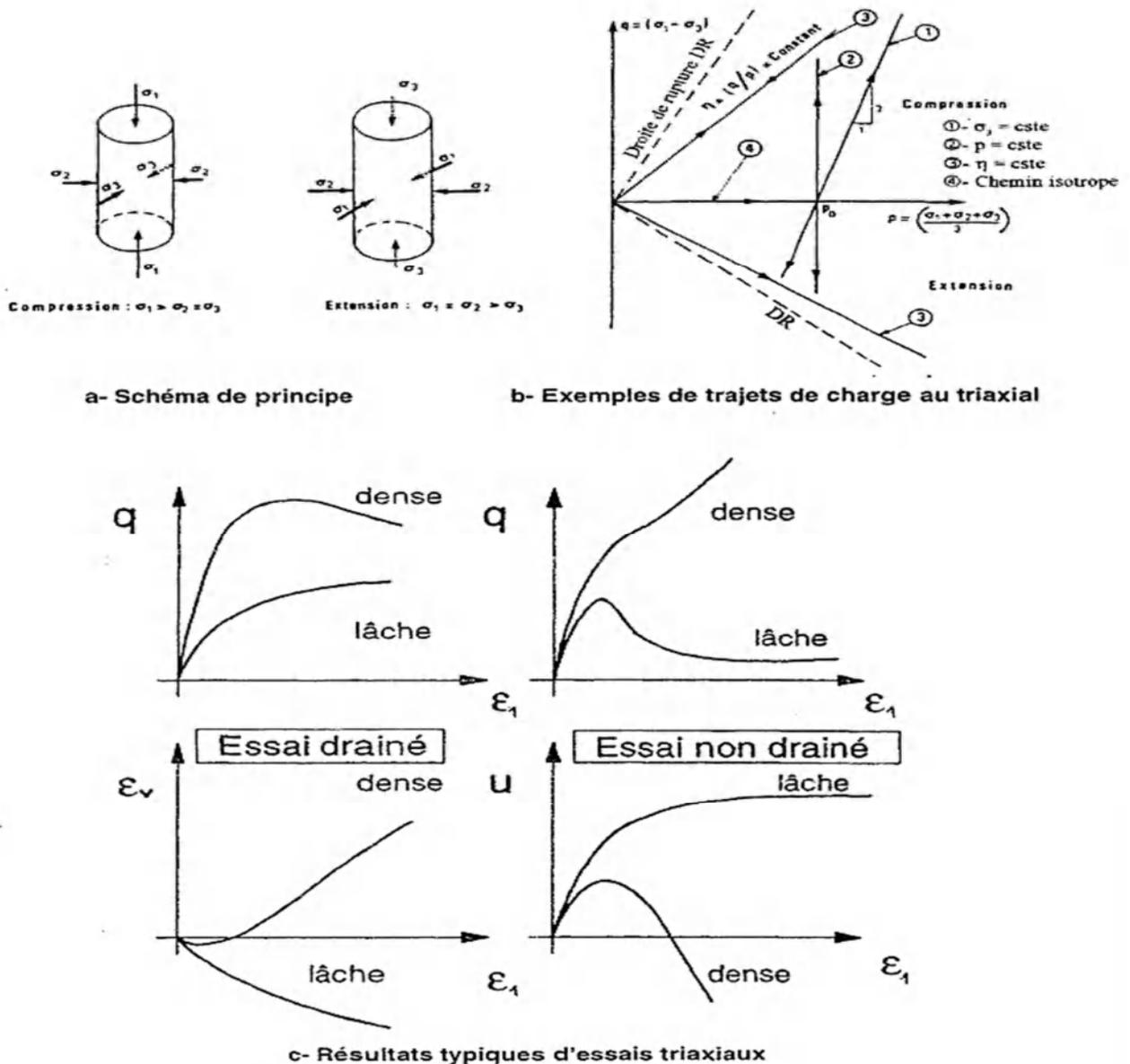


Figure 1.4. Comportement drainé et non drainé d'un sable lâche au triaxial (Cambou et al, 2002).

La cause principale a été l'arrivée sur la côte d'un raz de marée, dû à un éboulement sous-marin au large, qui a fait baisser le niveau de la mer de 3m. La digue s'est alors trouvée en partie hors d'eau et des contraintes de cisaillement supplémentaires se sont exercées sur des veines de sable lâche qui se

trouvaient à la base d'une couche de limon argileux (figure 1.5). Ces couches se sont alors liquéfiées statiquement entraînant la rupture de la digue en deux endroits.

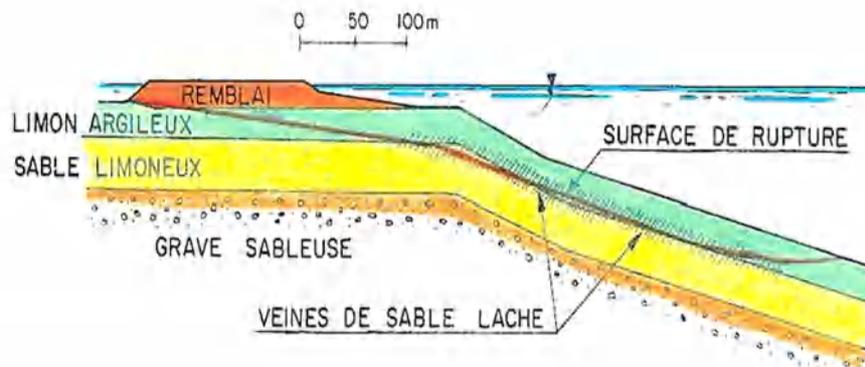


Figure 1.5. Profil géotechnique de la rupture de la digue au port de Nice (Habib, 1994).

Les sols fins

Les argiles très sensibles que l'on trouve au Canada et dans les pays scandinaves ont des sensibilités très grandes, c'est-à-dire des rapports $(C_u)_p / (C_u)_r$, de la cohésion non drainée du sol intact à celle résiduelle du sol complètement remanié, supérieurs à 500 ; c'est dire que l'argile totalement remaniée est liquide. Cela conduit à des glissements spectaculaires par rupture progressive. En outre, avec le temps, la cohésion non drainée des échantillons prélevés mesurée en laboratoire augmente très sensiblement avec le temps, ce qui peut conduire à une grave surestimation de la résistance réelle. Ces argiles ont donné lieu depuis près de 80 ans à de nombreuses recherches. Elles ont montré que ces propriétés sont dues au fait que le dépôt d'argile s'est formé sous la mer, puis qu'il a par la suite émergé et que sa salinité s'est progressivement fortement réduite sous la percolation des eaux de pluie. Au contraire, avec le temps les échantillons prélevés voient leur salinité augmenter.

Les argiles très plastiques, situées au-dessus de la droite $I_p = 0,73 \cdot (W_L - 20)$ et avec $W_L \geq 50$ dans le diagramme de Casagrande, se rencontrent assez fréquemment dans la pratique. Leur particularité est de pouvoir se trouver à côté d'argiles moins plastiques, d'avoir, en ce qui concerne leur cohésion non drainée, une sensibilité assez forte (de 5 à 10) et pour leur résistance à long terme un angle de frottement effectif d'autant plus faible que leur indice de plasticité est plus élevé suivant la droite expérimentale : $(\varphi^\circ) = 38^\circ - I_p$ et $I_p = 20$ à 60. Ces argiles très plastiques sont donc souvent le siège de glissements par rupture progressive et c'est le cas de la majorité des terrains instables dans la région de Constantine. On les rencontre parfois sous forme de couche savon.

L'exemple ci-après est relatif à une rupture de remblai sur sol compressible renforcé par des colonnes pilonnées en laitier concassé de 2,5 m de diamètre et espacés de 6 m pour la construction de la ligne du TGV Est en France. La caractéristique de ces colonnes, qui jouent également un rôle de drains, est que non seulement elles ne pénètrent pas dans les couches résistantes, mais qu'elles ne traversent également pas la totalité de la couche compressible. Il subsiste sous les colonnes environ 0,5m de sol

compressible très compacté et qui ne pose généralement pas de problème. Dans le cas présent, la base de la couche compressible comportait une veine (épaisseur de 0.2m) d'argile (illite) très fortement plastique, qui n'avait pas été détectée lors des campagnes de reconnaissance et dont la sensibilité S_t était de 10. Lors de sa construction qui était prévue par étapes, le remblai s'est partiellement rompu à 6m de hauteur pour une hauteur finale à 11,50m. La pose d'inclinomètres après rupture, effectuée après un léger déchargement/rechargement pour que le glissement reprenne, a révélé (figure 1.6.) que la surface de rupture était passée sous les plots et que l'on était en présence d'une rupture progressive à partir des bords du remblai. La veine d'illite s'était comportée comme une couche savon.

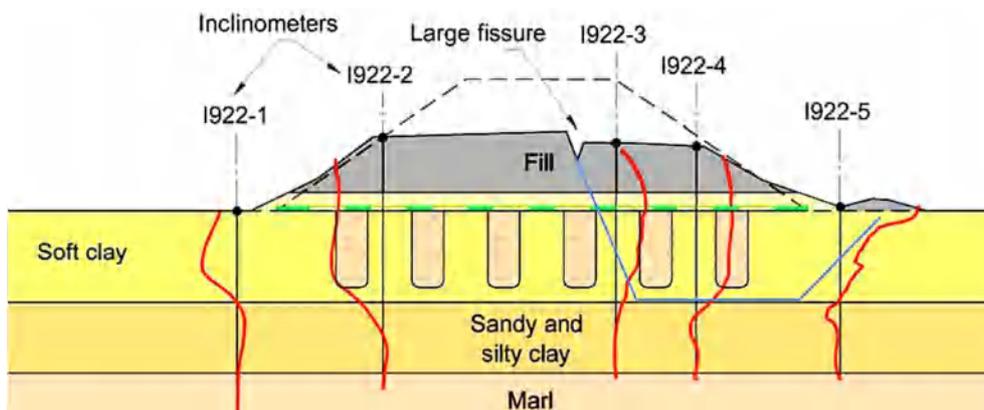


Figure 1.6. Rupture d'un remblai sur sol mou renforcé par plots pilonnés (TGV Paris) (Cui Y.J. et al, 1993).

Dans les domaines de la consolidation primaire due à la dissipation de la surpression interstitielle et du tassement secondaire dû au fluage de leur squelette, les écarts par rapports aux prévisions sont nombreux et parfois très importants. Nous donnons ci-après quelques exemples.

Il est courant de mettre en place des drains verticaux préfabriqués dans un sol compressible pour en accélérer la consolidation. L'expérience a montré que dans un bon nombre de cas ces drains étaient inefficaces. Cela a été prouvé par les résultats de plots d'essai généralement divisés en quatre sections, dont l'une sans drains et les autres avec des maillages différents de drains. Dans un bon nombre de cas, il n'a été trouvé aucune différence entre les résultats des quatre sections. Ces résultats s'expliquent par la présence dans les dépôts de sol mou de fines veines horizontales sableuses qui constituent des drains naturels, en comparaison desquels les drains verticaux n'apportent rien de plus.

Par ailleurs, depuis les premiers remblais expérimentaux des Laboratoires des Ponts et Chaussées en France, dès la fin des années 60, il a été observé que les surpressions interstitielles ne revenaient pas à zéro alors que les tassements de consolidation étaient terminés. De telles observations ne sont pas systématiques, mais sont assez courantes. Elles montrent l'écart existant entre la théorie de Terzaghi et la réalité.

Enfin, il a été observé que les tassements de consolidation primaire sont parfois beaucoup plus importants en place que les tassements calculés. Le cas récent le plus spectaculaire est celui de l'aéroport de Osaka au Japon (Kinsai International Airport) qui a été construit sur une île artificielle en sol remblayé.

Comme indiqué sur la figure 1.7, qui donne le tassement en fonction du logarithme du temps, on observe que le tassement réel en 2002 est de 1,5 m plus important que le tassement calculé. On constate par ailleurs une grande différence de forme entre la courbe calculée et la courbe réelle tendant à montrer que le tassement de consolidation est encore loin d'être terminé. De nombreuses recherches ont été faites par (Leroueil, 2002) à l'université Laval (Québec) sur les effets de la vitesse de déformation d_v/d_t , dont les valeurs sont très différentes en place et à l'œdomètre en laboratoire, qui expliquent de telles différences.

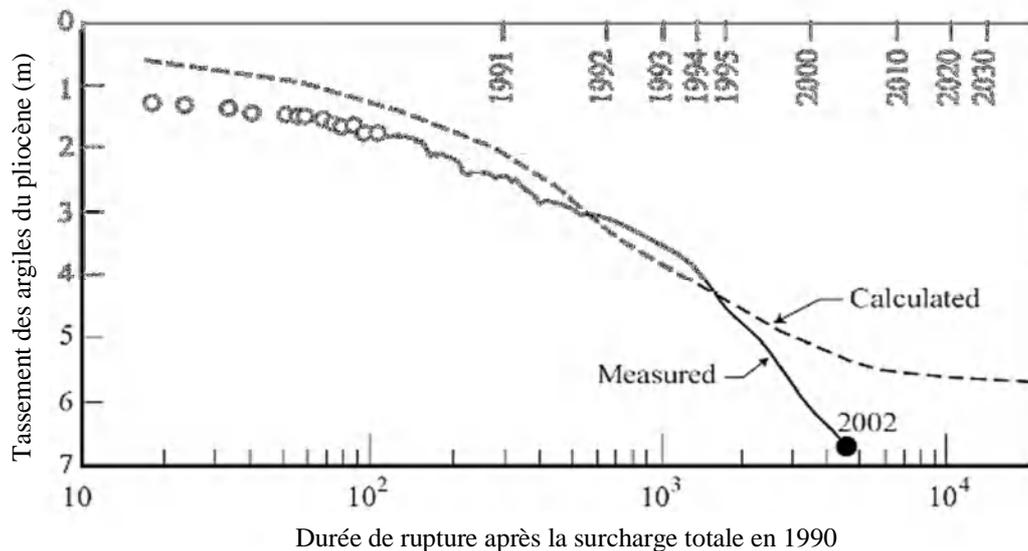


Figure 1.7. Tassements de l'aéroport d'Osaka, (Leroueil, 2002).

En ce qui concerne la prévision des tassements secondaires ou de fluage, certains auteurs ont également montré combien elle était délicate et parfois peu représentative de la réalité (Kabbaj et al., 1986), (Leroueil, 2006). Un exemple est donné par (Zaghouani et al 2009) à propos du retour d'expérience sur les tassements du viaduc de Tunis, 17 ans après sa construction. Alors que l'on observe actuellement un tassement secondaire des remblais des rampes d'accès, fondés directement sur le sol en place, de 25 à 30 cm, les calculs actuels donnent au plus 16 cm et ceux effectués pour la construction avaient donné 5cm.

Les phénomènes de gonflement des sols argileux sous l'action d'arrivées d'eau dans les pays secs, ainsi que ceux du retrait et du tassement de ces sols sous l'action de longues périodes sans pluie dans les pays tempérés, sont également difficiles à estimer, d'autant plus que leurs effets sur les

bâtiments se font surtout sentir par l'intermédiaire de tassements différentiels. On cherche à s'en prémunir en adoptant des solutions constructives qui évitent ces phénomènes.

■ ■ ■ Sols particuliers et remblais

Il faut classer dans ce type de sols à problèmes d'une part les remblais et sols évolutifs, d'autre part les boues minières et industrielles. Citons par exemple dans la première catégorie les scories de haut fourneau qui ont été et restent encore très utilisées, car elles constituent un excellent remblai. Le problème est qu'elles contiennent des nodules de chaux vive qui, avec l'eau qui s'infiltré progressivement, se transforme en chaux éteinte avec augmentation du volume. Le remblai se met alors à gonfler, chaque bloc de scorie se cassant en plusieurs morceaux, avec des conséquences qui peuvent être catastrophiques. Les boues de la deuxième catégorie peuvent alors avoir des comportements très défavorables comme les « boues rouges », résultant du traitement de la bauxite et dont le comportement rappelle celui des argiles très sensibles du Canada.

Le gonflement des sols naturels est spécifique à certains sols argileux. Il est principalement lié aux variations de la teneur en eau et c'est le cas des argiles de la partie Nord-Ouest de Constantine.

A teneur en eau constante, il n'y a pas, ou peu, de variation de volume. Au contraire, indépendamment des variations des contraintes extérieures :

- Lorsque la teneur en eau augmente, on observe un phénomène de gonflement ;
- Lorsque la teneur en eau diminue, on observe un phénomène de retrait- tassement.

L'ensemble des zones géographiques où existent d'importantes variations et déficits saisonniers d'humidité présente donc des phénomènes de gonflement et de retrait de certains sols argileux, indépendamment des actions perturbatrices de l'homme, de la construction ou de la végétation sur le sol.

Toutefois, le gonflement, sera de nature et d'ampleur différente suivant qu'il s'agira d'une argile ou d'une autre, ou d'une même argile dans un état initial ou un autre. Les solutions constructives pour y remédier ou s'y adapter seront différentes dans un cas ou dans l'autre et la minéralogie de ces argiles joue donc un rôle primordial, qui peut donner des indications fondamentales, dans le processus de recherche d'un mode de fondation.

Tout le Nord de l'Algérie est dans une situation "climato – géotechnique" très défavorable, pour au moins les raisons suivantes :

- Les déficits saisonniers y sont la règle et atteignent des amplitudes maximales. En conséquence, la teneur en eau des sols varie dans des proportions considérables et le gonflement résultant en surface est donc maximum ;

- Les argiles minéralogiquement sensibles à ces phénomènes, y sont très répandues, car souvent ce sont ces variations climatiques extrêmes qui sont à l'origine de la formation des minéraux argileux qui constituent les argiles gonflantes.

Le phénomène de gonflement et retrait remet en question la pérennité des constructions et de la voirie.

Le travail de recherche va s'articuler de la manière suivante :

- Identifier et analyser les résultats recueillis des argiles à problèmes présents dans la région d'étude.
- Cartographie des zones sensibles au phénomène glissement de terrain de la ville de Constantine

L'étude de l'éventualité d'une vulnérabilité au risque par l'approche cartographique pour la ville de Constantine concernant les différents sites instables dépendent essentiellement de la géologie de cette région. Ce travail essaye de montrer et d'identifier les caractéristiques physiques de la région, dans le but de connaître les potentialités naturelles des versants à l'instabilité.

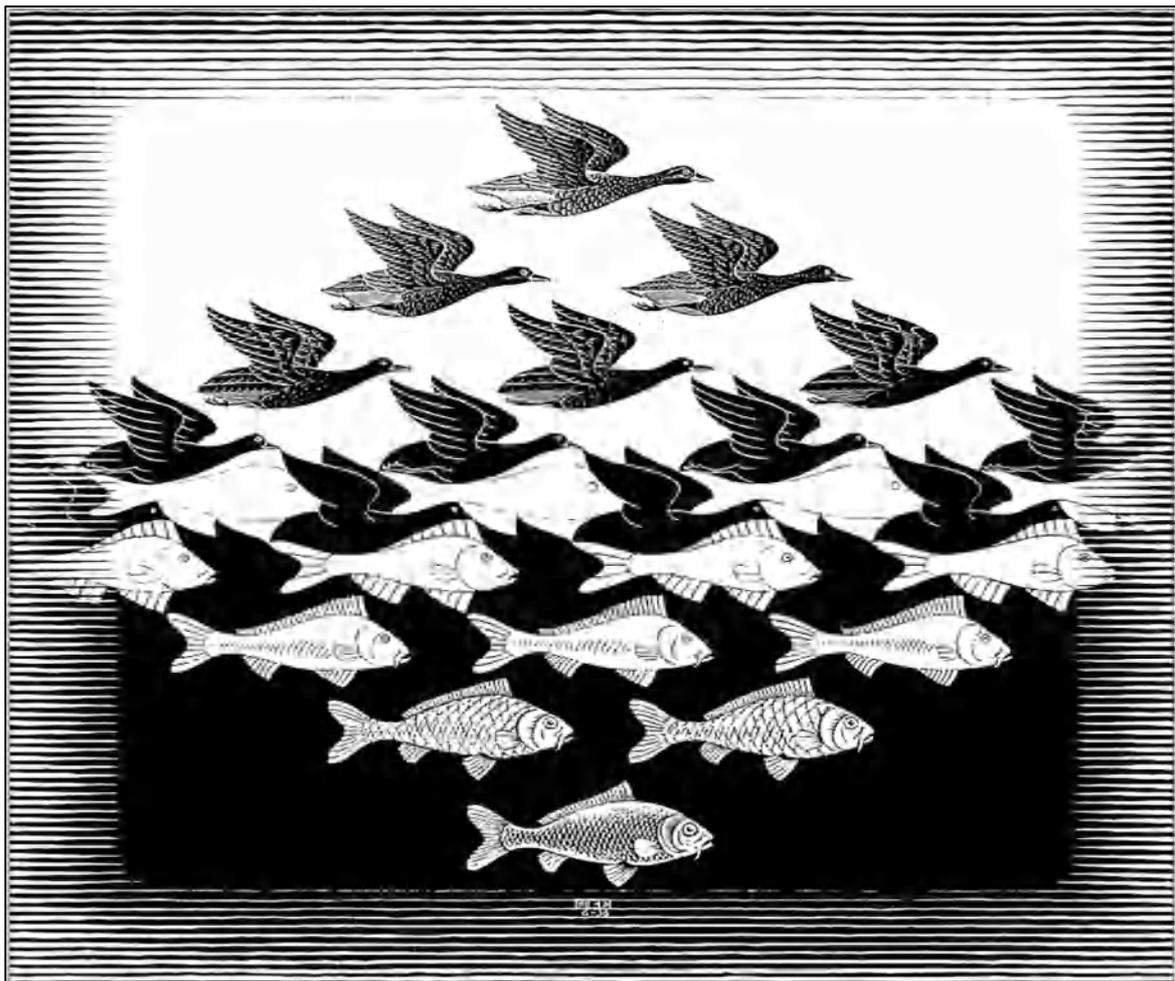


Figure 1.8. Schéma interactif ciel et mer comme pour l'interaction géologie et le sol, (Escher's, 2009).

Historique géologique

La région de Constantine a fait l'objet de plusieurs études géologiques soit sur le plan stratigraphique ou sur le plan structural.

Les résultats de Jolleaud (1912), des terrains de formations crétacé et tertiaire de Constantine ont abouti sur les conceptions allochtonistes et qui sont à l'heure actuelle fortement discutés par les géologues.

Les travaux stratigraphiques du Constantinois de Deleau (1952) ont donné des précisions concernant Djebel Oum Settas. Après une longue période, le travail de Vila (1977) a abouti à une impressionnante série de carte de Constantine au 1/50000 et au 1/200.000. Cet apport a été très important sur le plan structural et stratigraphique. En 1980, il développe l'idée d'allochtonie sur le môle néritique Constantinois.

L'idée des séries ultra telliennes de l'Est Algérien a été développée par Lahondere (1987).

Chadi (1991) remet en cause l'allochtonie des massifs néritique du Constantinois et fait ressortir une évidence sur la continuité dans la sédimentation du crétacé.

Coiffat (1992) a apporté d'autres faits nouveaux concernant la région sur le plan stratigraphique et structural.

La plus récente étude a été faite par Aris (1994) concernant la tectonique et la microtectonique et qui a visé à retracer les différentes phases de déformation et à reconstituer leurs champs de paléo contraint.

La majeure partie du bassin de Constantine s'étend de l'Ouest à l'Est entre la chaîne des Mouai et du Sidi Driss au Nord, et les chaînons du Chettaba, au Sud.

Le système orographique est assez complexe : des chaînons rocheux, courts, brusquement tronqués, forment les crêtes du massif du Chettaba, tronçon d'une chaîne crétacé démantelée dont les anneaux isolés se retrouvent à l'Ouest, au djebel Akhal, et au Nord, dans les rochers du Kheneg.

Le massif de Chettaba se compose d'une crête principale, le djebel Zouaoui (1316 m), et d'une crête secondaire, le karkara (1186 m), auquel se rattache l'arête de chettaba (1090m). Les escarpements abrupts au nord dominant de 400 à 300 mètres la dépression tertiaire, les flancs s'abaissent graduellement au sud- est en contreforts mamelonnés, broussailleux. La zone des collines de l'oued Mellah est dominée par la petite arête d'el hadj-baba (816 m), bordure du plateau pliocène, aux calcaires nuancés de rose, qu'entaille la vallée du Rhumel.

A l'Ouest, le Chettaba se prolonge par un plateau pliocène, d'une altitude moyenne de 1050 mètres, très découpé et démantelé. Le djebel El- Akhal ou Akral (1256 m) est un bossellement rocher,

tronqué au Nord par une faille, auquel s'adosse à l'Ouest un plateau pliocène. Au Nord, le rocher du Kheneg est un compartiment isolé au milieu du bassin tertiaire, de la chaîne crétacé, entaillée par la gorge profonde du Rhumel. Enfin le Rocher de Constantine reste comme un pilier calcaire au flanc du massif gréseux du Djebel El-Ouach.

La dépression tertiaire est une région accidentée de collines mamelonnées aux arbres rares. On y distingue une zone de collines argileuses, de teinte grise ou jaunâtre, et des bandes de mamelons rouges, plus ou moins colorés. Le point culminant atteint 726 mètres à Bou-Ksaiba, vers le centre du bassin. La vallée du Rhumel s'étale dans la traversée de ce bassin entre la gorge étroite de Constantine et l'entaille profonde et sinueuse du Kheneg.

Litho stratigraphie

Trias

Le plus ancien terrain affleurant est le trias qui est essentiellement constitué d'argiles rougeâtres à gypse avec quelques cristaux de quartz. Ils existent localement des calcaires jaunâtres à grisâtres en forme de plaquettes. Le trias n'affleure jamais dans des situations normales mais sous forme de pointements diapiriques dont nombreux jalonnent des accidents tectoniques. Les calcaires dolomitiques triasiques se présentent en gros bancs calcaires au Kef Talaa à la pointe Nord-Ouest de l'affleurement du Chettaba.

Jura

Il n'affleure nulle part dans la région c'est probablement une lacune stratigraphique.

Crétacé

Le crétacé inférieur jusqu'au moyen comporte une série de flysch calcaire centimétrique à dominance microbrechique caractérisé par des plaquettes à des niveaux et sont associés à des marnes à bloc gréseux à la base on rencontre des argiles quartzitoires.

Ces flyschs (intercalations fines des grés, calcaires et schistes) affleurent peu et mal lorsqu'ils apparaissent en surface. Ils ont une structure non continue.

Par conséquent le crétacé inférieur et moyen se présente sous deux aspects qui témoignent de sédimentation d'origines différentes :

- (i) Des dolomies et des calcaires récifaux épais.
- (ii) Des marnes, des marnes schisteuses et des marno-calcaires se sont déposés sur la partie centrale des monts de la région du Constantinois, des sédiments uniquement calcaires ou dolomitiques passant latéralement à des marnes au Nord - Ouest, Nord - Est et Sud - Est, vers le Sud les formations hétérogènes calcaires, marno - calcaires et calcaires noduleux.

■■■■ Crétacé Supérieur et Eocène. Moyen

Dans le Nord - Ouest, il y a une continuité de la sédimentation au-dessus du Turonien, mais au Sud, le Santanien est discordant sur le Cenomano-Turonien.

Oligocène marin (Nappes telliennes) :

Série épaisse à dominance marneuse issue du sillon tellien. On peut voir des argiles verdâtres à grisâtres alternant des marnes et des grés.

Ces nappes telliennes ont été subdivisées en trois unités.

(i) Nappes ultra telliennes

Elles affleurent à la base du massif Numidien au Nord et sont de type marno-calcaire.

(ii) Nappes telliennes sens strict

Débuté au Crétacé supérieur, le Sénonien inférieur est marneux grisâtre avec de minces intercalations de marno-calcaire.

On le trouve dans le synclinal de Texas et au Nord de Djebel Djatta.

- Le Sénonien supérieur est marneux calcaire.
- Le Paléocène est un ensemble d'alternance de marnes noires et marnes calcaires sombres.
- Yprésien et le Lutélien inférieur sont représentés par des calcaires noirs.

La base de cette série contient de rares intercalations marneuses grisâtres ainsi que son sommet.

Le sommet des nappes telliennes est constitué de marnes noires à boules jaunâtres d'âge Lutélien: Ces nappes montrent des structures plus cohérentes qui peuvent être suivies sur plusieurs kilomètres (cas dans la région d'Oued Athmenia et Bounouara). La disposition des plis est de Nord - Est 40° à Nord 90° Est. Les structures plissées ou écaillées sont rapportées à la phase atlasique et la déformation des structures ainsi que le cisaillement basal des séries est attribué à la phase alpine.

D'une façon générale les nappes telliennes se reposent sur les nappes penitelliennes et sur la nappe néritique constantinoise.

(iii) Nappe penitellienne

Des séries de cette nappe assurent la transition entre le faciès néritique constantinois et les séries telliennes septentrionales. Cette série comporte les âges suivants

- Lias et dogger : essentiellement calcaire
- Maln : marneux

■■■■ Crétacé inférieur

Constitué de marne - pelitique. C'est une alternance de pelites, de marne et de micrits puis d'un important banc de marne silteux (environ 100 m)

- Cénomaniens : il s'agit de marne, le passage au Turanien est calcaire.
- Turanien : il commence par un repère à silex noir en petit bancs.
- Sénonien inférieur : est conglomératique au Sud de Djebel Frikitia. Ces derniers ne sont pas cimentés et renferment des blocs de plusieurs mètres de diamètres. Au Nord du foret de Chetaba, ces conglomérats sont beaucoup mieux cimentés.
- Cenonien supérieur : est calcaire. Cette nappe se termine au Paléocène correspondant aux marnes grisâtes ou noirâtres.

La nappe penitellienne avec ces intercalations calcaires à un comportement assez proche de celui des séries des nappes néritiques constantinoises.

■■■■ Nappe Néritique Constantinoise

Elle correspond à l'essentiel de reliefs calcaires de la région "Rocher de Constantine ». Les affleurements les plus importants correspondants aux Djebels "Grouz et Djafia" aux reliefs isolés de la plaine de Teleghma.

Ces séries néritiques sont caractérisées par d'épaisses formations carbonates à caractère de plateforme subsidante.

Cette série commence avec les ères suivantes :

- Trias : calcaire - pelitique affleurant des calcaires schisteux en petit banc à cassures noirâtres. Ils réalisent le faciès de calcaire vermiculé, le sommet de ces termes s'enrichit en pelites rougeâtres à cassure verdâtres, ce sont des schistes violets
- Malm : carbonaté, forme de dolomies noires largement cristallisées, sont surmontés par un banc de calcaire massif.
- Néocomien : formé de calcaire fin et de marne rose suivi de calcaire à silex
- Barrémien : série très épaisse de calcaire dolomitique
- Aptien : commence par du calcaire massif puis du calcaire micritique noir.
- Albien marneux et calcaire : cette dernière ne dépasse jamais 100 m et la transgressivité du Cenomien les réduit parfois à quelques mètres et peut la faire disparaître comme c'est le cas au Nord de Djebel Oum Settas.
- Cénomaniens : calcaire épais, en bancs bien réglés formant la base du Rocher. Les assises supérieures renferment un banc à Néri nées, surmonté d'un banc à Caprines.

- Turanien : série de calcaires rubanés. Assise supérieure des bancs du Rocher de Constantine. Limité conventionnellement à la base par une mince zone marno-calcaire bien marquée.
- Sénonien transgressif : il débute par une discordance de ravinement et des niveaux d'allures microbréchique qui précèdent 20 m de calcaires noires micritique et au-dessus d'une nouvelle surface de ravinement on trouve une formation micrites feuilletés - Marnes calcaires et calcaire marneux passant à des marnes noires à rognons de calcaire jaunâtre, bien caractérisés.

Ses affleurements septentrionaux de la nappe néritique de Constantine possèdent une couverture Senonienne transgressive.

Grisâtre ou jaunâtres analogue à celle qui recouvrent directement le Cénomaniens du versant Nord de Djebel Oum Settas.

Mio – Pliocène

Un conglomérat rougeâtre marque la base du Miocène inférieur marin représenté par des marnes brunes. Le Miocène moyen laguno- lacustre (argiles grises à gypses affleurent surtout dans la dépression séparant Constantine de la chaîne Numidique et le Miocène continental (poutien) formé de dépôts détritiques rougeâtres quelque fois sableuses et des calcaires lacustres à plus ou moins travertins eux. Au Nord de Chetaba les conglomérats dépassent la dizaine de mètres de longueur au-dessus de ces formations on peut distinguer un groupe de terrains restant horizontaux sur faciès généralement colorés en ocre et se sont des argiles, des marnes et des sables. Tous ces dépôts présentent des varices rapides et considérables.

Les éboulis calcaires du pliocène sont des masses importantes de calcaires travertins disloqués et éboulés par affouillement des argiles sous-jacentes, ont été entraînés par glissement sur des pentes des plateaux pliocène ; ils couvrent de vastes surfaces sur les contreforts d'El-Mala et du djebel Akhal, s'étendant en dessous de Mila. Ils ont généralement l'aspect de rochers isolés, noyés dans les argiles, et constituent une zone mixte participant des caractères de deux formations (Benaissa, 1999).

Quaternaire

Il comprend surtout dans cette région des alluvions anciennes des vallées (il s'agit de terrasses caillouteuses et limoneuses, bordant la vallée du Rhumel, dont elles dominent le lit de 30 à 35 mètres ; sans importance dans les ravins secondaires, sauf au pied du djebel Akhal, où elles sont indiquées avec des éboulis des pentes) (galets mêlés d'argiles ou de terres rouges en bordure des reliefs, des croûtes et du tufs calcaire). Les alluvions récentes sont surtout argileuses dans les grandes plaines du Sud et même souvent gypseuses (ancienne surface d'évaporation). Les alluvions récentes limoneuses occupant la vallée du Rhumel et de ses principaux affluents.

Les éboulis de pentes se sont des amas chaotiques de blocs calcaires au pied Nord des escarpements du Karkara et du Zouaoui ; ces blocs ont parfois été entraînés par glissement à une certaine distance de leur origine.

Au pied des grands massifs calcaires, les cônes d'éboulis sont importants. Ils sont fonctionnels, mais ils ont commencé à se former au quaternaire ancien car sur creusés ils laissent apparaître des éboulis consolidés et même des croûtes calcaires.

Les éboulis en masse correspondent à des panneaux de grés numidiens glissés à contre pendage au pied des entablements (sommets) gréseux de la bordure Nord - Est de la région de Constantine.

Les alluvions récentes : sont constitués de limon, gravier et de galet c'est généralement la formation des lits majeur des oueds.

Les alluvions actuelles sont des dépôts de graviers et de sables sur les rives du Rhumel, en aval de Constantine.

Les Terrasses

Elles ne sont caractérisées que le long des oueds.

En conclusion, les conglomérats et les argiles grises à verdâtres du -Miocène, sont les formations les plus répandue dans la partie Ouest de la ville, la zone la plus affectée par les glissements de terrain.

Tableau 1.1. Formations géologiques de la partie Ouest de Constantine, (DUC, 2003).

Les formations géologiques	Superficie en (km²)
Remblais	0.28
Terrasses	2.60
Conglomérat massif (Miocène)	4.88
Dépôt de pente limoneux (quaternaire)	0.15
Argiles grise à verdâtre (Miocène)	3.27
Argile rouge (Miocène)	1.60
Brèche polygénique (Miocène)	0.43
Calcaire lacustre	0.42
Calcaire néritique	0.25
Partie Ouest de la ville de Constantine	13.88

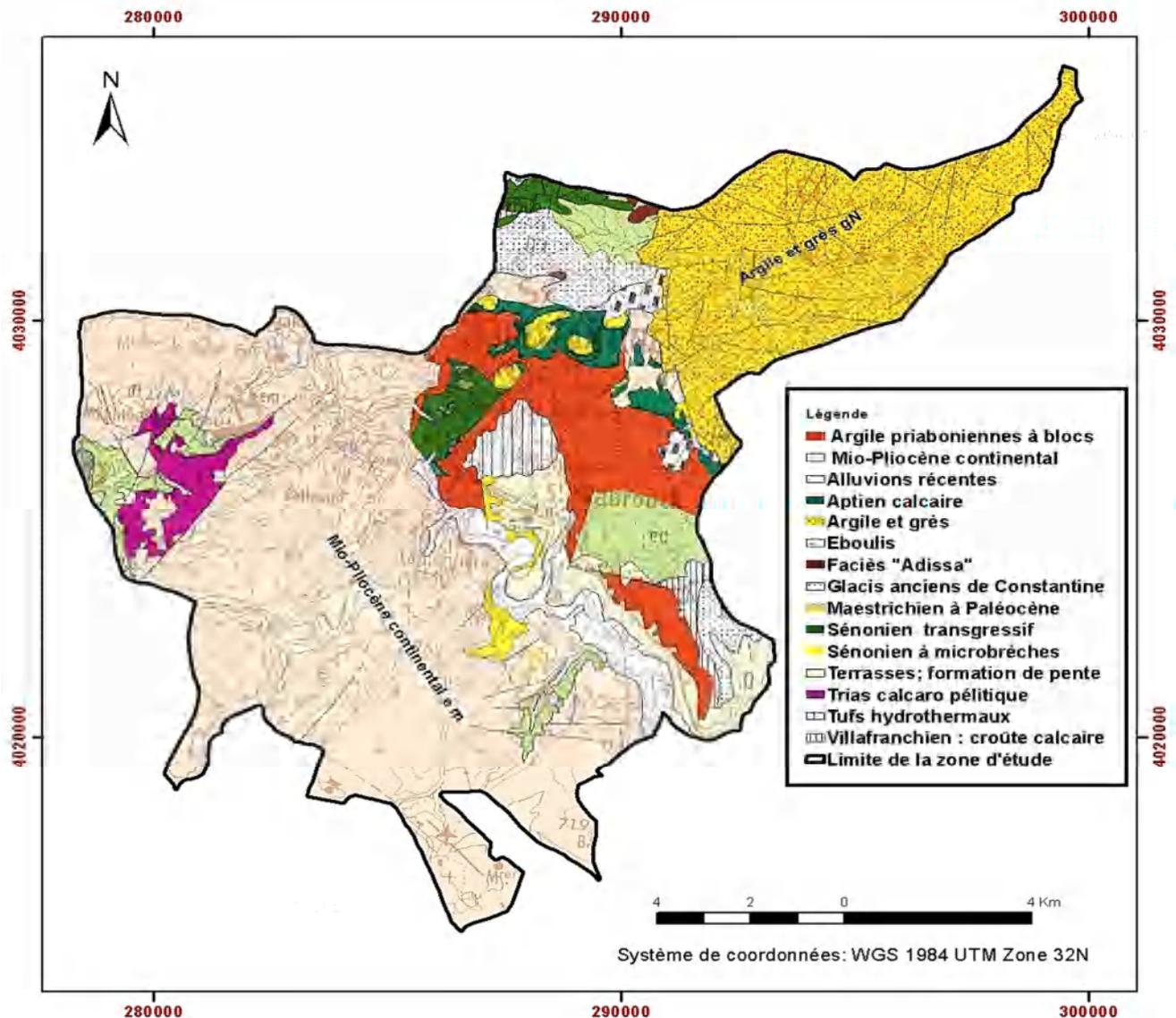


Figure 1.9. Carte lithologique de la zone d'étude, (LN.C.T, MDN, 1998).

■ ■ ■ ■ Aperçu stratigraphique et orogénique

Le caractère le plus saillant de la structure de la région est donné par les failles nombreuses qui isolent les massifs calcaires, en les faisant surgir au-dessus des marnes crétacées. Les dislocations produites par ces failles ont été accompagnées de phénomènes singuliers de compression qui ont amenés de la profondeur des lambeaux du trias dans les conditions les plus inattendues, en les déversant sur les terrains crétacés.

Les deux chaînons principaux du massif de Chettaba représentent les flancs d'un anticlinal à voûte effondrée sous le Sénonien. Au flanc de Karkara, le Sénonien est replié en synclinal aigu, tandis que par une boutonnière dont l'ouverture est partiellement masquée par des dépôts de l'oligocène, le trias avec ses masses de gypses s'est étiré en un pli couché vers l'Ouest dans les marnes du Sénonien. C'est surtout dans le Rocher de Constantine que le jeu de failles a été le plus serré, produisant encore une action à la fin du pliocène, ainsi qu'en témoigne l'existence des lambeaux du Fort de Sidi-Mcid.

Ces dislocations et étirements intenses paraissent antérieurs à l'oligocène, dont les assises affectent une allure assez régulière en un grand synclinal subdivisé en deux plis longitudinaux vers le centre du bassin, sous l'influence probable des massifs de Chettaba et du Kheneg.

Les conglomérats s'étendent fréquemment en transgression sur les argiles à gypses pour remonter sur les calcaires du crétacé (Chettaba et Kheneg).

L'invasion marine helvétique s'est produite sur l'arasement des couches oligocènes.

Les calcaires pliocènes sont disposés en plateformes faiblement inclinées ; sous l'influence des mouvements d'oscillations produits au voisinage des massifs crétacés, ils ont été élevés à des altitudes très diverses. Des fractures nombreuses, dont la plupart sont dues à l'affouillement des argiles sous-jacentes ont disloqué ces calcaires, en entraînant des débris à de grandes distances. Les dernières dislocations, dues à de nouveaux rejets de failles préexistantes, se sont produites à la fin du pliocène.

Dans le massif de Chettaba, des sources nombreuses jalonnent la faille occidentale du djebel Zouaoui, au contact des calcaires aptiens et du sénonien. Elles sont fréquentes, mais peu abondantes, dans la région sénonienne, soit au pied de calcaires de l'étage supérieur, soit au niveau des bancs calcaires intercalés dans les marnes.

Les argiles à gypse constituent un terrain défavorable, tandis que les conglomérats aquitaniens emmagasinent les eaux qui vont sourdre au contact des argiles. Les limites des deux terrains en sont bien jalonnées (ligne des fermes de Ain el kerma). Il en est de même de toute la bordure des affleurements de calcaires pliocènes qui reposent presque partout sur les argiles ; les sources nombreuses et abondantes en relation avec les limites géologiques en sont la plus éclatante démonstration.

Cultures

Les argiles oligocènes constituent une excellente région de terres à céréales, ainsi que les marnes et les grés du smendou ; les graviers et les sables de l'Aquitaniens sont propices à la culture de la vigne, de même que certaines zones friables des calcaires du pliocène. L'abondance des sources produit d'excellents pâturages sur les plateaux des Ouled Rahmoun. Quant aux terrains crétacés, le plus généralement couverts de broussailles et de bois épars, ils n'offrent guère de ressources à la culture que sur les pentes recouvertes d'apports marneux.

Aperçu structural

La morphologie est exceptionnellement accidentée. On se trouve dans la zone nord de l'Atlas Tellien, d'une superficie d'environ 100 km², limitée par des reliefs très rigoureux avec des pentes de 12° à 40°, l'altitude de la région allant de 300m (niveau cours d'eau) à 800 m au sommet des buttes conglomératiques. La tectonique cassante est commandée par la présence des massifs calcaires servant de socle résistant et présentant de grandes fractures d'où l'existence d'un flanc anticlinal et d'un flanc

effondré entre ces masses résistantes. La couverture postérieure est en grande partie marneuse. A la faveur des fractures bordant les masses calcaires, le trias plastique a pu monter par diapirisme. Une ligne de fracture jalonnée d'affleurement triasique particulièrement remarquable est de direction Sud-Ouest au Nord-Est qui se suit depuis le Sud de la station Châteaudun du Rhumel jusqu'à Constantine.

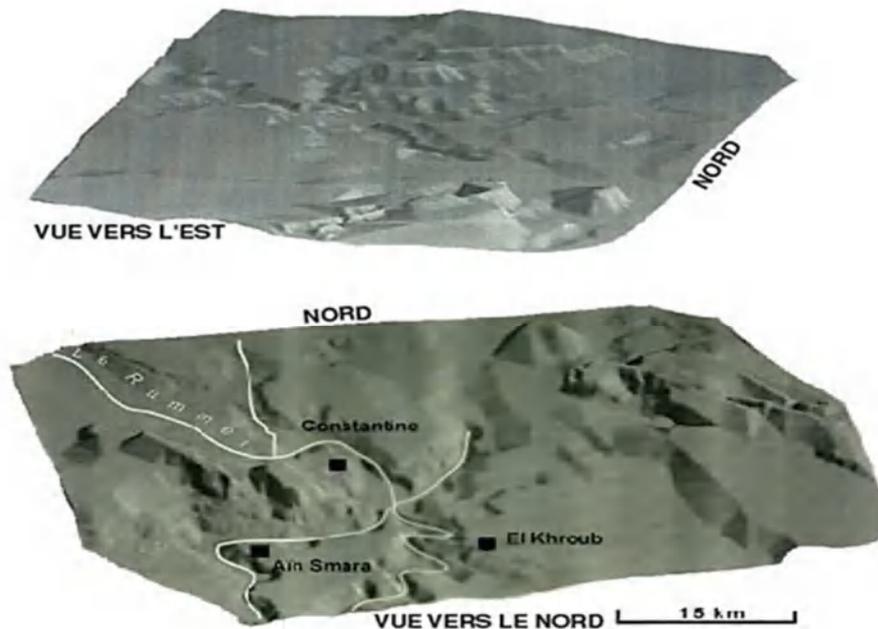


Figure 1.10. Modèle topographique numérique de la ville de Constantine, (Belouar et al, 2005).

Selon la Direction de l'Urbanisme et la Construction de la Wilaya de Constantine, les différentes pentes qui peuvent être classifiées comme suit :

(iv) La catégorie (0 - 5) %

Les terrains sont pratiquement plats localisés à l'Est et au Sud Est de la partie Ouest de la ville, elles sont les plus exposées aux inondations pendant les périodes pluvieuses de l'année. Cette catégorie présente 16.83 % de la superficie totale de la partie Ouest de la ville.

(v) La catégorie (5-10) %

Des terrains de faible pente localisés au Nord-Ouest et au Sud de la partie Ouest de la ville. Cette catégorie présente 1.87% de la superficie totale de la partie Ouest de la ville.

(vi) La catégorie (10 - 20) %

Cette catégorie est largement prédominante, elle présente 52.59 % de la superficie totale de la partie Ouest de la ville.

(vii) La catégorie (20 - 30) %

Elle est localisée au Nord Est de la partie Ouest de la ville, elle constitue 18.58 % de la superficie totale de la partie Ouest de la ville.

(viii) La catégorie plus de 30%

Cette catégorie est localisée dans la partie Ouest de la ville, elle présente 10.04% de la superficie totale.

La classe de pente (10-20) % constitue plus de 52.59% de la superficie totale de la partie Ouest de la ville, en revanche la classe (5-10) % ne constitue que 1.87 % de la superficie totale de la partie Ouest de la ville.

Tableau 1.2. La superficie des pentes dans la partie Ouest de la ville de Constantine, (DUC, 2003).

Catégorie de pente (%)	Superficie (Km ²)	Superficie (%)
(0 - 5)	2.35	16.83
(5- 10)	0.26	1.87
(10-20)	7.30	52.59
(20 - 30)	2.58	18.58
Plus de 30	1.39	10.04
Partie Ouest de la ville de Constantine	13.88	100

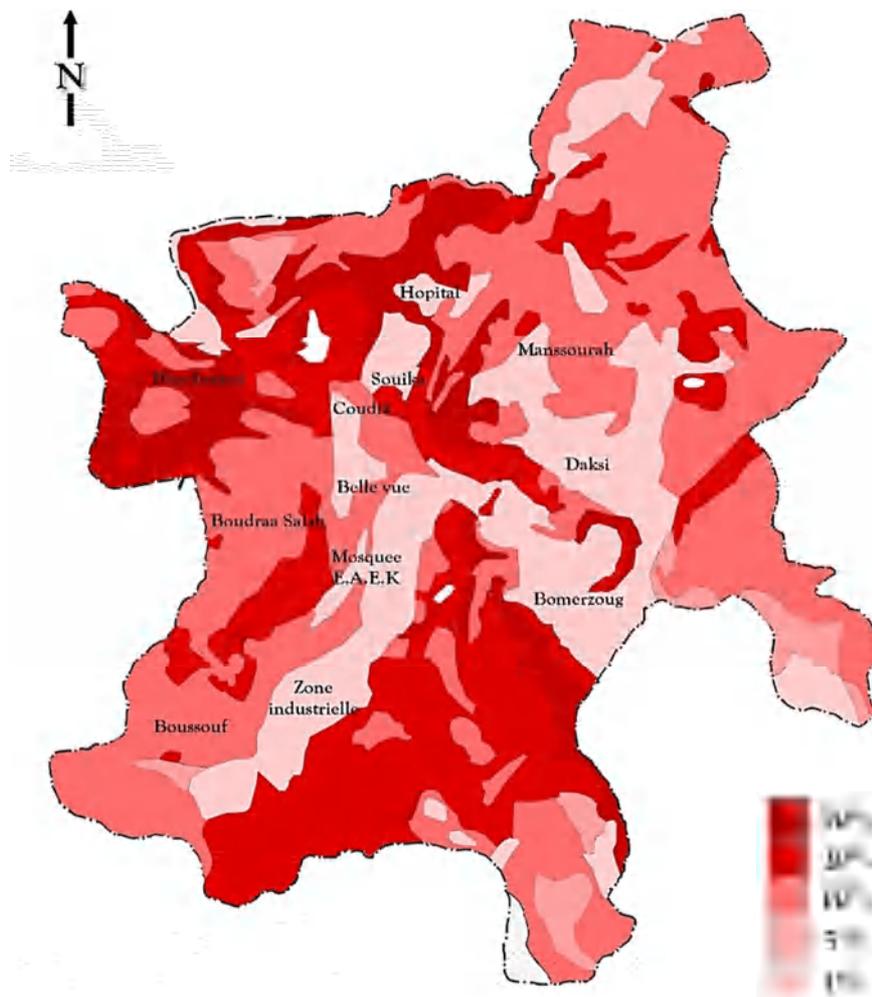


Figure 1.11. La carte des pentes de la ville de Constantine, (DUC, 2003).

■■■■ Aperçu climatologique

Le climat de la région est semi-aride. Il se caractérise par deux saisons distinctes, une période appelée sèche et allant de mi-mai à mi-octobre où les pluies ont un caractère torrentiel, l'autre humide s'étale de mi-octobre à mi-mai avec des pluies fines et pénétrantes sur toute la période hivernale. La pluviométrie annuelle est de l'ordre de 625 mm.

L'interprétation des précipitations journalière maximale sur une durée de 40 ans à la station d'hydraulique montre que les mouvements où les années d'amorce des signes d'instabilité qui ont affecté la région coïncident et sont dues essentiellement aux pluies surtout hivernales qui se sont abattues sur la région. La plus grande majorité de ces mouvements prennent naissance dans les marnes et les conglomérats (Paulsen et al, 1999) et (Evans, 1998).

■■■■ Aperçu hydrogéologique

La rivière principale est le Rhumel dont le bassin versant est situé dans le Constantinois, entre la chaîne littorale kabyle et les massifs méridionaux du Tell. Cette région est soumise à un climat méditerranéen sur sa plus grande partie de la superficie. Les réserves sont importantes et proviennent d'une origine lointaine. Le bassin versant est caractérisé par un réseau essentiellement constitué par d'important affluent réunis dans un cours d'eau principal qui est l'oued Rhumel ; ce dernier provient de la vallée du Rhumel étendue à 86.5 km² et la plaine d'El -Khroub à peu près de 26.5 km². La circulation des eaux se fait sur un chenal d'environ 2m de profondeur et en moyenne un largeur allant jusqu'à 8m. Son régime est variable à cause des saisons contrastées et qui constitue une influence sur son cours d'eau et lui donne un caractère agressif et irrégulier. Donc les oueds façonnent les zones d'accumulations, sapent les berges et emportent les pans entiers des basses terrasses. Ils creusent leurs lits dans des matériaux essentiellement peu cohérents.

Conclusions

Globalement, toute la partie Nord-Ouest de la ville de Constantine est dans une situation "climato –géologie-topographique- hydrologique et géotechnique" très défavorable, pour au moins les raisons suivantes :

- Les déficits saisonniers y sont la règle et atteignent des amplitudes maximales. En conséquence, la teneur en eau des sols varie dans des proportions considérables et le gonflement résultant en surface est donc maximum ;
- Les argiles minéralogiquement sensibles à ces phénomènes, y sont très répandues, car souvent ce sont ces variations climatiques extrêmes qui sont à l'origine de la formation des minéraux argileux qui constituent les argiles gonflantes.
- La topographie accidentée laisse naître des terrains avec des talus à la limite de la stabilité.
- L'existence des réseaux d'assainissement défectueux favorise les instabilités.

En plus d'une géologie de la région de Constantine constituée de :

- Les terrasses alluviales limoneuses du Quaternaire
- Formations argilo marneuses contenant des passages lenticulaires de sables du Pliocène favorisant le développement des pressions hydrostatiques ;

Tous ces types de constatations ont un effet direct sur le comportement des sols de la région de Constantine d'où l'existence de sols à problèmes.

Sans pour autant parler une activité néotectonique très développée contribuant à un véritable "pré découpage" des versants.

La prédominance des formations de consistance meuble par opposition aux formations plus rocheuses.

Ces éléments ont joué un rôle très important contre la stabilité des versants, ce qui a engendré une dégradation du milieu urbain.

Il est donc nécessaire de connaître les caractéristiques de ces sols sensibles par les résultats des essais géotechniques réalisées par différentes institutions et recueillis par nous-mêmes pour être analysés et exploites dans des fichiers en Excel et interprétés par le modèle à l'état critique de la mécanique des sols afin de pouvoir parler d'une vulnérabilité au risque à l'aide d'une cartographie avec ArcGIS pour la région d'étude.

CHAPITRE 2

TYPOLOGIE ET CARACTERISTIQUES DES GLISSEMENTS DE TERRAIN AFFECTANT LA VILLE DE CONSTANTINE

« S'il est ingénieux il pourra se former quelque image du mécanisme, qu'il rendra responsable de tout ce qu'il observe, mais il ne sera jamais sûr que son image soit la seule capable d'expliquer ses observations. Il ne sera jamais en état de comparer son image avec le mécanisme réel, et il ne peut même pas se représenter la possibilité ou la signification d'une telle comparaison. Il pourra aussi croire à l'existence d'une limite idéale de la connaissance que l'esprit humain peut atteindre. Il pourra appeler cette limite idéale la vérité objective ».

Albert Einstein, Léopold Infeld. L'évolution des idées en physique.

Chapitre 2

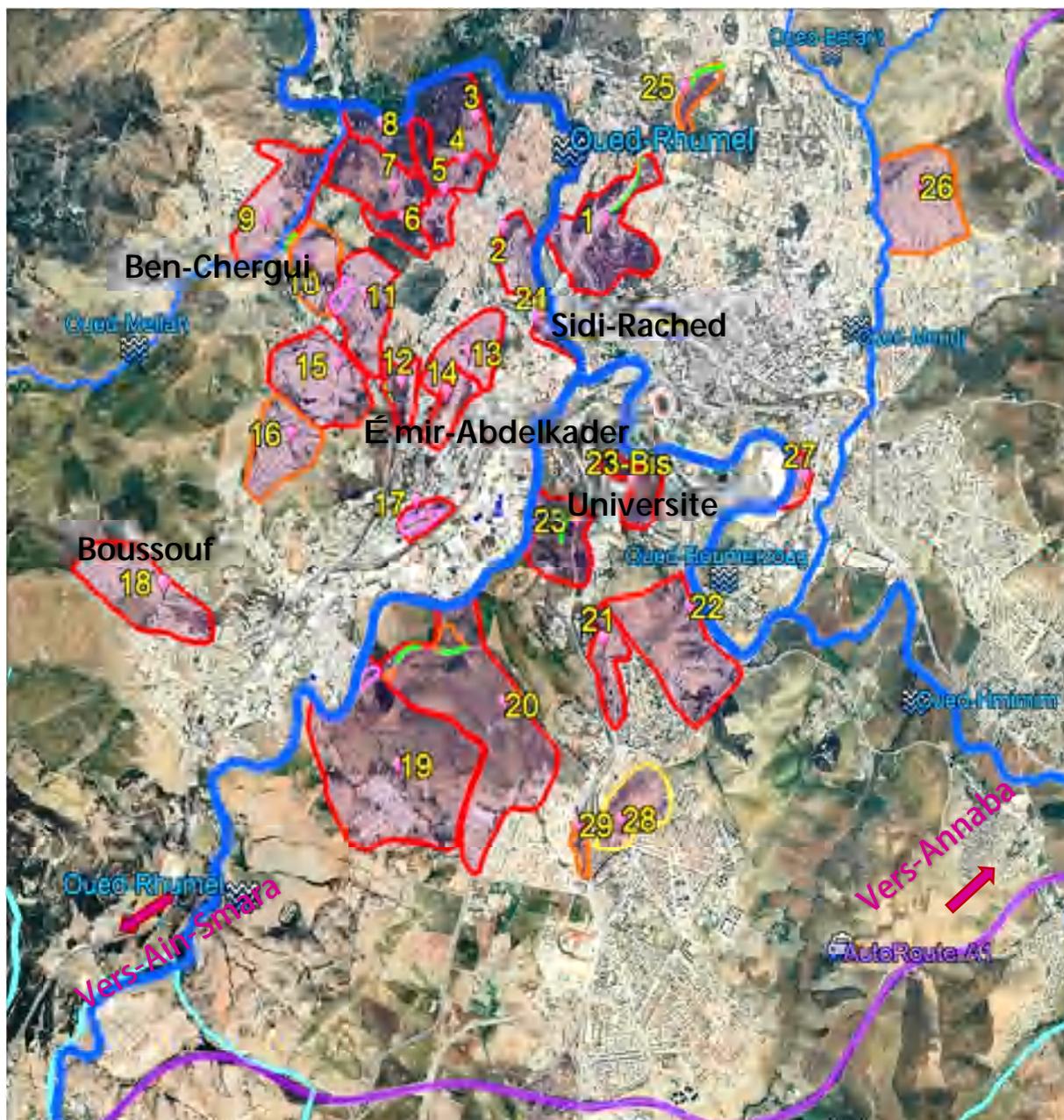
Typologie et caractéristiques des glissements de terrain affectant la ville de Constantine

1.1 Introduction

Les glissements de terrains qui guettent la ville de Constantine et lui fait encourir un danger réel et imminent d'une catastrophe à grande échelle. Ces mouvements sont très anciens et se réactivent quand l'occasion se présente. Ils couvrent une surface totale d'environ 1.230 ha touchant environ vingt-neuf (29) sites à savoir : 01 Sidi Rached, 02 Bardo, 03 Chemin des Chutes, 04 Aouinet-Foul, 05 Saint Jean Kitouni , 06 Boufenara-Cimetière, 07 Maquisard, 08 El-Menia, 09 Ben-Chergui , 10 Hattabia-Bachir-Samir, 11 Boudraa-Salah, 12 Ciloc, 13 Bellevue, 14 Mosquée et l'Université Islamique Émir Abdelkader, 15 Cité El-Bir, 16 Zaouch, 17 Les-Terrasses, 18 Boussouf, 19 El-Hadaba, 20 Contournement-Sud, 21 Dnc-Paramédical, 22 Chaabat-Erssas, 23 Université Mentouri, 24 CPA-Transatlantique, 25 Boulevard ALN-Mansourah, 26 Serkina, 27 Boumerzoug, 28 Eucalyptus-Siège-Air-Algérie et 29 Eucalyptus, qui constituent l'inquiétude de l'heure comme le montre la figure.2.1.

1.2 Typologie de certains glissements de terrain de Constantine

A cet effet, les mouvements de terrains dans cette région ont été enregistrés vers 1935, bien avant l'urbanisation qui a réactivé les glissements de terrain. Mais les véritables grands dommages ont commencé en 1972, dans le quartier de Kaïdi Amirouche, quand le processus d'urbanisation, enclenché pendant cette décennie, s'est accru et souvent de façon anarchique. Au lieu de se stabiliser, les déplacements du sol ont connu un regain d'activité avec l'effondrement en décembre 1993 d'une soixantaine de maisons dans le secteur Kitouni et Kaïdi après une période particulièrement pluvieuse (Paulsen et al, 1999). On peut en citer quelques-uns entre eux.



01 Sidi-Rached,	11 Boudraa-Salah,	20 Contournement-Sud,
02 Bardo,	12 Ciloc,	21 Dnc-Paramédical,
03 Chemin-des-Chutes,	13 Bellevue	22 Chaabat-Erssas,
04 Aouinet-Foul,	14 Mosquée et l'Université	23 Université Mentouri,
05 Saint-Jean-Kitouni,	15 Cité El-Bir,	24 CPA-Transatlantique,
06 Boufenara-Cimetiere,	16 Zaouch,	25 Boulevard ALN-Mansourah,
07 Maquisard,	17 Les-Terrasses,	26 Serkina,
08 El-Menia,	18 Boussouf,	27 Boumerzoug,
09 Ben-Chergui,	19 El-Hadaba,	28 Eucalyptus-Siège-Air-Algérie,
10 Hattabia-Bachir-Samir,		29 Eucalyptus.

Figure 2.1. Principales zones de glissements localisés dans le périmètre urbain de la ville de Constantine.

Université Mentouri

Le terrain se situe sur une colline entre la route N°79 et le chemin wilaya N°175. L'Est du bâtiment universitaire (blocs des classes) établi entre 1973-1975 au-dessus de l'institut de technologie et fondé sur des pieux de quatorze mètres (14m). De graves fissures, des inclinaisons et des courbures du terrain ainsi qu'à la route voisine se sont produites par des déformations de la pente. Dans la partie moyenne du bâtiment on voit des tassements et des translations. Ces mouvements ont commencé en environ de l'année 1985.

Les surface de glissement du terrain à l'avant du bâtiment ne se trouvent probablement pas plus bas que douze mètres (12m) sous le bord supérieur de terrain.

L'existence des eaux ont créé beaucoup de problèmes de stabilisons et afin d'éviter cela, il est nécessaire d'utiliser des corps d'appui de terre stabilisée, Benayoun et Belouar.

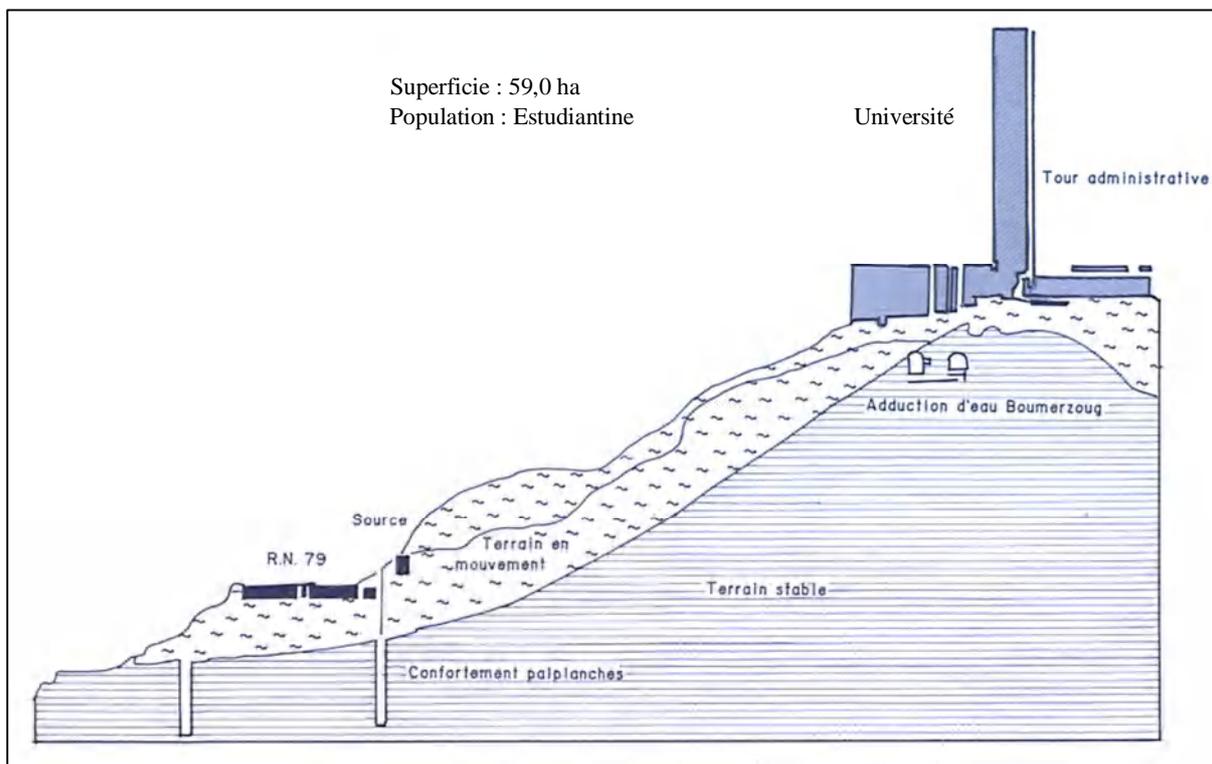


Figure 2.2. Ligne probable du glissement de terrain du site de l'université Mentouri de Constantine coté Oued Rhumel (Belouar 2005).

Fiche Descriptive	
Pays	Algérie
Ville	Constantine
Site	Université Mentouri
Contexte Géologique	Conglomérats + Argile peu ou pas consolidée avec présence d'eau
Surface (Hectare)	60,0
Altitude (m)	521
Pente (%)	16,6
Longueur (m)	625
Largeur (m)	82

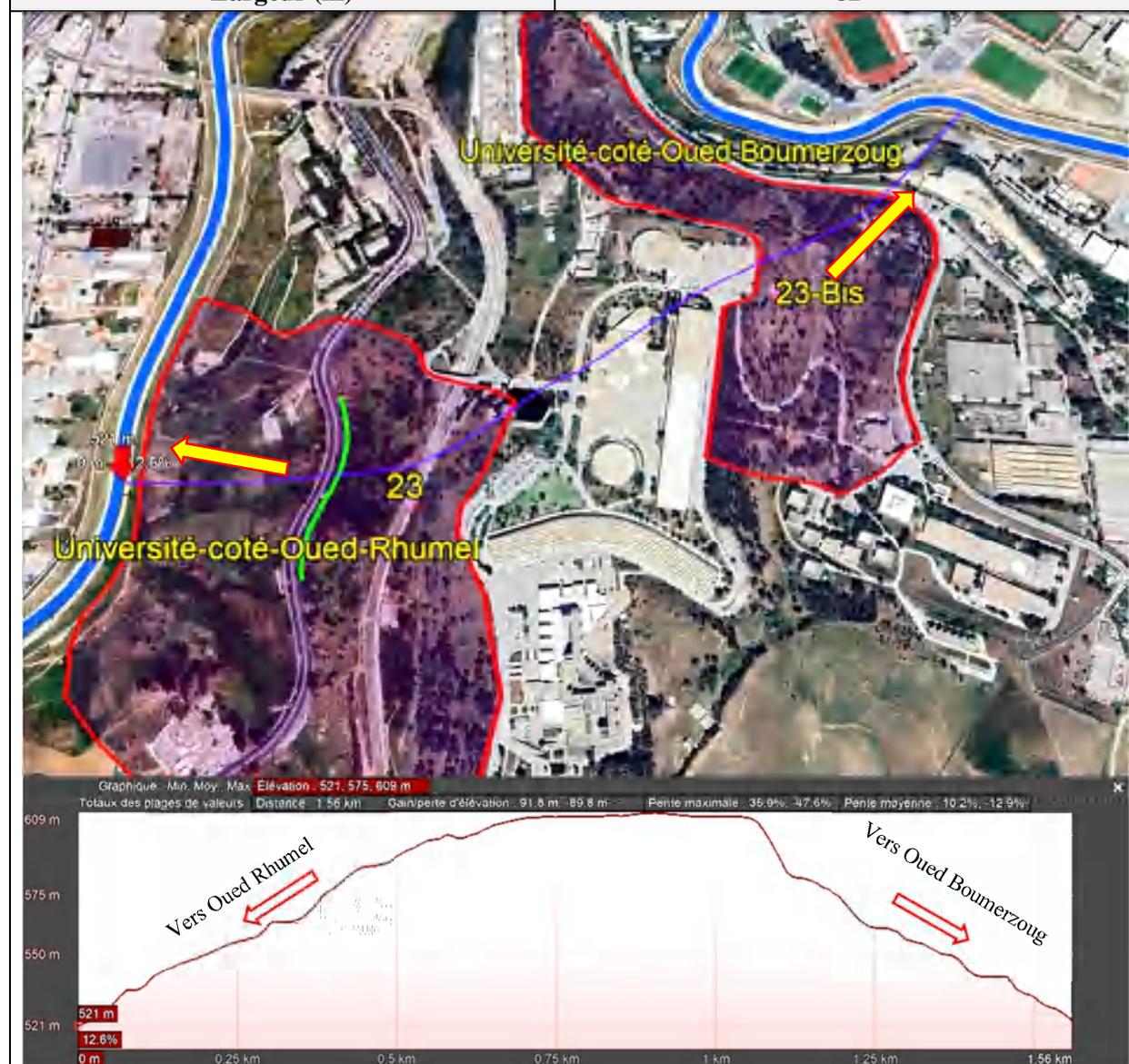


Figure 2.3. Profil donnant la pente du talus avec une vue d'ensemble du site de l'université Mentouri de Constantine coté Oued Rhumel et coté Oued Boumerzoug.



Figure II.4. Façade Est du bloc des classes affaissement de la chaussée au niveau du remblai autour des amphithéâtres.



Figure II.5. Des dégradations de la voirie et du parking coté Est du bloc des sciences.



Figure II.6. Arbres inclinés et caniveaux défectueux vers Oued Rhumel.



Figure II.7. Décrochement du talus vers Oued Bumerzoug.



Figure II.8. Décrochement avec inclinaison de certains arbres vers Oued Bumerzoug.



Figure II.9. Affaissement et éboulement du talus vers Oued Bumerzoug.

■■■ Cité Boussouf

La cité a été construite en 1984 sur une terre agricole, l'extension de la ville vers à la partie Nord- Nord- Ouest où se trouvent des terrains géologiquement constitués de conglomérats hétérogènes peu ou pas consolidés et où de nombreux dépôts d'eaux existent dans les pentes et qui ont créés des sillons d'érosion et un ramollissement des parties argileuses silteuses dans les conglomérats. La majorité des immeubles élevés ont été fondés sur des pieux allant jusqu'à vingt mètres (20m) de profondeur Belouar et al. Pour éviter ce type de problèmes il faut drainer les eaux dans des canalisations et à adoucir les pentes.

Le phénomène de ventrage des murs de soutènement dans toute la cité Boussouf en est un bon exemple. Avant l'urbanisation, le site est caractérisé par un relief ondulé et moutonné. Actuellement, il recèle une série de glissements de terrain circulaires, caractérisés par leurs talus raides en tête suivi en contre bas par une morphologie ondulée de la masse glissant. Au niveau de la crête Ouest du talweg Est du site, une instabilité se dessine nettement dans l'espace par un déplacement vertical maximum. Il se situe en prolongement de glissement de terrain actif, dont la partie supérieure été consolidée par des gabions. D'autres glissements de terrain ont été localisés à deux cent mètres (200m) au Sud et à cent vingt mètres (120 m) au Sud-Ouest constituent un danger sur les constructions en amont et celles situées en aval (DUC, 2003). Les causes de l'instabilité sont dues à la combinaison des facteurs naturels et anthropiques. En effet les glissements de terrain, se déclenchent dès que les pentes avoisinent ou dépassent les dix pourcent (10 %). Ils se manifestent dans la partie supérieure altérée et décomprimée des argiles du Miocène dont l'épaisseur est variable entre cinq à dix mètres (5 à 10m), avec la présence du gypse qui contribue à la prédisposition des argiles au glissement.

L'obstruction du réseau naturel de drainage des eaux superficielles, qui génèrent un ravinement actif, où la stagnation peut engendrée d'autres glissements de terrain. Effet de l'urbanisation a accéléré le phénomène des glissements de terrain, par le passage des gros engins sur les versants à formation argileuse durant la période de la construction du site. La mise en charge de ces versants par des surcharges à entraîner la perte de stabilité du sol et provoquer des mouvements de terrain (URBACO, 1981).

Les différents travaux d'aménagements réalisés sur site, ont entraîné la reprise de quelques glissements. Actuellement des fissures de traction ont été observées sur des versants du site, elles peuvent présenter un grand danger dans le futur. Elles doivent être envisagées très tôt par les services techniques de la direction de l'urbanisme et de la construction (DUC, 2003) pour que puissent être prises en compte à temps pour prendre les mesures de sécurité nécessaires.

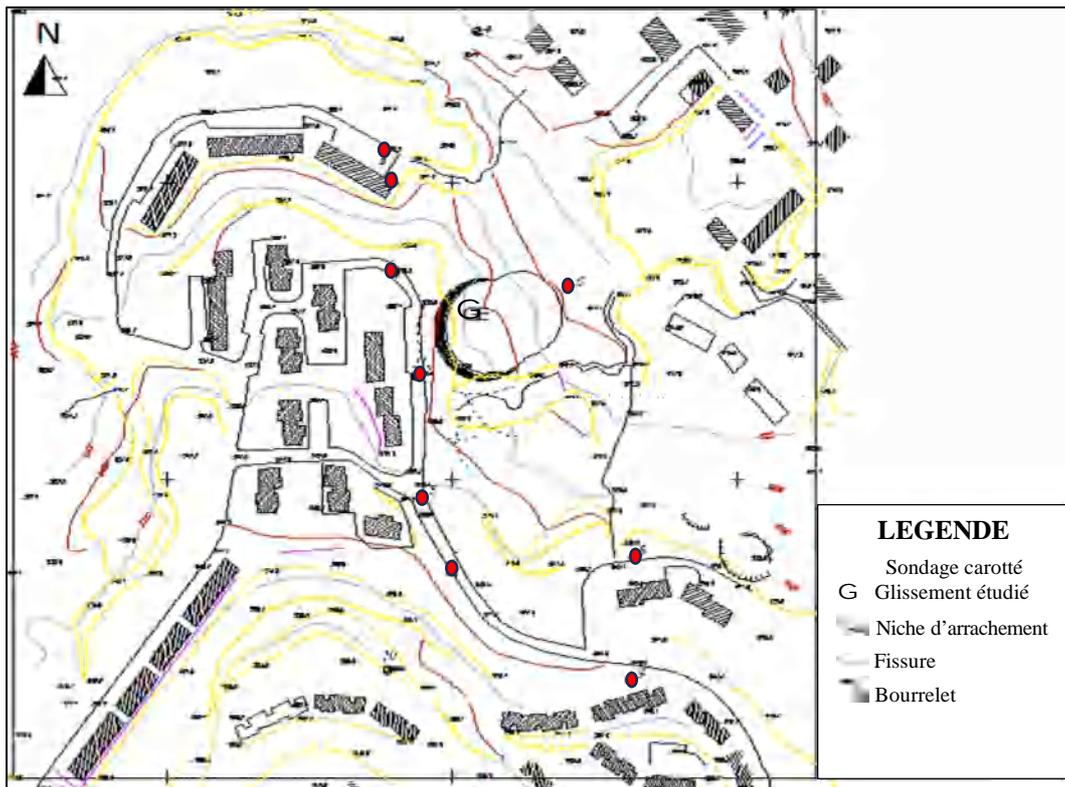


Figure 2.10. Plan d'implantation des sondages carottés au site Boussouf (Belouar 2005).

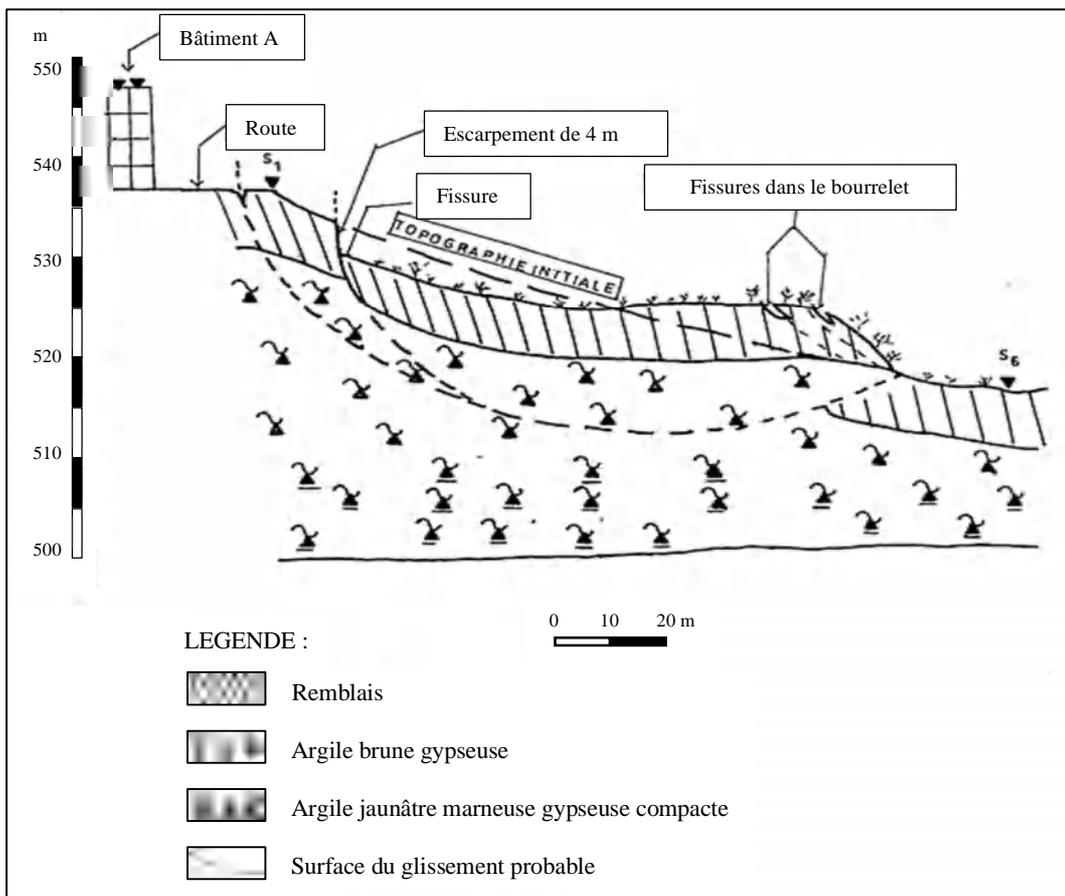


Figure 2.11. Rupture probable d'un des glissements du site de Boussouf (Belouar 2005).

Fiche Descriptive	
Pays	Algérie
Ville	Constantine
Site	Boussouf
Contexte Géologique	Remblai et argiles brunes gypseuses
Surface (Hectare)	107,0
Altitude (m)	550
Pente (%)	13,8
Longueur (m)	1.851
Largeur (m)	680



Figure 2.12. Profil donnant la pente d'un des talus de la zone de la cité Boussouf avec une vue d'ensemble du site.



Figure 2.13. Basculement du mur de soutènement avec l'ouverture du joint.



Figure 2.14. Basculement des bâtiments avec l'ouverture du joint.

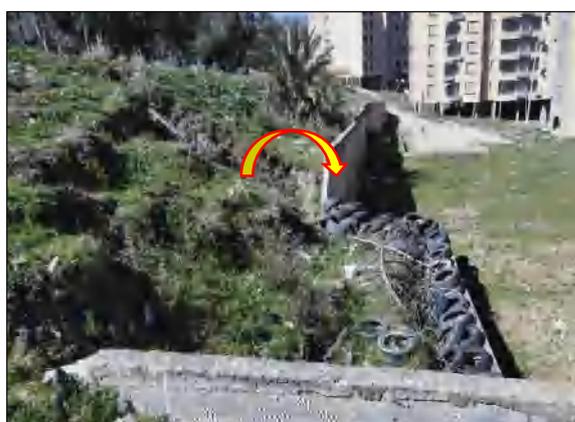


Figure 2.15. Renversement du mur de soutènement.



Figure 2.16. Dégradation de la route cite Boussouf.



Figure 2.17. Immeubles de la III tranche menaçant ruine (photo prise en février 2023), tous les habitants ont été évacués.

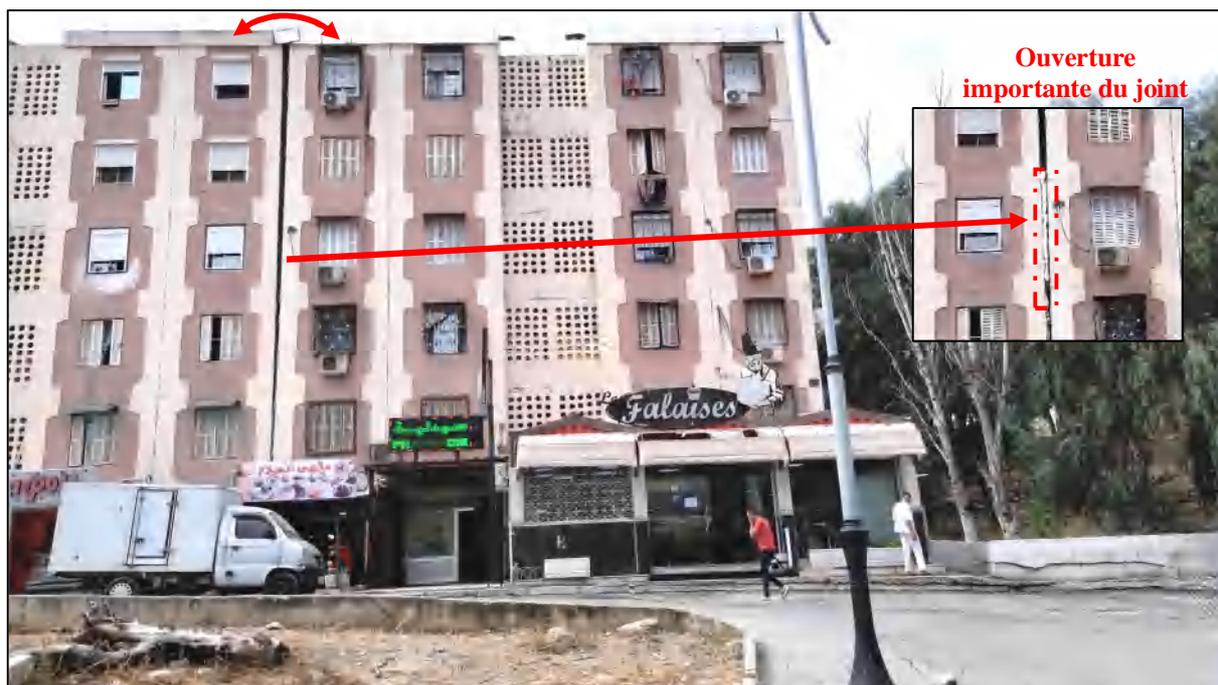


Figure 2.18. Basculement des immeubles menaçant ruine (photo prise le 8 septembre 2023), tranche I cite Boussouf.



Figure 2.19. Apparition des affaissements de la voirie et remplissage par du bitume.

2.2.1. Complexe d'habitation du Ciloc

Constitué de cinq (05) bâtiments de cent vingt (120) logements chacune, fondés sur pieux de quatorze mètres (14m) de profondeur, situé à l'Ouest de la rue Kaddour Boumeddous, la pente adjacente s'oriente vers l'Ouest respectivement vers le Sud- Ouest. Les désordres ont commencé à apparaître en 1987 à l'arrière-plan du bâtiment B, ces déformations se répercutent même au niveau de la route RN 27.

Sur la droite du glissement au Nord–Ouest (direction du regard vers la vallée), il y a des couches de conglomérats hétérogènes lesquelles se sont superposés sur des remblais. La superficie du glissement s'est formée dans une couche d'argile limoneuse en s'inclinant vers le Sud–Est. L'installation d'inclinomètres sur toute l'étendue du terrain n'a pas donné les résultats escomptés et ceci est dû essentiellement à la notion du monitoring et mesurage, néanmoins certaines mesures inclinométriques ont donné une surface de glissement entre huit et douze mètres (8 à 12m) de profondeur (Benaïssa,).

L'action d'enlèvement d'arbres sur tout le talus après l'indépendance (anthropique) a remis le phénomène en marche. La réalisation d'une plateforme en béton armé fondée sur pieux pour stopper éventuellement le glissement en cours a freiné un peu le mouvement. La zone à consolider devrait être fixée par d'autres mesures géotechniques et géophysiques.

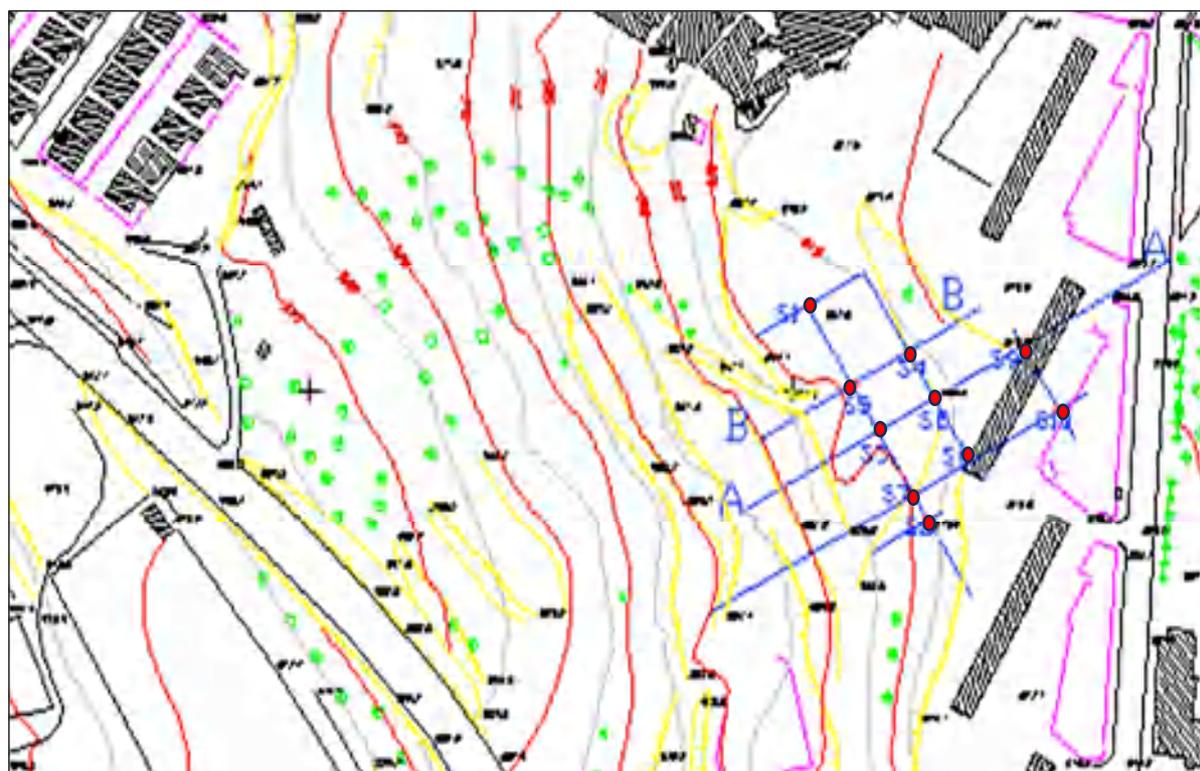


Figure 2.20. Plan d'implantation des sondages sur le site du Ciloc (Belouar 2005).

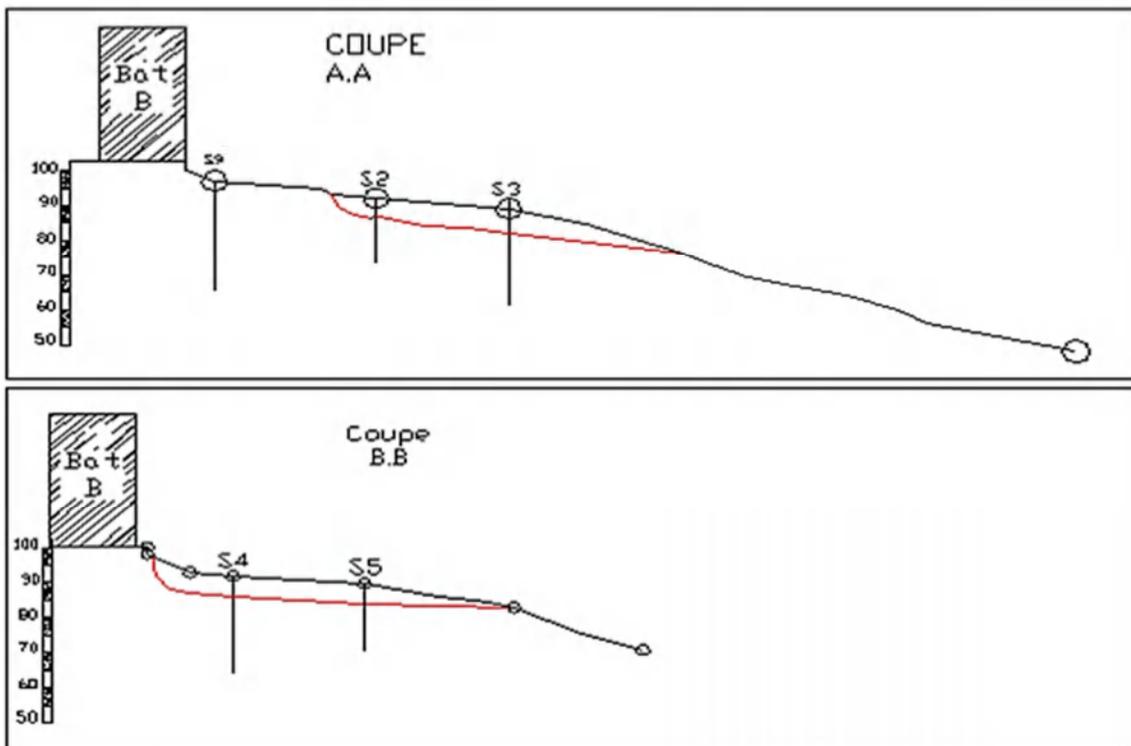


Figure 2.21. Représentation des lignes de rupture probables pour le complexe d'habitation Ciloc avec les inclinometres dans les sondages proposées (Belouar 2005).

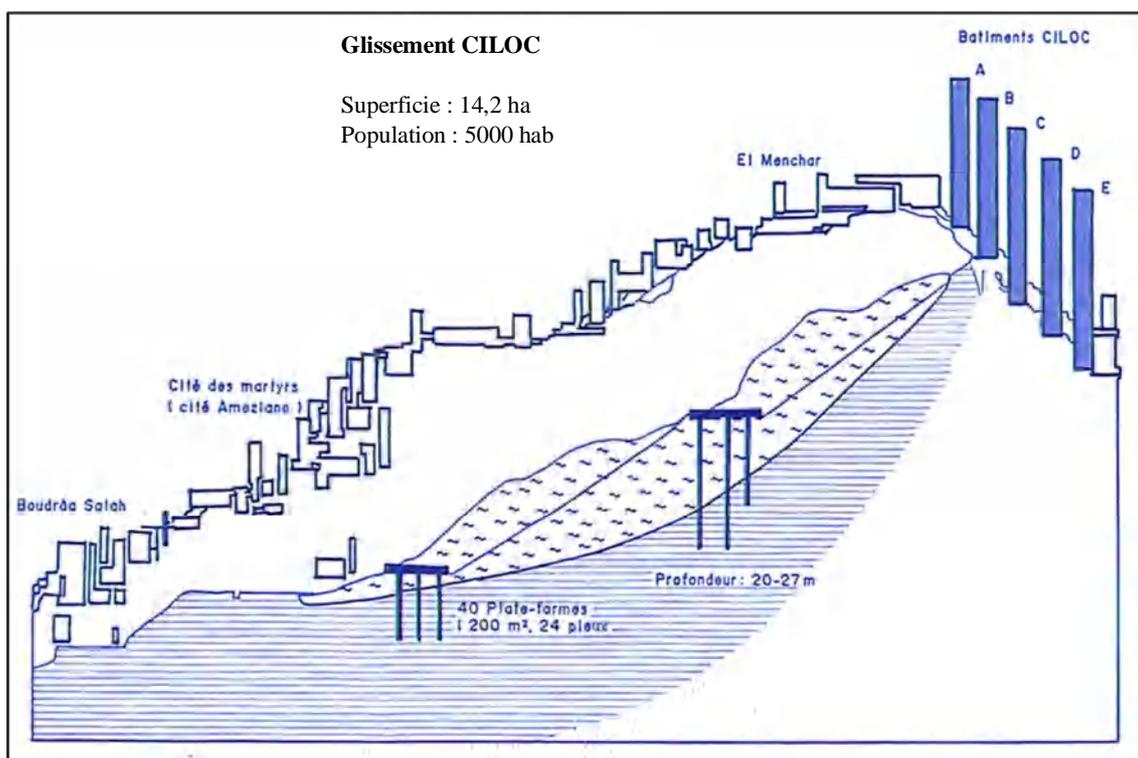


Figure 2.22. Représentation des lignes de rupture probables pour le complexe d'habitation Ciloc avec les supposées travaux de confortements par dalle en B.A plus les piéces (Belouar 2005).

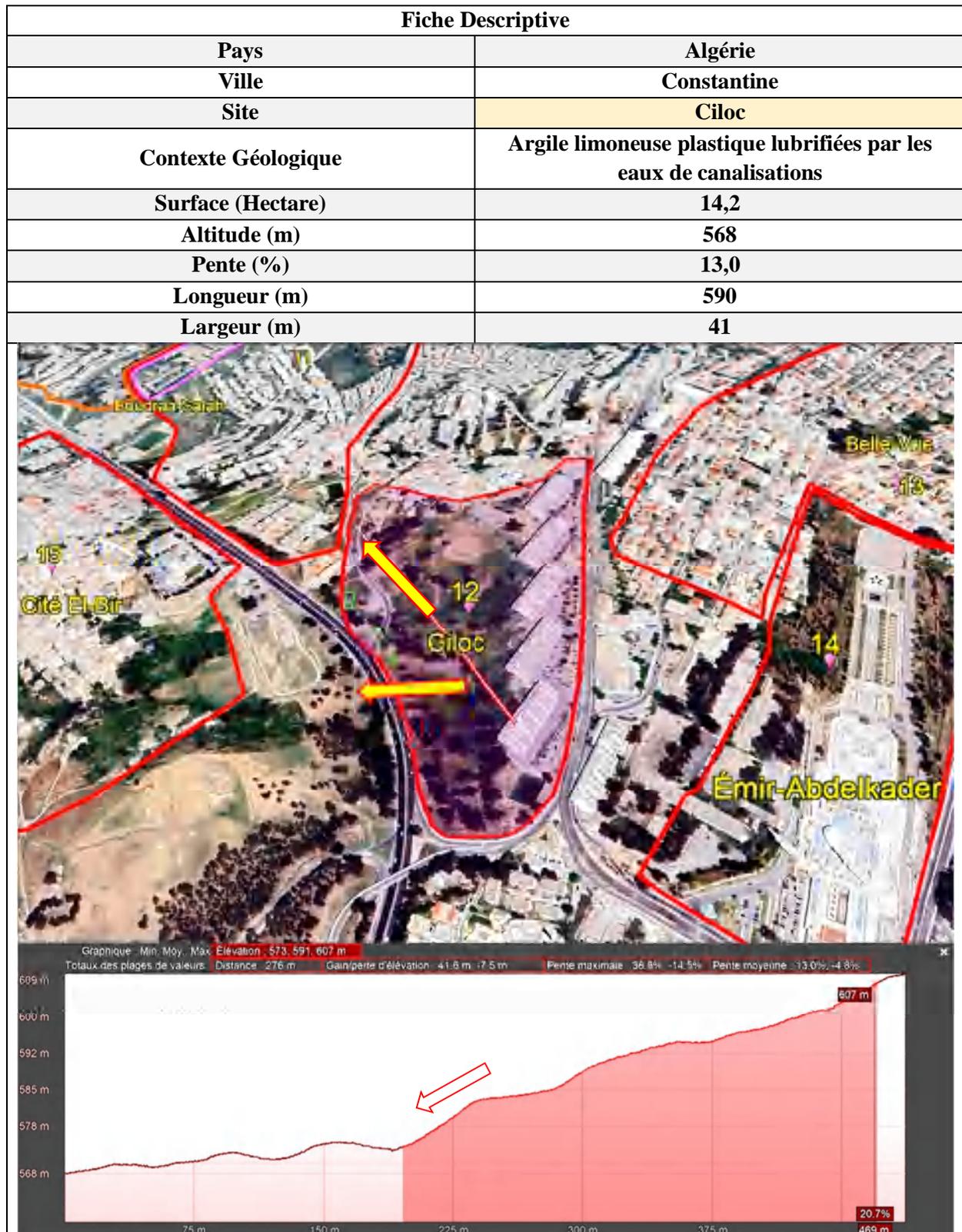


Figure 2.23. Profil donnant la pente du talus de la zone d'habitation du Ciloc.



Figure 2.24. Renversement du mur de soutènement à l'arrière-plan du Ciloc.



Figure 2.25. Bourrelet dans la formation argileuse du site des Ciloc.



Figure 2.26. Arbres inclinés et escalier défectueux.

■ ■ ■ Mosquée et l'Université Islamique Émir Abdelkader

La mosquée se trouve dans la partie Sud de Bellevue et établie sur une surface nivelée artificiellement. Toute la surface a été le siège d'un remblaiement provenant du décapage des terrains de Madame Rock sous l'ère coloniale. La construction a débuté en 1970 et à ce moment précis ont commencés les déformations de la pente ainsi que de la route avoisinante. L'installation d'un système de drainage n'a fait que retarder ces déformations. Les couches conglomératiques dans la partie supérieure n'ont pas facilité les forages de drainage ce qui a rendu le système peu efficace.

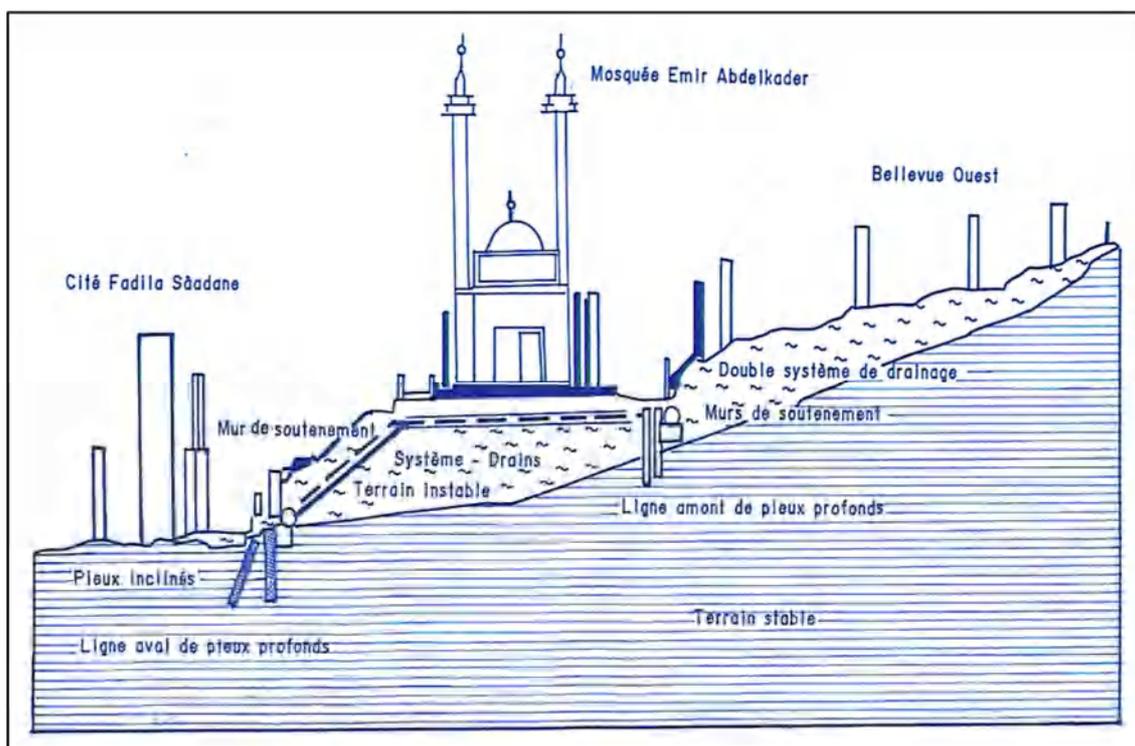


Figure 2.27. Ligne probable du glissement du site la mosquée et l'Université Islamiques Émir Abdelkader Constantine (Belouar 2004).

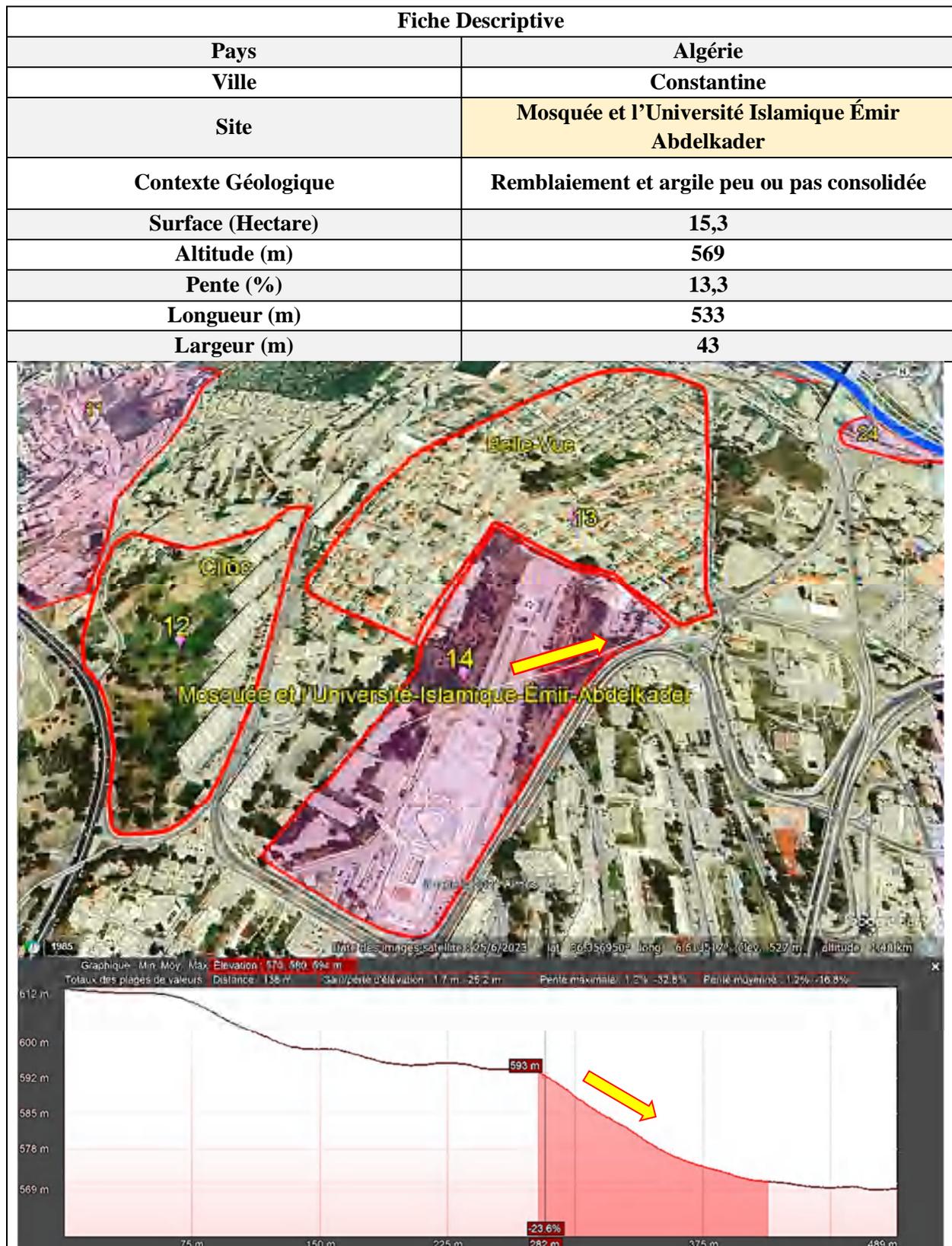


Figure 2.28. Profil donnant la pente du talus de la Mosquée et l'Université Islamique Émir Abdelkader de Constantine.



Figure 2.29. La Mosquée Emir Abdelkader et son talus amont.



Figure 2.30. Stagnation d'eau provenant par le terrassement du talus amont.

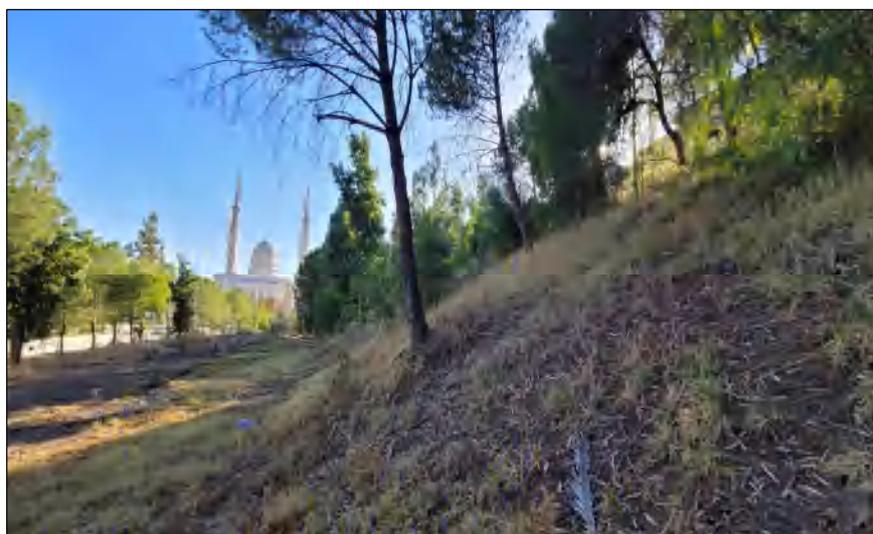


Figure 2.31. Arbres inclinés du talus site Mosquée Emir Abdelkader.

Le glissement de Bellevue

Ce glissement qui affecte le versant Sud de Coudiat Aty, dont la zone concernée s'étend sur une largeur de l'ordre de cinq à six cents mètres (500 à 600 m) et une longueur d'environ deux kilomètres (2 Km) est assez complexe de par son urbanisation. Il s'agit d'un glissement à blocs particuliers avec des plates surfaces de glissement. Le taux de mouvement s'élève à un centimètre par an (1cm /an), dont il est développé sur une zone orientée Nord Sud. Les études effectuées sur ce site à différentes époques (Durozoy, 1959), (Benaïssa et al, 1978), montrent que ce versant avait probablement été déjà affecté par des glissements de terrain anciens avant d'atteindre l'état d'équilibre d'où l'existence de paramètres résiduels. Les causes de l'instabilité sont multiples : la topographie accidentée, la prédominance des affleurements tendres du Miocène, l'infiltration incontrôlée des eaux usées, les travaux de terrassement réalisés sur site.



Figure 2.32. Décollement du mur de soutènement avec des fissures en diagonale.



Figure 2.33. Bellevue basculement du bâtiment avec dégradation du béton.



Figure 2.34. Dégradation du béton avec des fissures diagonales dans la construction sur un talus de forte pente.

Fiche Descriptive	
Pays	Algérie
Ville	Constantine
Site	Bellevue
Contexte Géologique	Argile limoneuse plastique saturée
Surface (Hectare)	29,0
Altitude (m)	562
Pente (%)	14,7
Longueur (m)	582
Largeur (m)	85



Figure 2.35. Profil donnant la pente du talus Bellevue.

El- Bir

Construit en 1983, il se trouve au prolongement de la pente du Ciloc immédiatement au Sud-Ouest de la route nationale N° 27. Les dégâts constatés sont l'inclinaison de la partie de l'escalier Nord-Ouest vers l'école mitoyenne et les déformations au sein de la partie sol visible de tout l'hôpital ceci est essentiellement due aux canalisations.

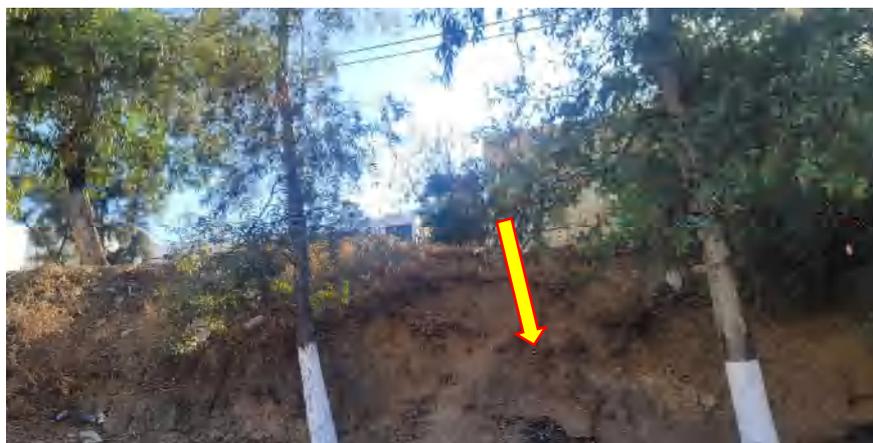


Figure 2.36. Inclinaison des arbres sur le site de l'hôpital El Bir.



Figure 2.37. Rupture des canalisations.



Figure 2.38. Vue arrière du site de l'hôpital El Bir.

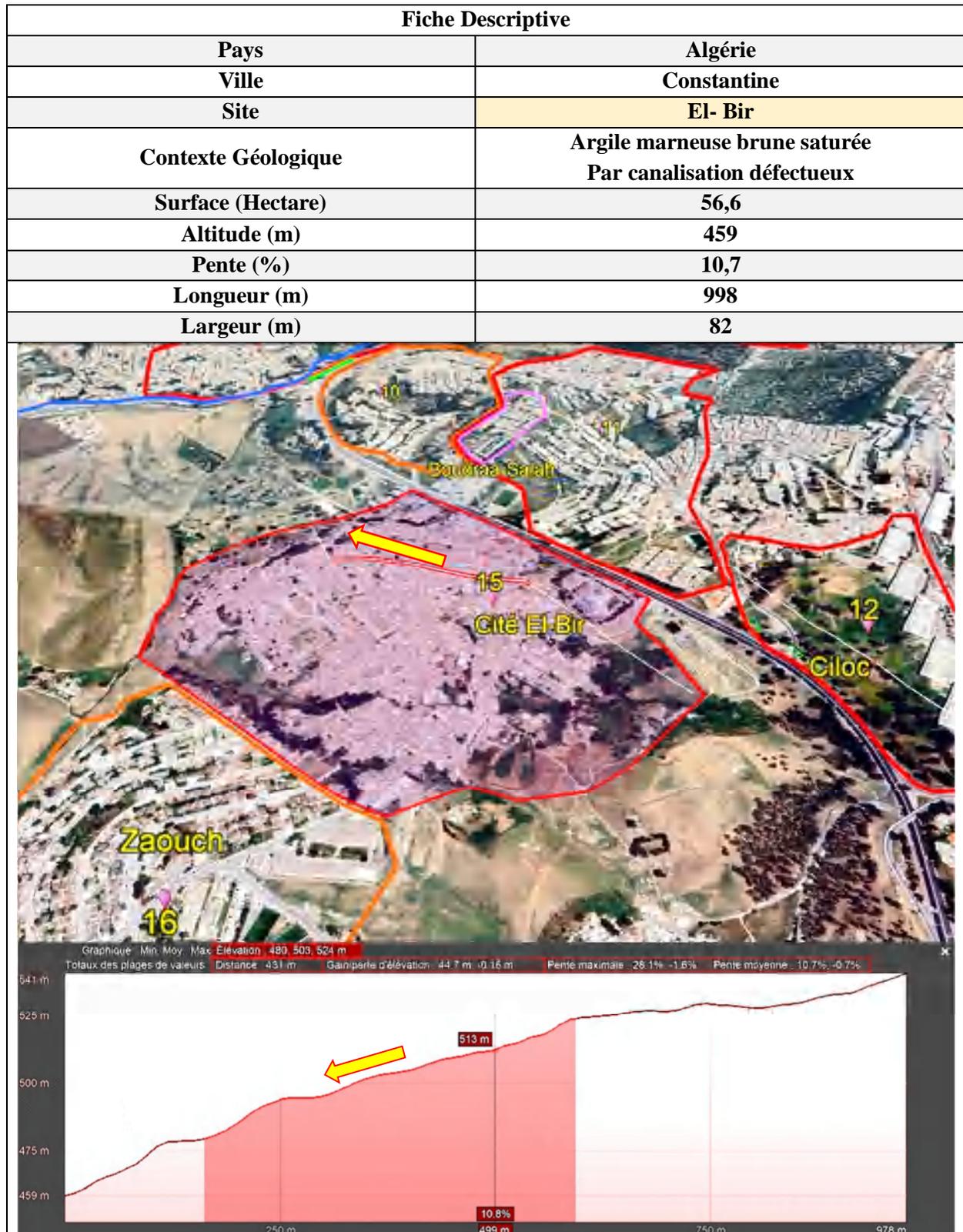


Figure 2.39. Profil donnant la pente du talus de la zone Cité El Bir.

Le Quartier Saint-Jean-Kitouni (Belouizdad)

Les constructions sont de l'époque coloniale. Pratiquement sur toute la cité, les constructions montrent des inclinaisons avec des fissures de cisaillement dirigées aussi bien vers le haut que vers le bas. Les endommagements ont commencé aux alentours de 1972. Géologiquement le quartier à l'Ouest est sur des conglomérats du Mio-Pliocène. Les sondages effectués sur le site ont montré l'existence l'inclinaison de 30° dans les couches conglomératiques vers le Sud –Ouest ce qui est probablement la cause de ces glissements. Au-dessous de cette couche conglomératique, on trouve la lithologie suivante à savoir une matrice de sable argileuse calcaire, une matrice d'argile sableuse graveleuse et une matrice de marne sableuse. On peut voir sur toute la périphérie des signes alarmants de glissements et spécialement au niveau de la route et des escaliers menant vers le bas de la cité Kitouni.

La masse glissante se compose de plusieurs blocs mouvants d'une manière différente dans l'espace et le temps.

La vitesse du mouvement est assez lente sauf dans les périodes pluviales où elle devient importante.

Le glissement en question est certainement dû aux formations géologiques car les surfaces de rupture ont entraîné les plans de stratifications ce qui laisse prévoir un glissement superficiel de l'ordre de huit à douze mètres (8 à 12m) de profondeur. Ainsi, les autorités de la ville en étroite collaboration avec SimecSol, 2004, ont décidés de démolir l'immeuble appelé anciennement le beau cadeau qui se trouve à l'amont du glissement. A cause de l'étendue des endommagements et de la superficie, il serait préférable de continuer à faire d'autres investigations sur ce site qui se trouve à l'intérieur de la ville.

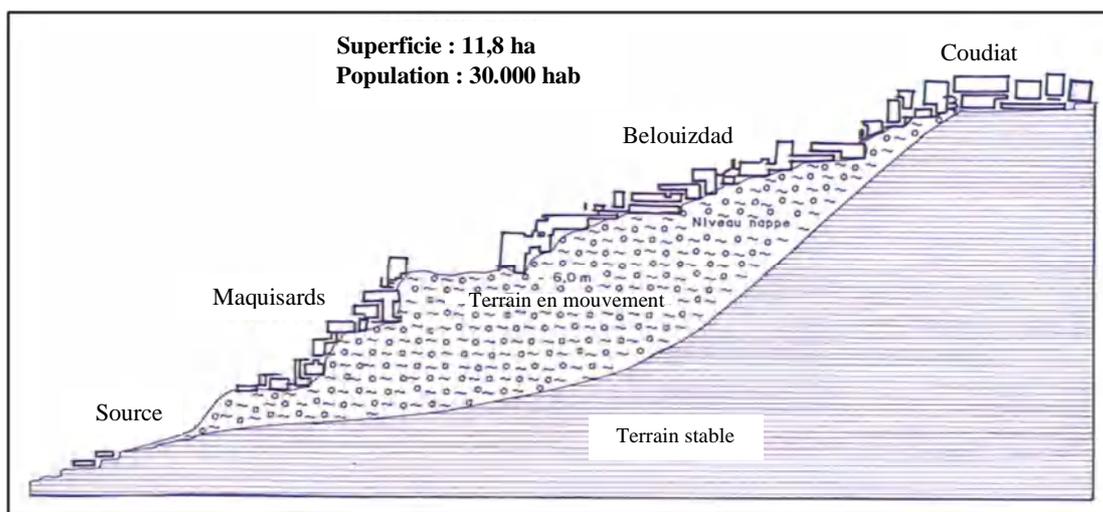


Figure 2.40. Zone probable de rupture du quartier surpeuplé au centre de la ville de Constantine (Belouar 2005).

Fiche Descriptive	
Pays	Algérie
Ville	Constantine
Site	Saint-Jean-Kitouni
Contexte Géologique	Conglomerat + Argile sableuse+Marne sableuse
Surface (Hectare)	11,8
Altitude (m)	591
Pente (%)	14,8
Longueur (m)	514
Largeur (m)	52

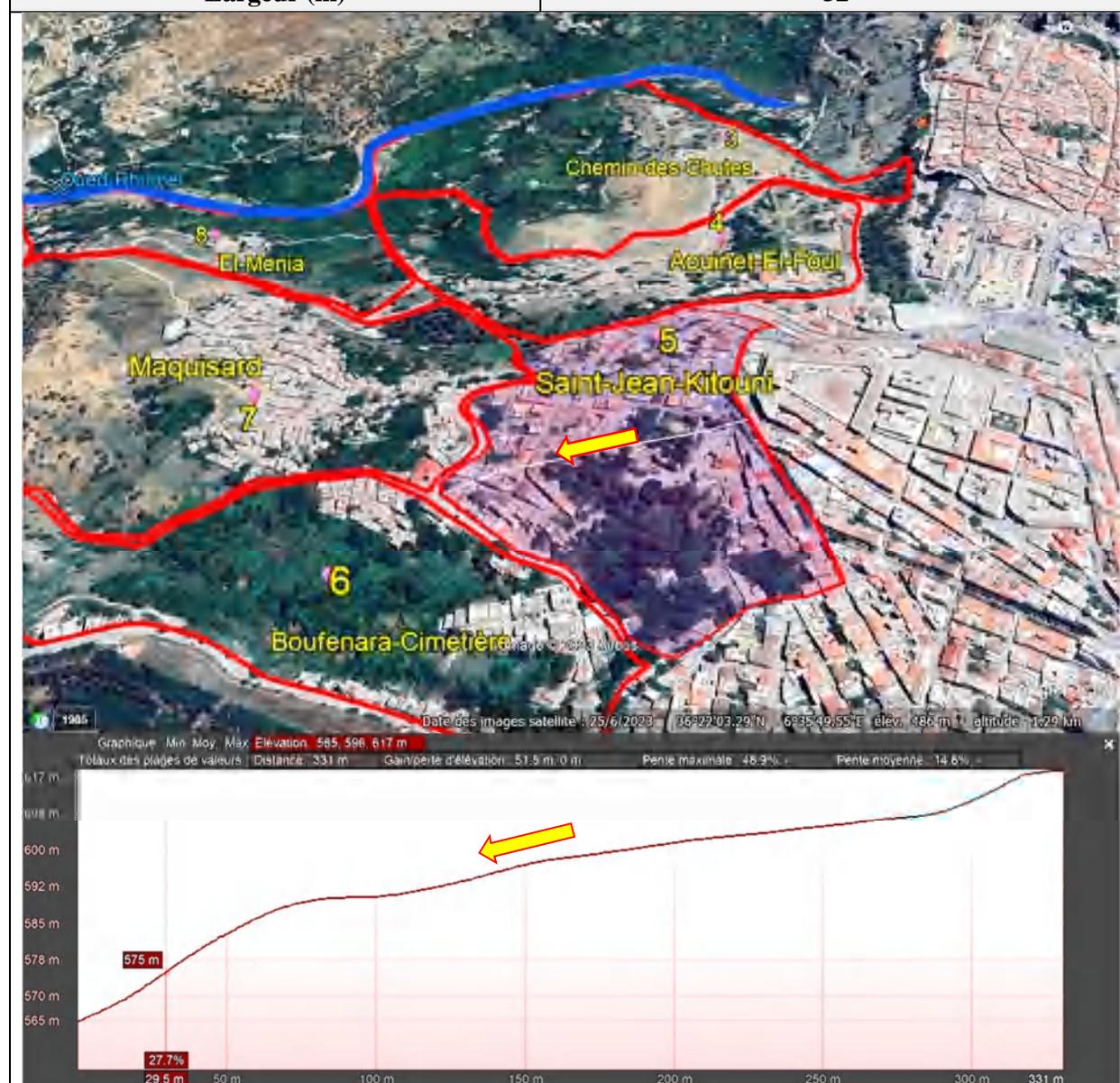


Figure 2.41. Profil donnant la pente du talus de Saint-Jean-Kitouni (Belouizdad).

C'est un mouvement gravitaire qui concerne un versant de pente forte et de formation lithologique conglomératique. Le premier mouvement a commencé en 1972 à la base du versant et n'a cessé de remonter jusqu'au quartier de Belouizded-Kitouni. Il affecte plus de 11,8 ha et comprend plusieurs quartiers du centre-ville.

La niche d'arrachement prend naissance en contre bas de Coudiat Aty et le corps du glissement s'étend jusqu'à la rive gauche de l'Oued Rhumel, dont la masse instable dans un chenal de près de mille cent mètres (1100 m) de long sur trois cent mètres (300 m) de large, d'où environ deux millions de tonnes de terre en mouvement selon la Direction de 'Urbanisme et de la Construction (DUC, 2003).

Il se manifeste en tête par des escarpements métriques bien visibles sur des talus déformés du boulevard Belouizded-Kitouni et en pied par une morphologie moutonnée caractéristique des versants argileux instables. La masse glissante se compose de plusieurs blocs se mouvant d'une manière différente dans l'espace et dans le temps. Dans l'ensemble, les mouvements se développent où le taux de déplacement général des mouvements s'élève à 0.5 cm / an. En octobre 1993 auprès de l'avenue Kitouni pendant la nuit, les déformations de pente ont atteint une vitesse se rangeant dans la gamme des centimètres et mêmes décimètres par heure. La profondeur des surfaces de terrain de chaque bloc glissant est estimée entre huit et douze mètres cubes (8 à 12 m³).

Actuellement le site est le siège de plusieurs mouvements, ce qui a mis la vie des habitants en péril, d'autres indices d'instabilités ont été observé sur les routes des différents quartiers et dans les bâtisses qui sont souvent gravement endommagés.

Les causes de cette instabilité sont dû à la combinaison des facteurs naturels anthropiques qui sont :

- La prédominance des formations lithologiques de consistance meubles, la topographie accidentée des versants, l'infiltration des eaux pluviales, l'absence du couvert végétal sur les versants dégradés, l'état dégradé du réseau d'assainissement, l'absence du drainage et la vétusté de la construction.

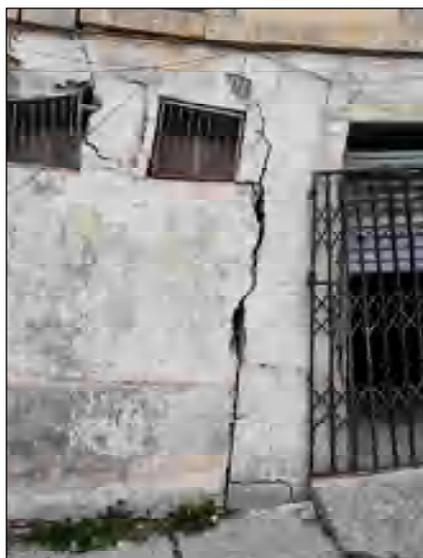


Figure 2.42. Tassement différentiel avec des fissures diagonales dans la construction.

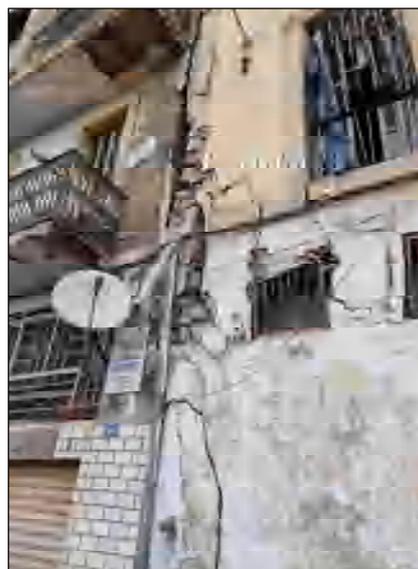


Figure 2.43. Dégradation du béton avec des fissures diagonales.

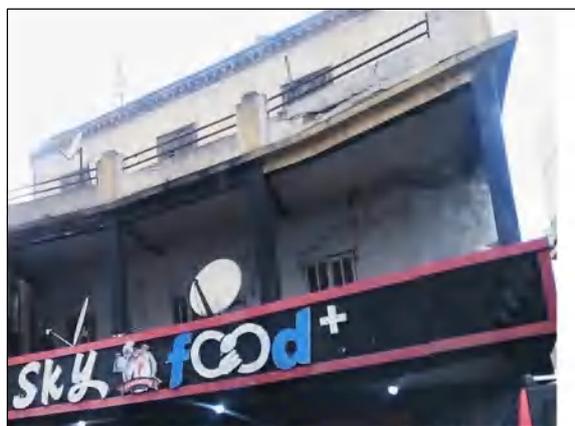


Figure 2.44. Tassement différentiel avec dégradation du béton avec des fissures diagonales dans la construction.



Figure 2.45. Rupture d'une partie de la structure avec dégradation dans la partie restante de la construction.

1.1.5 La route nationale RN 27 (Glissement Boudraa-Salah et Ben-Chergui)

La route a subi plusieurs dédommagements durant son existence et à chaque fois on essaye de réparer ces dégâts par des travaux de confortements qui sont jusqu'à présent inefficaces (gabionnages, rapiécés les tronçons touchés par du goudronnage etc...). Géologiquement cette partie est constituée de couches conglomératiques en surfaces hétérogènes et c'est le prolongement aussi du complexe d'habitation des Ciloc. Le mouvement de terrain constaté s'oriente vers l'Oued El- Mellah. C'est tout un déséquilibre d'ensemble qu'on représente sur la figure 2.46. représentant un ensemble de mouvements de terrains (Boudraa + RN 27 + Hôpital El Bir) prolongement du glissement du complexe d'habitation des Ciloc.

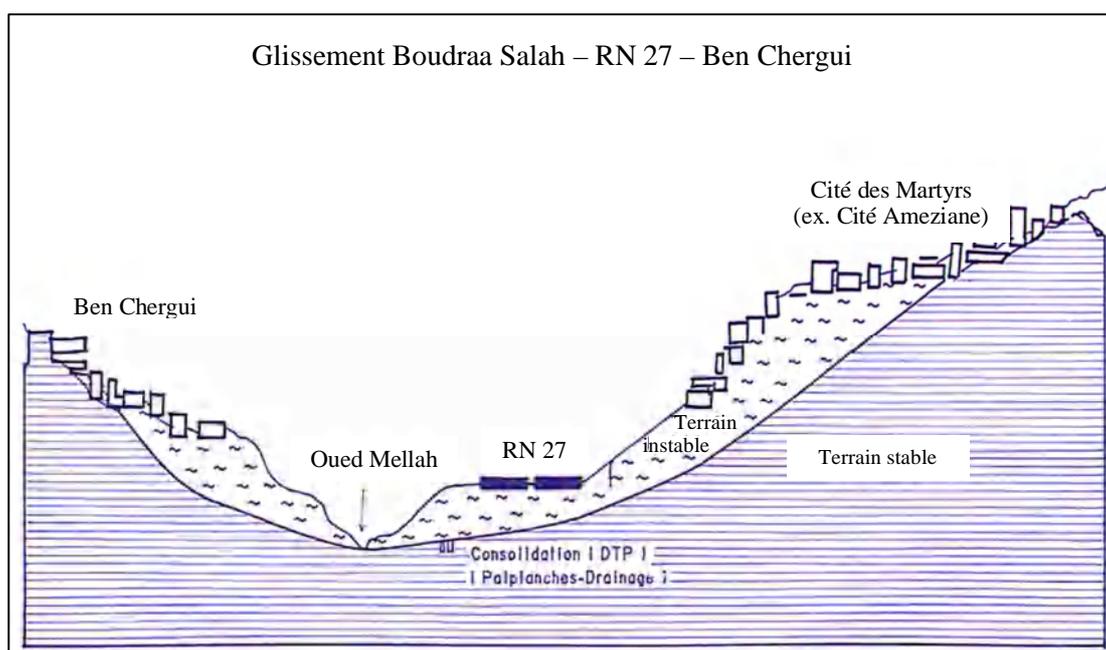


Figure 2.46. Ligne probable de rupture de deux talus avec la RN 27 (Belouar 2005).

Le versant de Boudraa-Salah à pente forte de topographie moutonnée, affecté par des glissements de terrain caractérisés par des niches d'arrachements métriques, avec des fissures assez larges et des ravinements qui sillonnent le versant. L'urbanisation anarchique du site a rendu l'étude géomorphologique très difficile.

Les causes de l'instabilité sont dues à la combinaison des facteurs naturels et anthropiques, la prédominance des formations argileuses, sur un versant à pente très forte, l'infiltration des eaux usées en provenance des cités situées en amont. Les travaux de terrassement effectués sur site et l'absence d'un réseau d'assainissement ont accéléré l'instabilité du site, d'où nous avons remarqué une inclinaison des poteaux et des arbres et les murs de soutènements.

Fiche Descriptive	
Pays	Algérie
Ville	Constantine
Site	Ben Chergui
Contexte Géologique	Conglomérat + Argile peu ou pas consolidées
Surface (Hectare)	49,7
Altitude (m)	394
Pente (%)	20,0 - 12,4
Longueur (m)	480
Largeur (m)	92

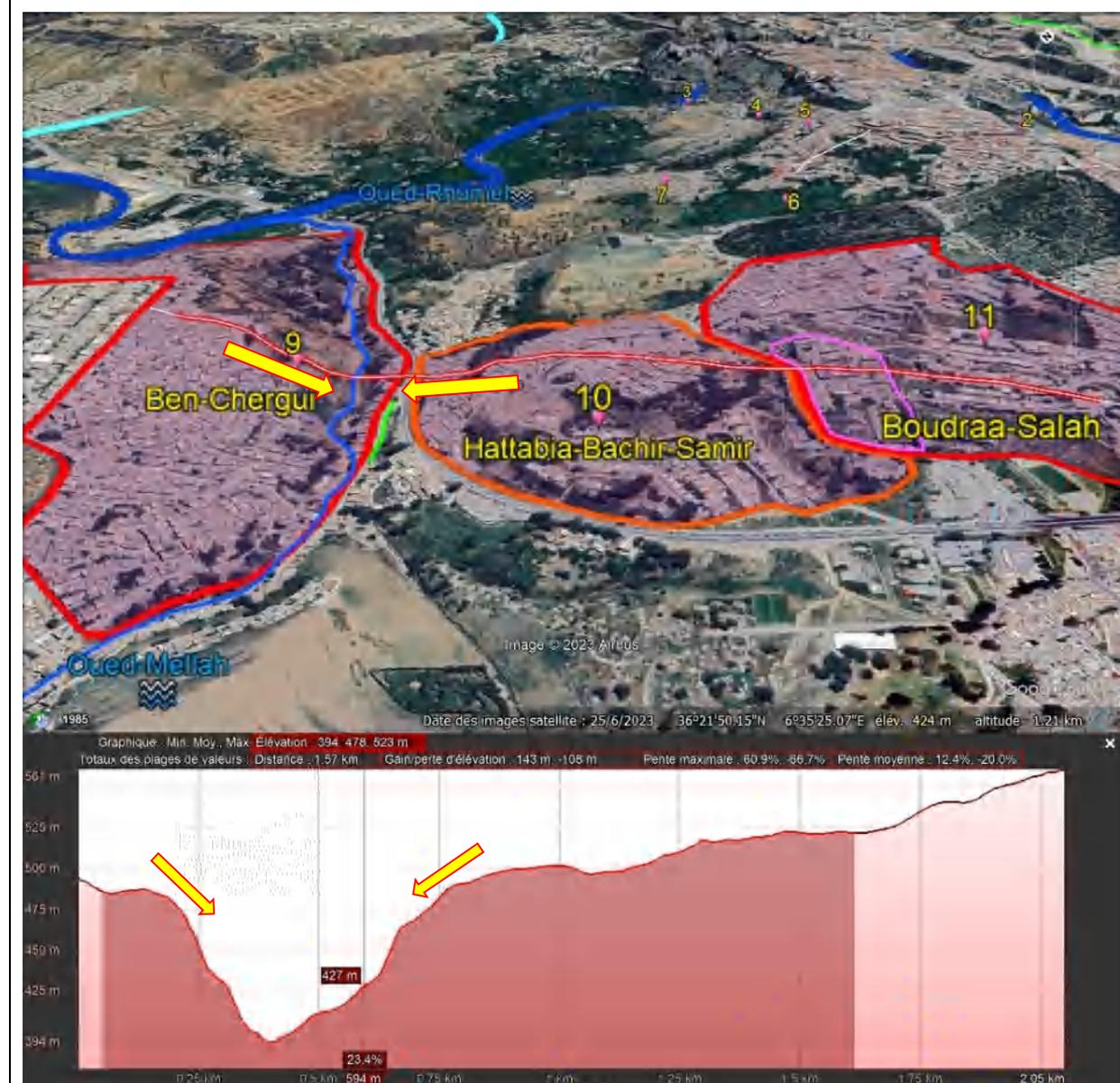




Figure 2.48. Mur de soutènement fondé sur pieux dans le site de Ben-chergui durant l'année 2013.



Figure 2.49. Eroulement du versant des conglomérats rouges du Mio- pliocène.

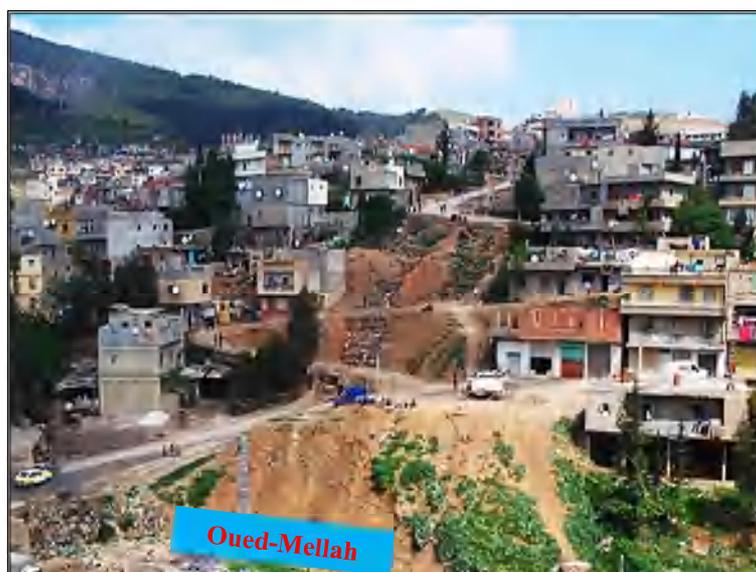


Figure 2.50. Versant conglomératique du site de Ben-chergui.

Le pont Sidi Rached

Le pont a été construit en 1908 dans le but de joindre la partie Est et Ouest de la ville, il est sur l'Oued Rhumel. Lors du séisme de 1947, les premières dégradations au sein de la culée ont été visibles sur sa partie Est. Ces déformations concernent aussi le terrain de la gare d'en bas, l'avenue Zamouche et la route de Batna. Les déformations de pente commencent probablement de la partie supérieure (chemin forestier) au sein des couches du tertiaire (pliocène supérieur) saisissant les marnes crétacées légèrement schisteuses sous-jacentes. L'étendue du glissement est marquée par des arbres inclinés, des fissurations sur des murs et des déformations sur les routes avoisinantes. Nous représenterons ces glissements sur la figure 2.51.

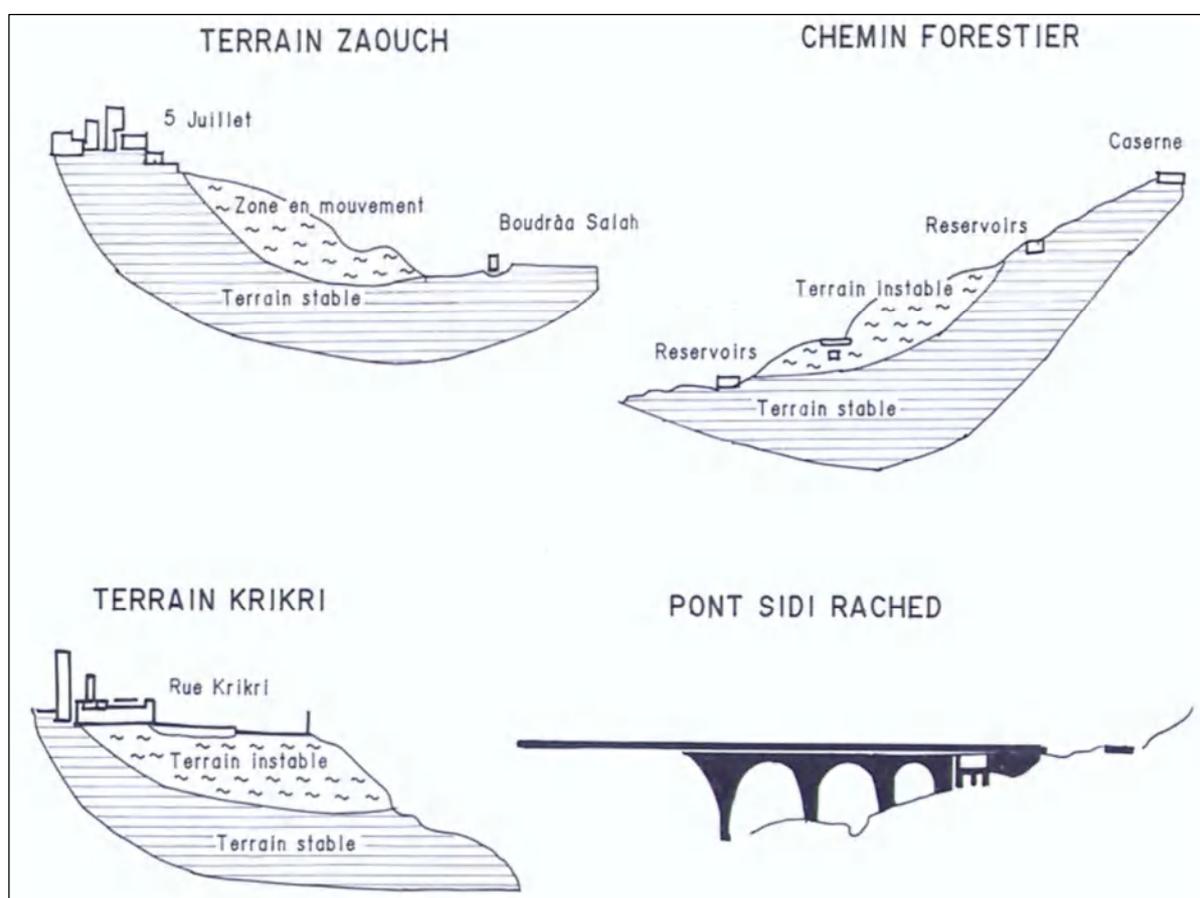


Figure 2.51. Quelques glissements concernant le tissu urbain de la ville de Constantine (Belouar 2005).

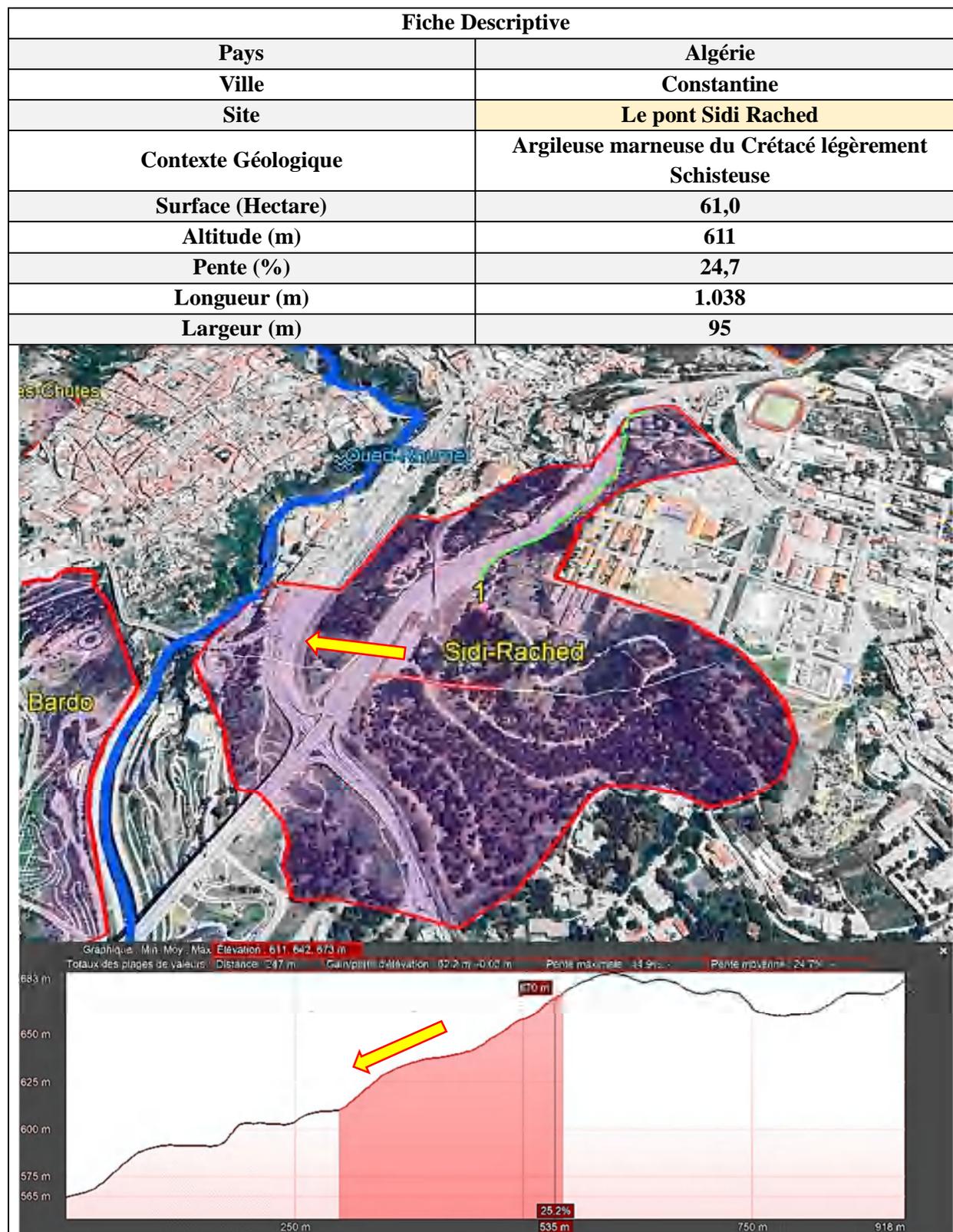


Figure 2.52. Profil donnant la pente du talus de la zone du Pont Sidi Rached.



Figure 2.53. Dégradation des maisons du côté amont du pont de Sid Rached.



Figure 2.54. Source captée dans les marnes du crétacé schisteuse en amont du pont de Sidi Rached.



Figure 2.55. Maisons et hangars fissurés et basculés au pied de la culée du pont de Sidi Rached.



Figure 2.56. Source captée dans les marnes du crétacé schisteuse en amont du pont de Sidi Rached.

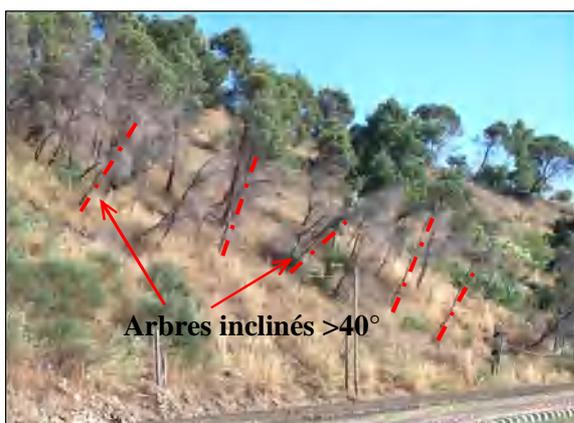


Figure 2.57. Arbres inclinés sur le versant marno-schisteux.



Figure 2.58. Banquette pour le talus renforcé par gabionnage (gabionnage déformé).

■■■■ Bardo

Géologiquement le terrain est constitué de conglomérats sur une profondeur assez importante et il est marqué par une faille. Les couches sont inclinées d'un angle d'environ 30° vers le Sud-Ouest. Les déformations de pente sont très visibles spécialement au niveau de la route et des constructions avoisinantes. Il y a eu la destruction de l'ancien abattoir. Le terrain montre une morphologie exceptionnellement agitée. Ce qui laisse prévoir une ligne de rupture comme la montre la figure 2.59. Le glissement s'étend jusqu'au Oued Rhumel. L'aval du talus est toujours érodé par les pluies diluviennes qui s'abattent chaque année sur la région, elles créent des déséquilibres en diminuant les contraintes latérales et ainsi provoquant des mouvements de terrain.

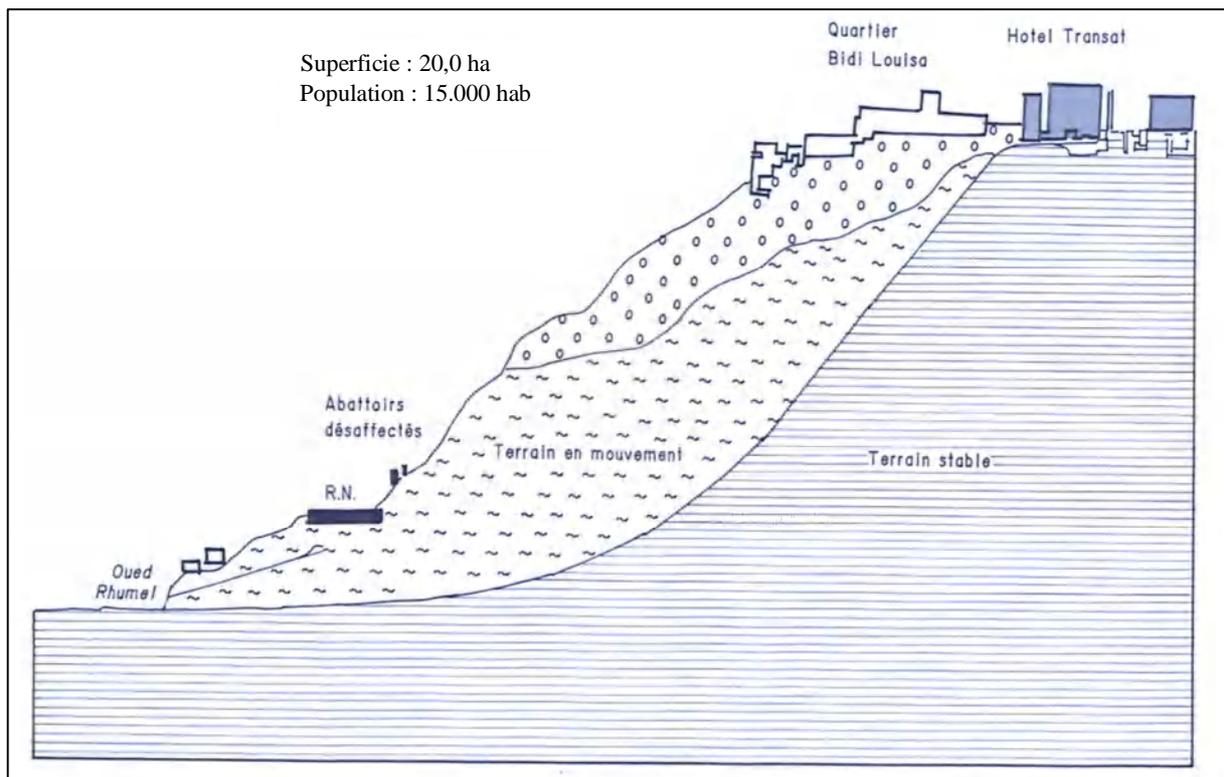


Figure 2.59. Ligne de rupture probable pour le glissement du Bardo (Belouar 2005).

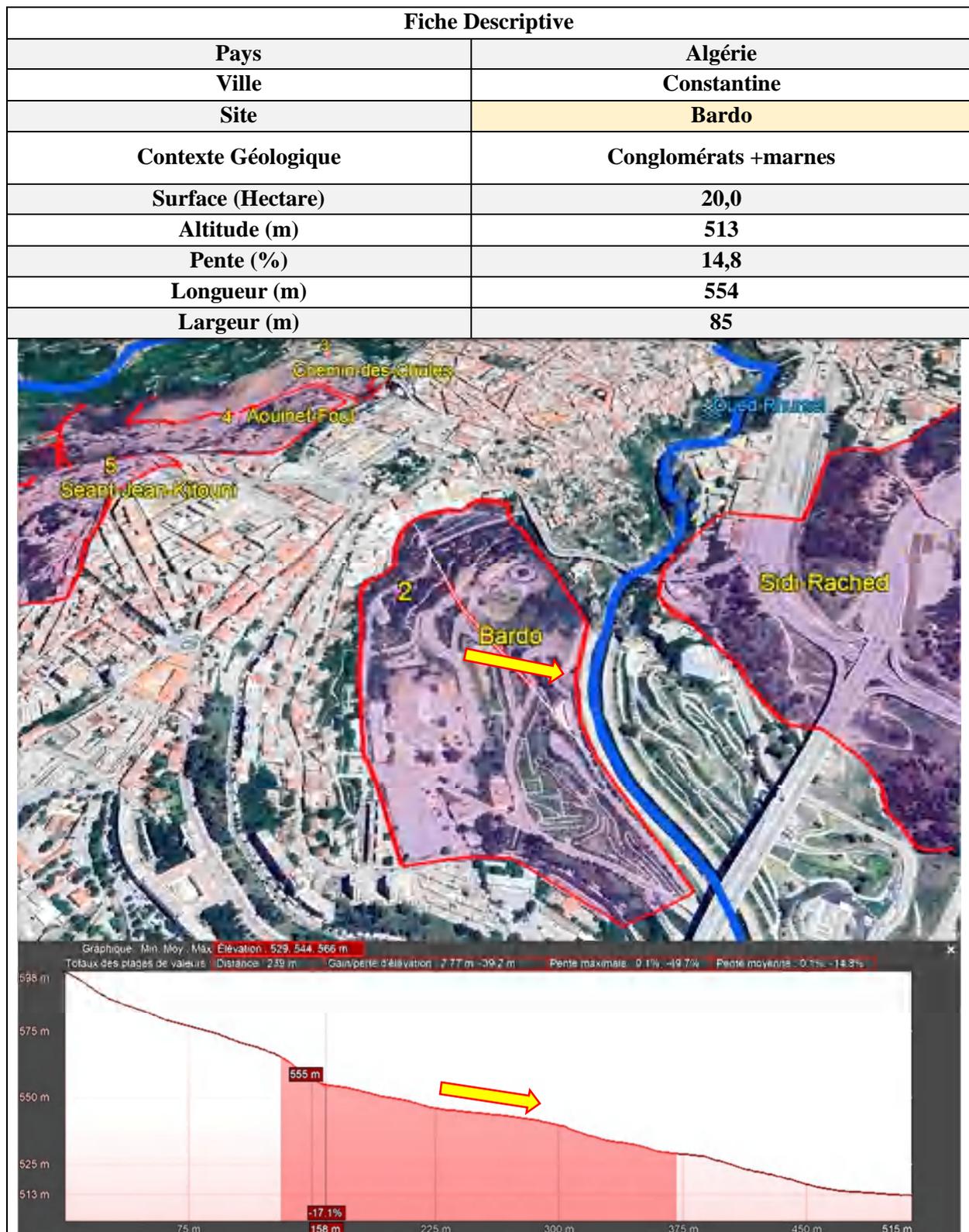


Figure 2.60. Profil donnant la pente du talus de la zone de Bardo avec sa zone urbaine.



Figure 2.61. versant du site Bardo vers Oued Rhumel.

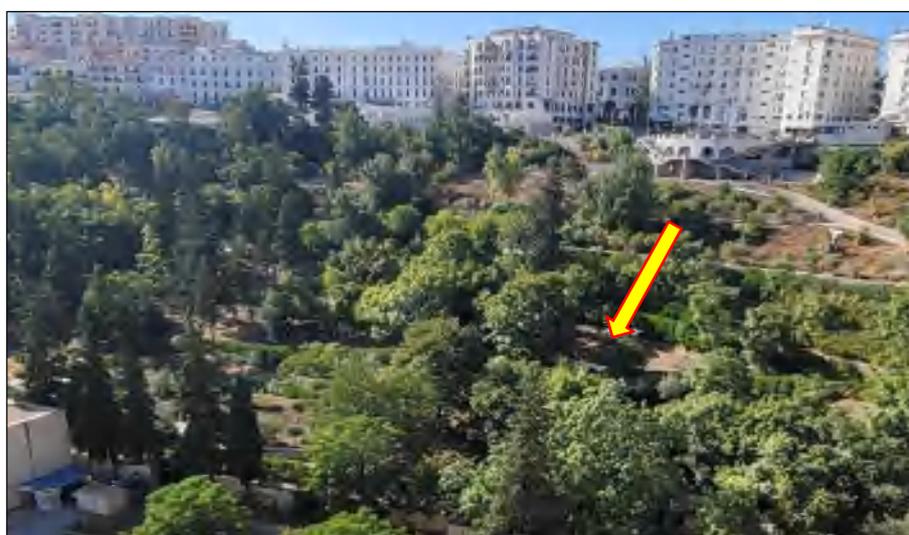


Figure 2.62. Versant du site Bardo vers Oued Rhumel.

D'autres sites sont actuellement en mouvement, on peut citer El-hadaba, Dnc-paramédical, Boulevard ALN-Mansourah, Serkina, L'Eucalyptus-siège-Air-Algérie recensement etc...

■■■■ Contournement-Sud Boussouf Ain El Bey

Le problème du contournement persiste malgré l'intervention des services de la direction des travaux publics pour conforter ce tronçon de voie rapide afin d'éviter les encombrements sur les autres voies rapides Boussouf et le centre de la ville.

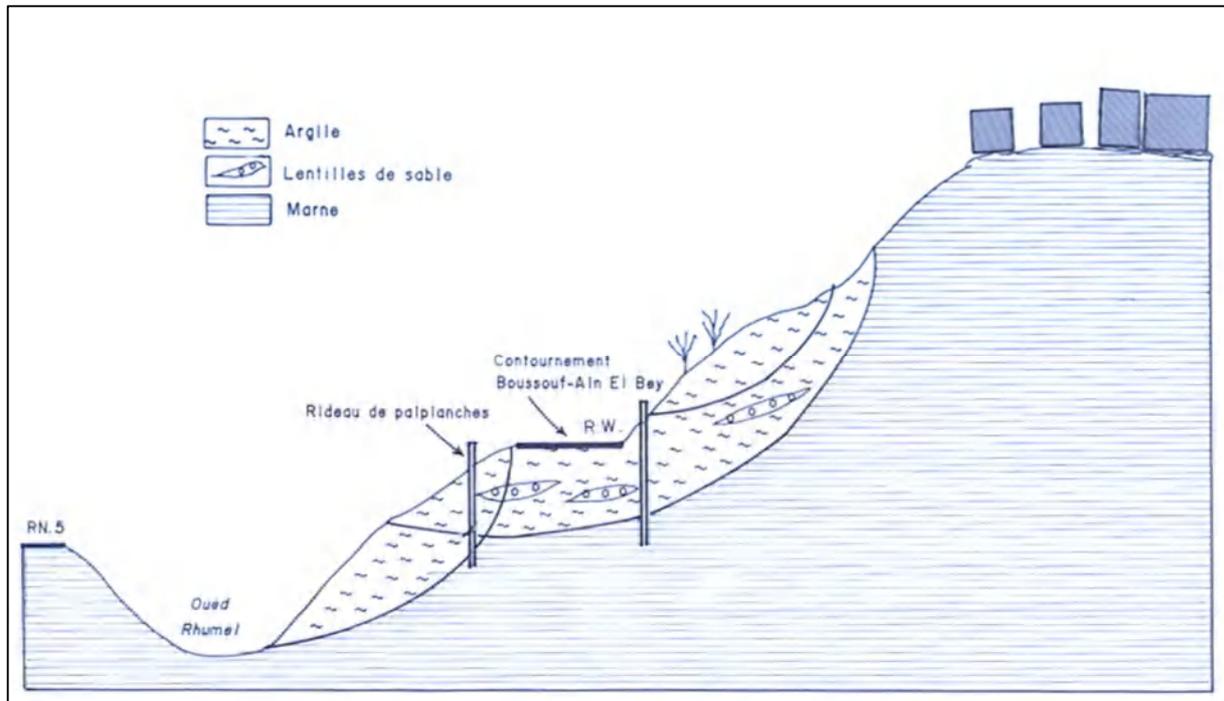


Figure 2.63. Ligne de rupture probable rétrogressive du contournement Sud Boussouf – Ain El Bey (Belouar 2005).



Figure 2.64. Versant instable renforcé par palplanche et gabionnage.



Figure 2.65. Versant montrant des instabilités (arbres inclinés et caniveaux défectueux).

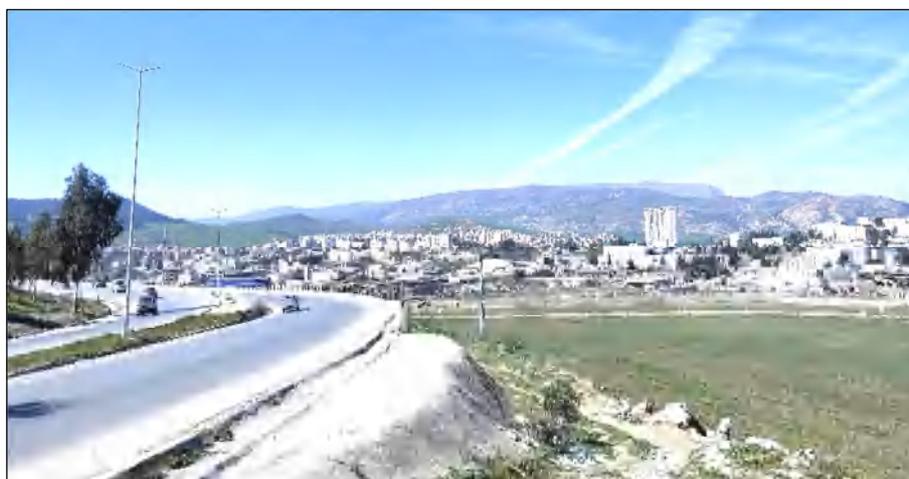


Figure 2.66. Chaussée défectueuse montrant des anomalies au sein de la route Contournement-Sud.



Figure 2.67. Déplacement des palplanches et du gabionnage sur l'axe routier Contournement-Sud.

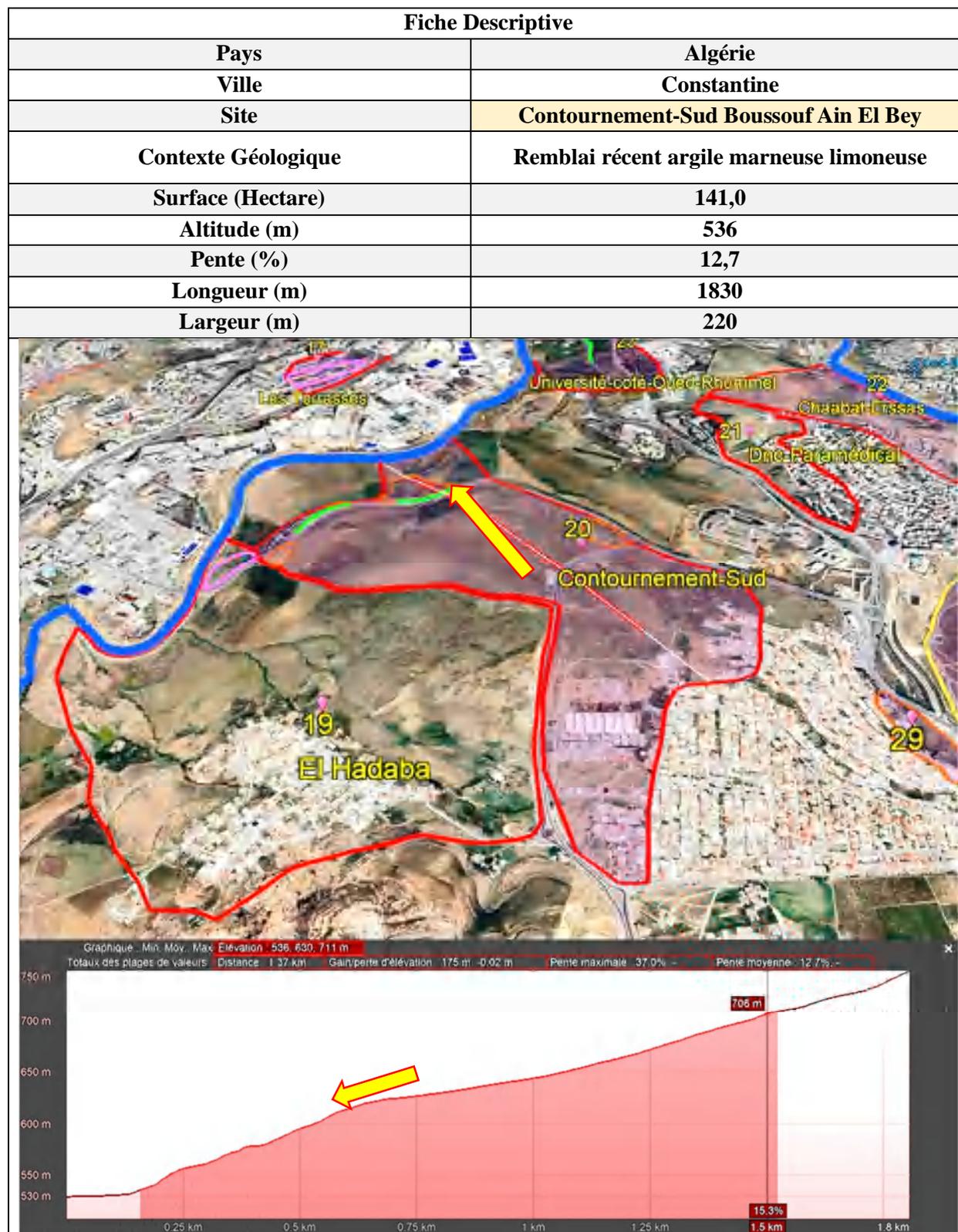


Figure 2.68. Profil donnant la pente du talus du contournement-Sud Boussouf -Ain El Bey.

On peut représenter tout ceci à l'aide de différents profils qui laissent prévoir les talwegs et leurs importances créant ainsi les talus ou des versants à la limite de la stabilité.

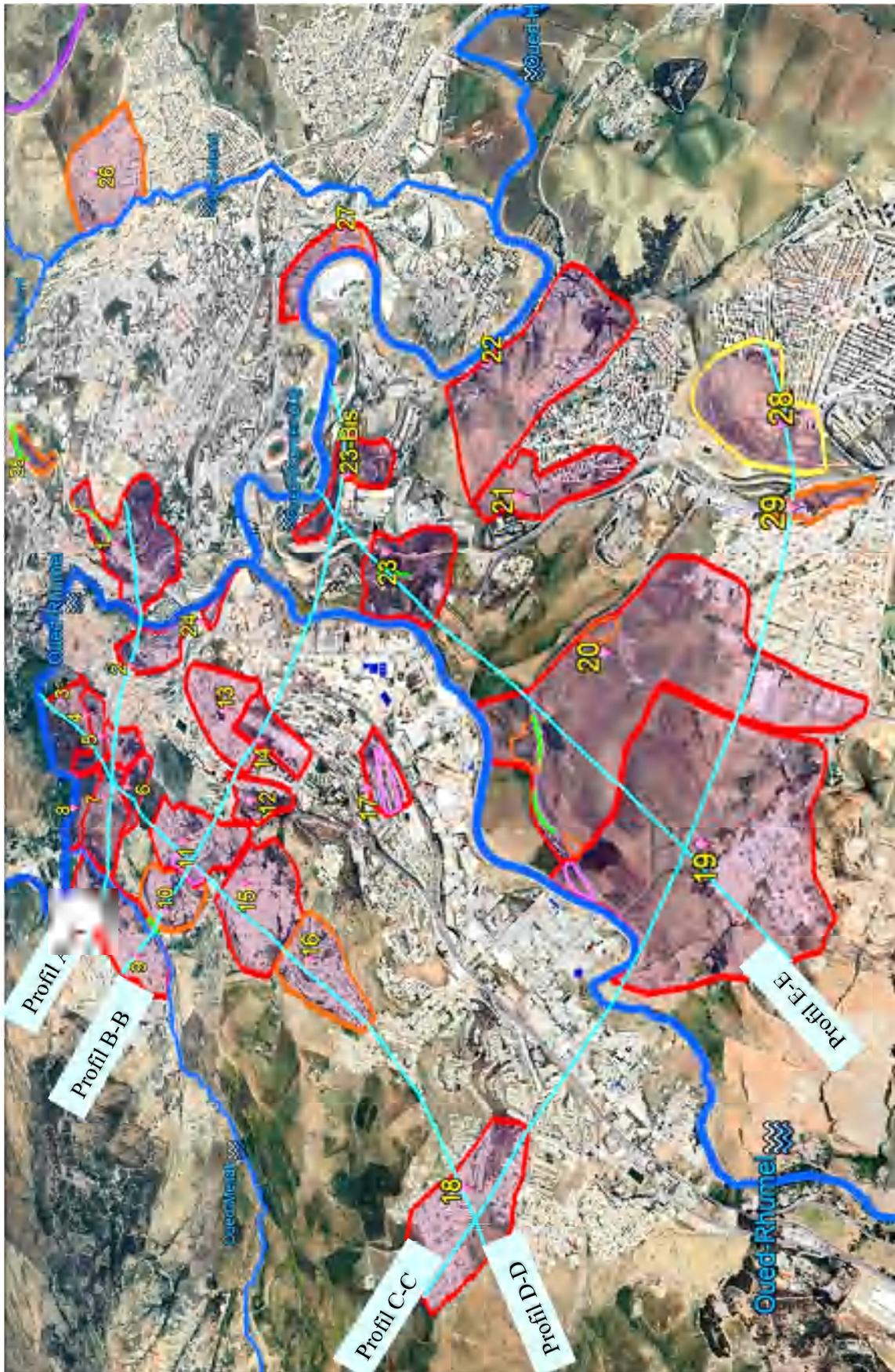


Figure 2.69. Profil montrant des différents sites étudiés en mouvement dans la ville de Constantine (Algérie).

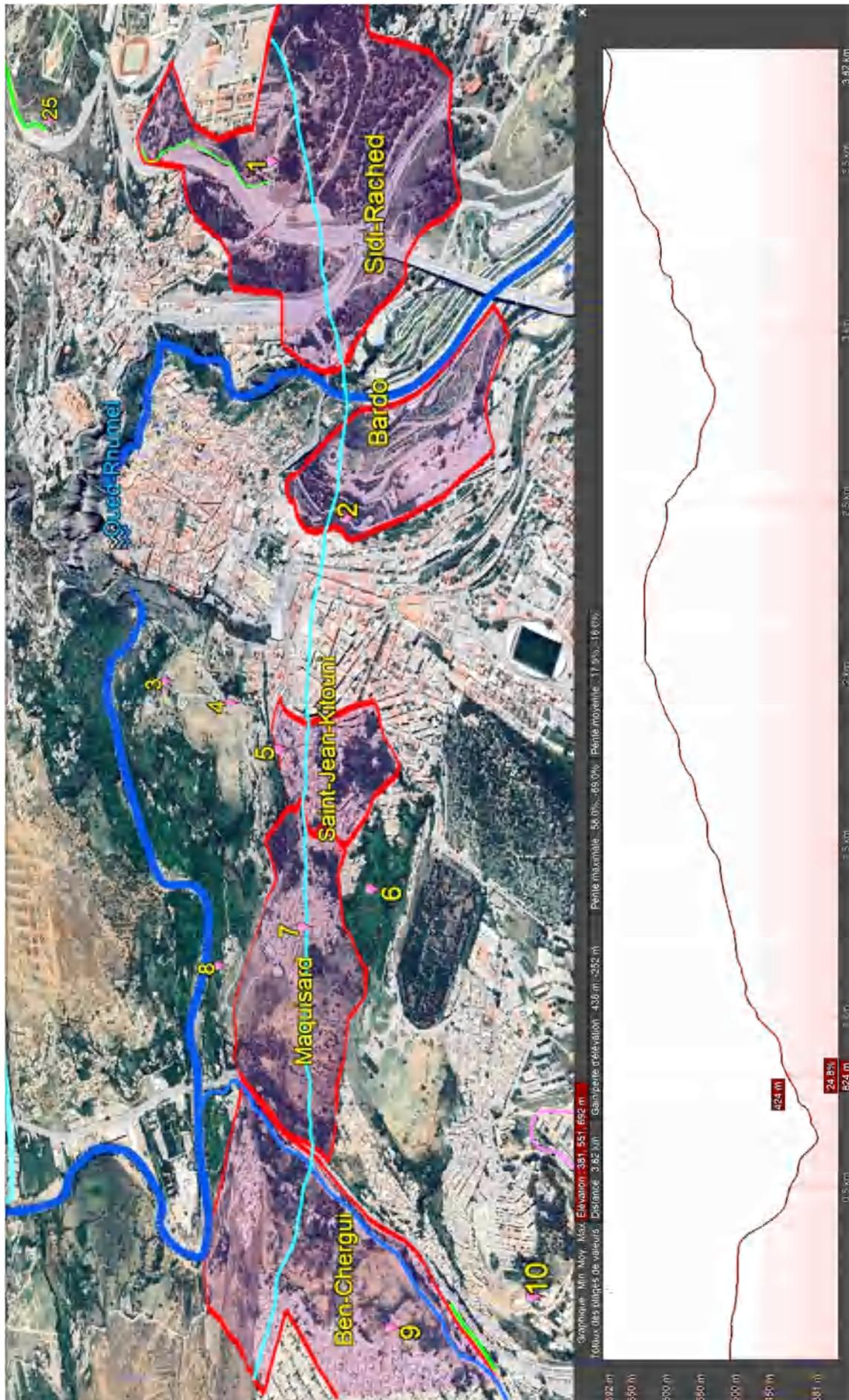


Figure 2.70. Profil A-A montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : Ben-Chergui, Maquisard, Saint Jean Kitoumi, Bardo, Sidi Rached.

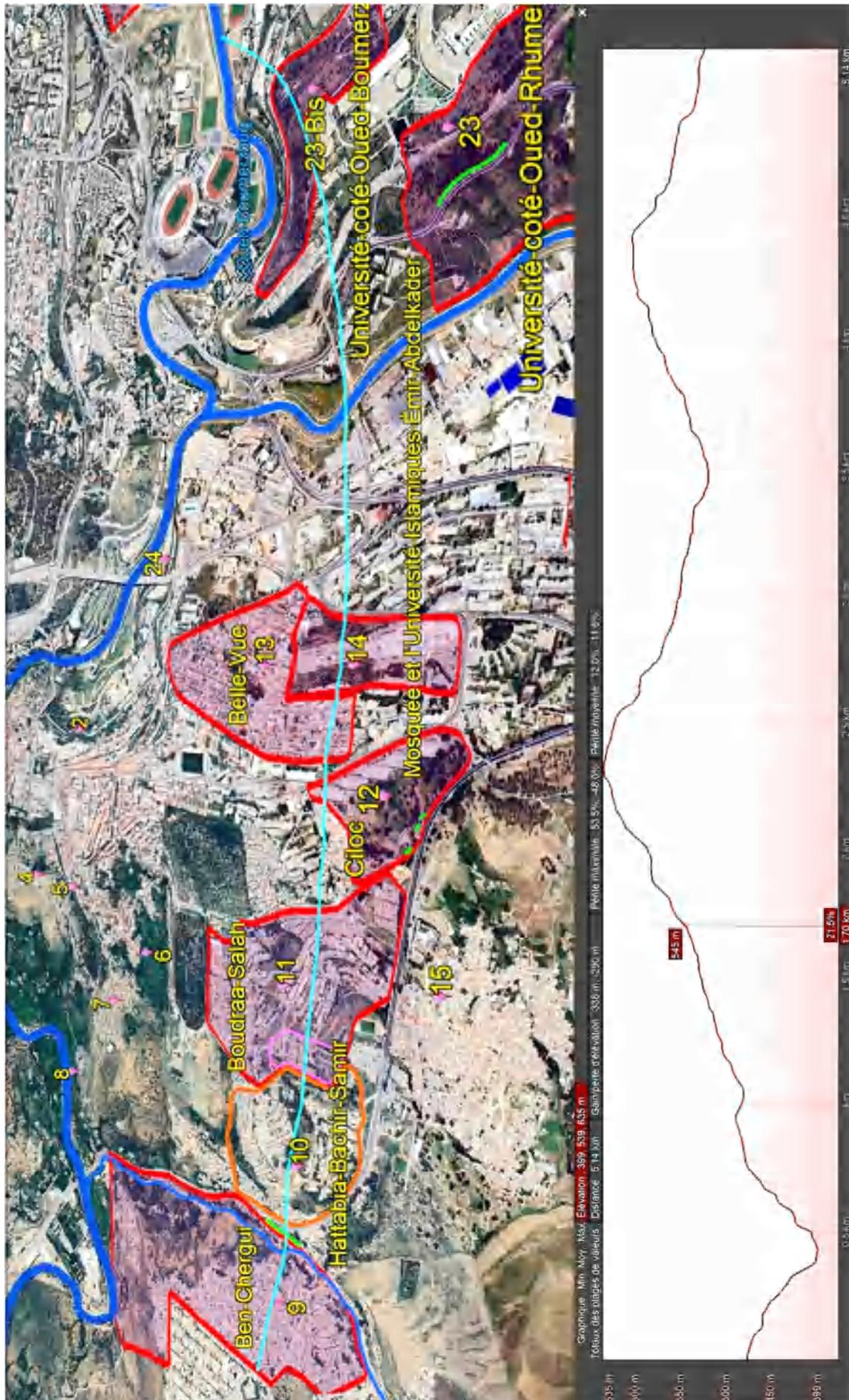


Figure 2.71. Profil B-B montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : Ben-Chergui, Hattabia-Bachir-Samir, Boudraa-Salah, Cilloc, Bellevue, Université-coté-Oued-Boumerzoug.

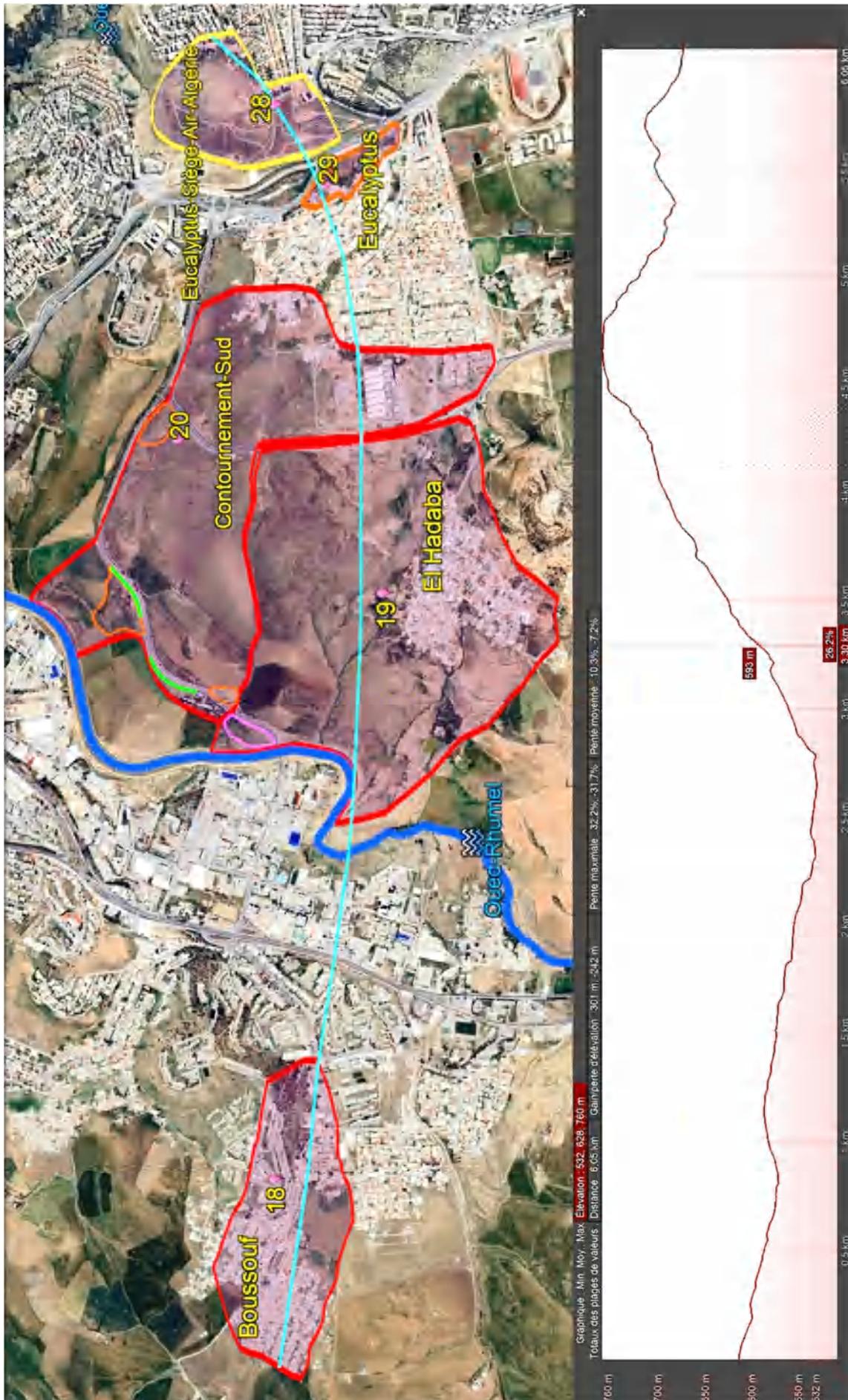


Figure 2.72. Profil C-C montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : Boussouf, El-Hadaba, Contournement-Sud Boussouf Ain El Bey, Eucalyptus-Siège-Air-Algérie, Eucalyptus.

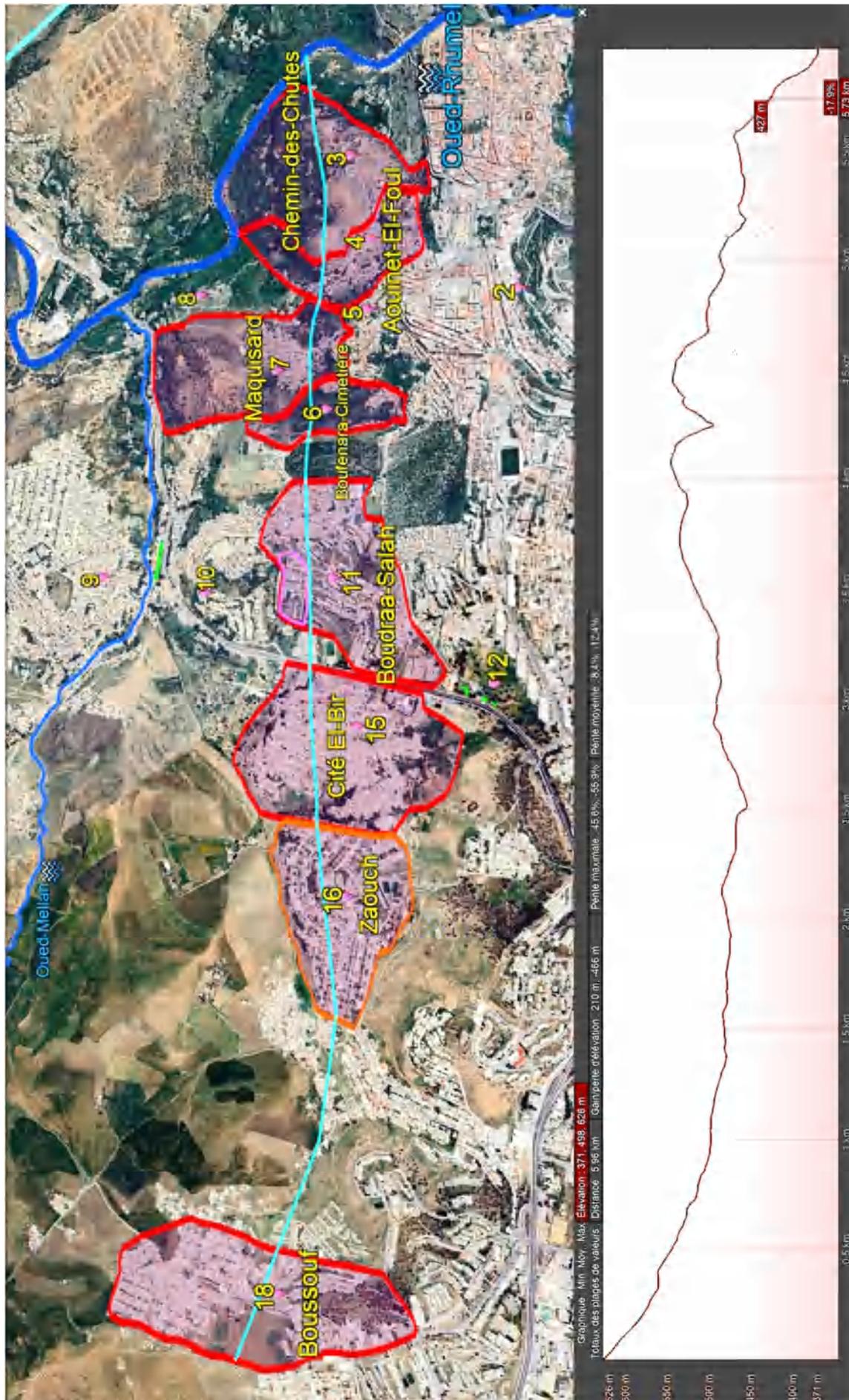


Figure 2.73. Profil D-D montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : Boussouf, Zaouch, Cité El-Bir, Boudraa-Salah, Maquisard, Boufensra-Cimetière, Aouinet-Foul, Chemin des Chutes.

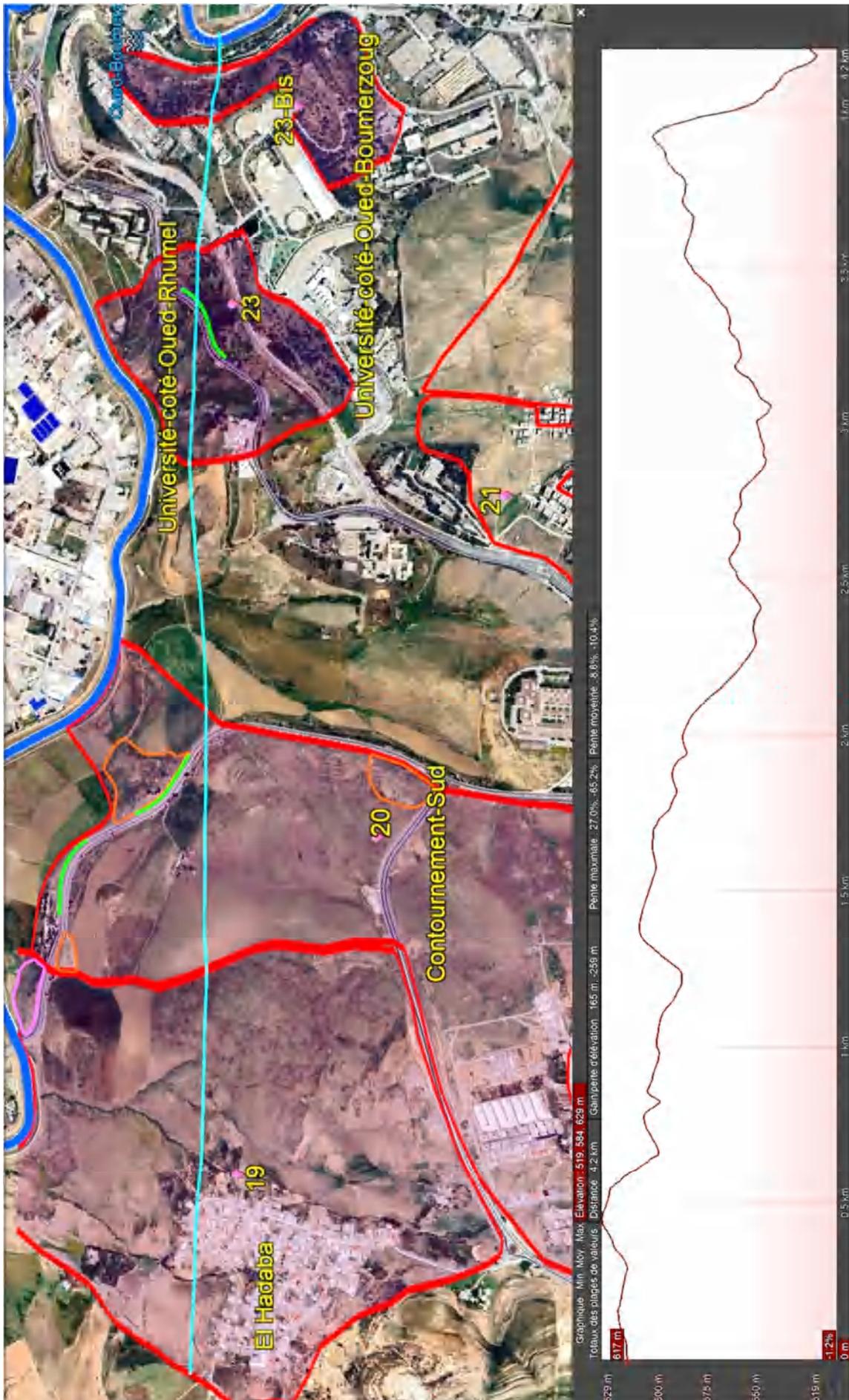


Figure 2.74. Profil E-E montrant les différents versants en mouvement des sites en question à savoir : El-Hadaba, Contournement-Sud Boussouf Ain El Bey, Université-côté-Oued-Rhumel, Université-côté-Oued-Boumerzoug.

Conclusions

Ces constatations montrent que les glissements de terrain qui affectent la ville de Constantine, nous amènent aux conclusions suivantes :

- Presque toutes les couches lithologiques se trouvent en position inclinées, avec des angles d'incidences jusqu'à 30°. Cela signifie que les couches sont inclinées vers la vallée, favorisant les instabilités, en addition au phénomène d'eau qui est un facteur important dans le déclenchement des mouvements de terrain.

En effet les observations constatées sur les différents sites en question montrant qu'il s'agit de :

- Un relief accidenté dû essentiellement à une tectonique cassante.
- Une géologie montrant une déposition en surface de sédiment sensible dû à la période du quaternaire et constituées d'une stratification d'argiles de marnes.
- Un réseau d'assainissement et d'eaux potables complètement défaillant (déperdition de l'ordre de 50 %). Ce qui favorise l'infiltration des eaux dans les sols à problèmes et sensibles à ces phénomènes.
- L'action anthropique et les constructions anarchiques sans aucun contrôle ni suivi sur des versants prédisposés et à la limite de la stabilité permet de déclencher les mouvements de terrain.
- L'importance de l'humidité dans l'interface des couches imperméables telles que l'argile et les marnes avec la couche perméable conglomératique favorise la réduction de la résistance au cisaillement ce qui entraîne des mouvements. Ces interfaces favorisent les lignes de rupture probables.

CHAPITRE 3

APPROCHE CONSTITUTIVE D'UNE BASE DE DONNEES DES SOLS SENSIBLES CAS DE LA VILLE DE CONSTANTINE

« La définition que je donne du risque, c'est la menace sur l'homme et son environnement direct, Chercher une méthode, c'est chercher un système d'opérations extériorisables qui fasse mieux que l'esprit, le travail de l'esprit ».

Paul Valery. Les variétés.

Chapitre 3

Approche constitutive d'une base de données des sols sensibles cas de la ville de Constantine

Introduction

Ce chapitre traite de l'acquisition des données et du stockage informatique des données obtenus de la part des différentes institutions étatiques telles que la Direction de l'Urbanisme et la Construction et le Laboratoire des Travaux Publics de l'Est touchés par le phénomène des mouvements de terrain. Cette banque peut-être actualiser, mise à jour, éditer des informations, modifier ou supprimer certaines données qui seront de l'avis du géotechnicien erronées.

Pour atteindre cet objectif, une approche effective a été adoptée depuis la collecte des données jusqu'à exploitation concrète de la base de données.

Tous les paramètres récoltés ont été compilés dans le logiciel Excel, pour être exploités sous forme courbes ou des graphes.

Les données sélectionnées ont été mis dans une cellule et appuyez sur "Entrée" pour passer à la cellule suivante en bas ou sur "tabulation" pour passer à la cellule suivante à droite. Entrez vos données cellule par cellule, en continuant d'appuyer sur "Entrée" ou "Tabulation" pour vous déplacer d'une cellule à l'autre. On devrait avoir une colonne pour les valeurs de l'axe des abscisse (x) et une ou plusieurs colonnes pour les valeurs de l'axe des ordonnées (y), ensuite sélectionnez les données que l'on souhaite inclure dans le graphique.

Une fois les données sont sélectionnées, on va dans l'onglet "insertion" dans le ruban Excel. Par exemple, si on souhaite tracer une courbe, on choisit le type de courbes qu'on veut. Une fois le graphe créé, on peut le personnaliser en ajoutant un titre, en modifiant les axes, en ajoutant des étiquettes de données, en changeant les couleurs, etc. Cliquez sur le bouton droit des différentes parties du graphe pour accéder aux options de personnalisation.

On peut pouvoir également ajouter des tendances, des lignes de régression, des légendes, etc., en fonction de vos besoins. Si les données changent, le graphe peut être mis à jour automatiquement en fonction des modifications apportées aux données sous-jacentes.

On peut utiliser des formules Excel pour calculer des statistiques telles que la moyenne, la médiane, l'écart type, etc., à partir des données de courbe. Ces statistiques peuvent nous fournir des informations précieuses sur la distribution des données. En utilisant les graphes et des analyses appropriés, on sera en mesure de prendre des décisions éclairées.

Dans ce travail, on a choisi de passer en un premier temps par la comparaison de certains paramètres jugés à posteriori comme paramètres importants dans le comportement des sols à problèmes ce qui laisse prévoir une même valeur trouvée sur différents sites avec la dénomination du sondage, de la profondeur, de l'altimétrie et de la zone pour une même valeur de départ.

Collecte des données et organisation de la base géotechnique

C'est la première phase abordée lors de la conception de la base de données géologique et géotechnique de Constantine. Cette collecte des données réalisée à Constantine dans les différents organismes publics détenant ces informations a délivré un nombre considérable et important de données.

La confidentialité des données de sondages nous a obligé de recueillir manuellement l'information utilisant ainsi une partie importante de notre temps (d'où le retard accumulé dans ce type de travail).

De plus, l'archivage des données de sondages n'était pas systématique et souvent désordonné, certains dossiers ou pièces importantes telles que les plans d'implantations des sondages, les coupes de sondages pouvant toujours manquer.

Le reste de l'information collectée a été varié, documents de synthèse et documents analytiques provenant de divers organismes cités auparavant. Dans ce cas, la principale difficulté réside dans le volume qu'il faudrait consulter avant l'obtention des renseignements désirés.

Analyse et sélection des données

En analysant les données obtenues de divers organismes, on constate d'ores et déjà, une répartition irrégulière et discontinue dans la collecte des données. Ceci est dû essentiellement d'une part à l'utilisation des études entrepris sur les différents sites et aux sondages qui ont été réalisés en ayant aucun choix dans leurs localisations, et d'autre part à la non disponibilité de toute l'information existante **N.B :** (L'accès à certaines données nous a été refusé).

Devant cette diversité des données, il n'a été pris en compte que les sites touchés par le phénomène de mouvement de terrain de la ville de Constantine et qui ont une représentativité assez complète du fait qu'ils ont attiré directement aux problèmes de recasement de population, assurant ainsi une certaine régularité et fiabilité des résultats. Ces sites sont déjà énumérés dans la figure II.1 et qui contient au moins 29 zones.

Pour l'utilisation de l'information et la réalisation de la base de données informatique cohérente, une homogénéisation a été effectuée par toutes les données à stocker, en éliminant les sondages mal situés ou sans plan d'implantation précis quel que soit leur nature ou leur qualité.

Cette sélection a permis d'avoir suffisamment de garanties pour une fiabilité des données à stocker sur un support informatique.

Caractérisation des données retenues pour le stockage

Les données sont regroupées à partir de dossiers d'origine diverse. A ce niveau de l'étude, le stockage et l'acquisition des données a été faite sur des tables avec le logiciel Excel. Il s'agit en effet de faire rentrer toutes les valeurs des différents dossiers site par site, sondage par sondage, lithologie qui regroupe les informations géologiques en fonction de la profondeur et les caractéristiques physico-mécanique à savoir les densités humide et sèche (γ_h , γ_d), la teneur en eau naturelle (ω), le degré de saturation (S_r), le pourcentage des passants (%), les consistances limites (W_L , I_p), la pression de consolidation, l'indice de compressibilité, l'indice de gonflement (σ'_c , C_c , C_g), la cohésion et l'angle interne de frottement (c , ϕ).

A ce niveau de la banque, tous les paramètres manquants ou bien les essais n'ont pas donnés de valeurs, dans leurs cases correspondantes on met un slash (/). Toutes ces informations brutes sont à prendre avec précaution ou doivent être corrélés d'une manière convenable pour pouvoir les utiliser avec les résultats de la littérature et les injecter dans des calculs de stabilité ou autre. Par ailleurs, les résultats obtenus des diverses campagnes d'investigations des différents sites mise à part les essais d'identifications physiques qui sont un peu corrects, les valeurs des autres essais seront pris avec beaucoup de soins car ça dépend du type d'essais utilisés dans chaque cas.

Les données brutes des différents sites ont été stockées et traitées pour avoir une meilleure compréhension de ce sujet et afin de mieux traiter ces phénomènes d'instabilité.

Classification des sols de la ville de Constantine

3.5.1. Caractérisation géotechnique

Les profils géotechniques de tous les sites recueillis de la ville de Constantine récapitulent les résultats d'essais réalisés sur des échantillons intacts et remaniés de tous les sondages en fonction de leurs profondeurs figure 3.1 jusqu'à figure 3.32. L'analyse de ces résultats fait apparaître des caractéristiques médiocres en surface et s'améliorent faiblement en profondeur (les limites de plasticités sont supérieures à leurs teneurs en eau $I_p > \omega$ (%), des pressions de consolidations faibles $\sigma'_c < 2$ kg/cm², des cohésions très faibles $C_u < 0.5$ kg/cm²).

A partir de ces données on peut conclure que ces sols sont en train de subir leur diagenèse ou leur consolidation et qu'ils peuvent se mettre en mouvement sous n'importe quel chargement.

Mosquée et l'Université Islamique-Émir-Abdelkader

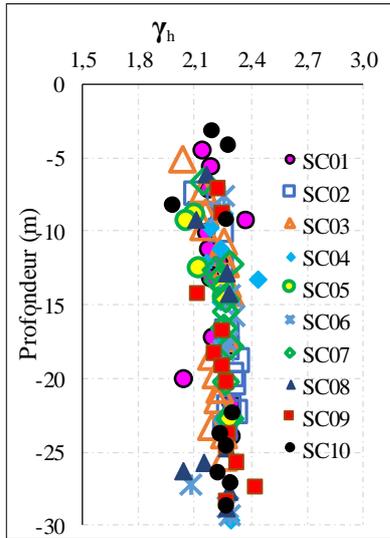


Figure 3.1. Densité humide contre profondeur

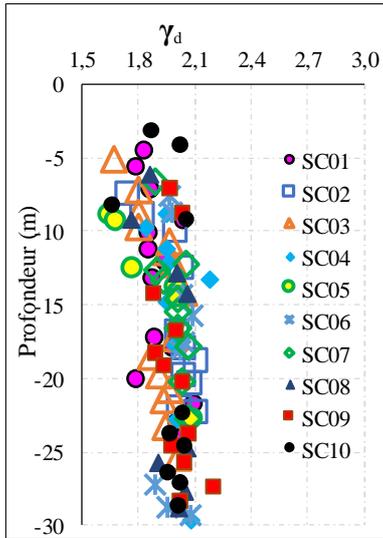


Figure 3.2. Densité sèche contre profondeur

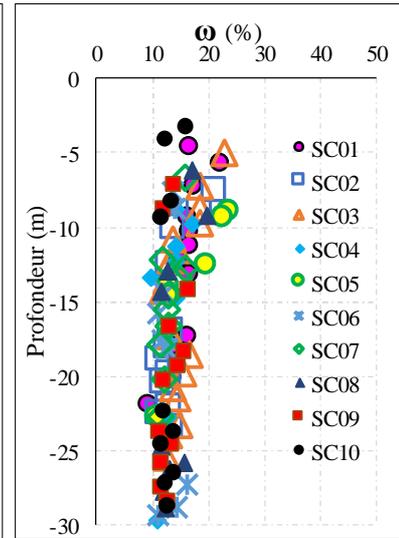


Figure 3.3. Teneur en eau contre profondeur

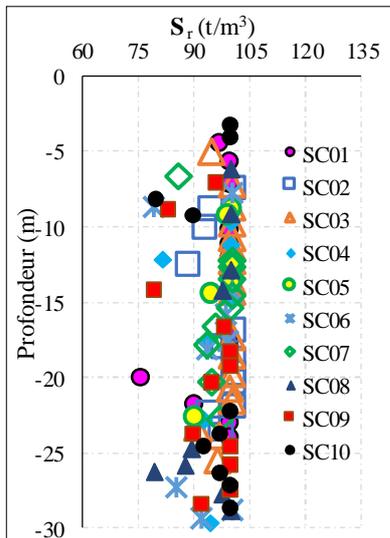


Figure 3.4. Degré de saturation contre profondeur

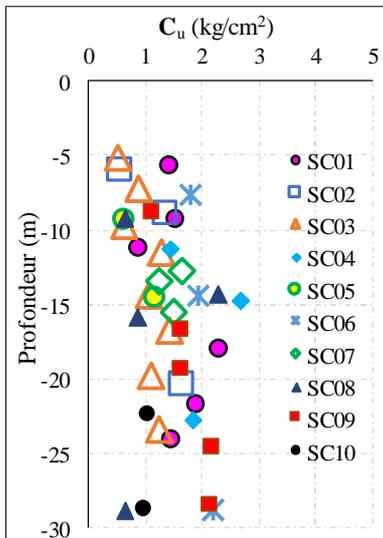


Figure 3.5. Cohésion non drainée contre profondeur

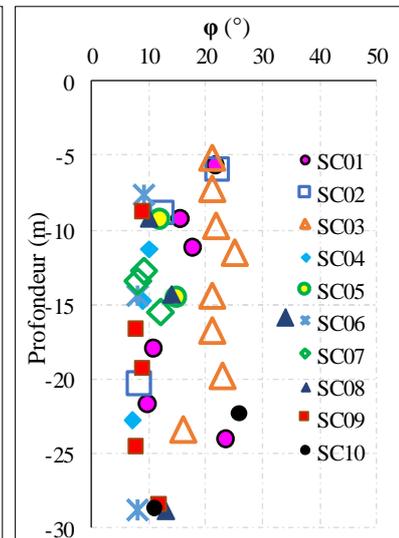


Figure 3.6. Angle de frottement contre profondeur

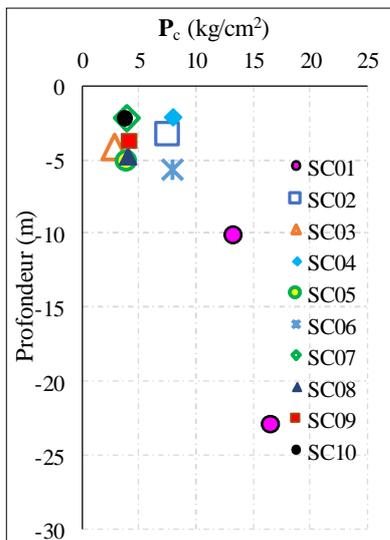


Figure 3.7. Pression de consolidation contre profondeur

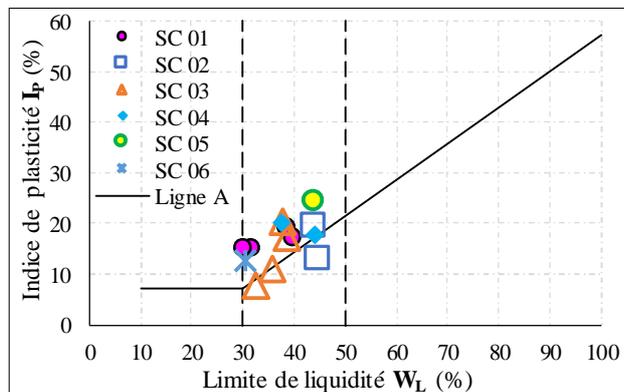


Figure 3.8. Limite de liquidité contre indice de plasticité

Boussouf

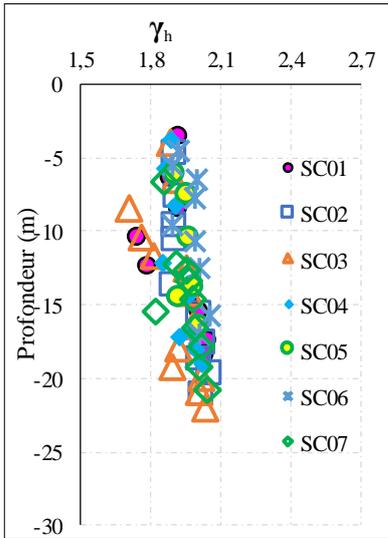


Figure 3.9. Densité humide contre profondeur

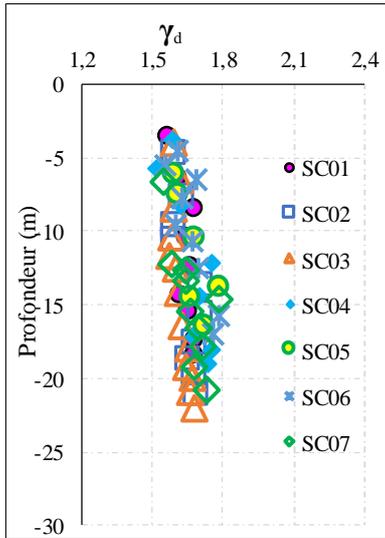


Figure 3.10. Densité sèche contre profondeur

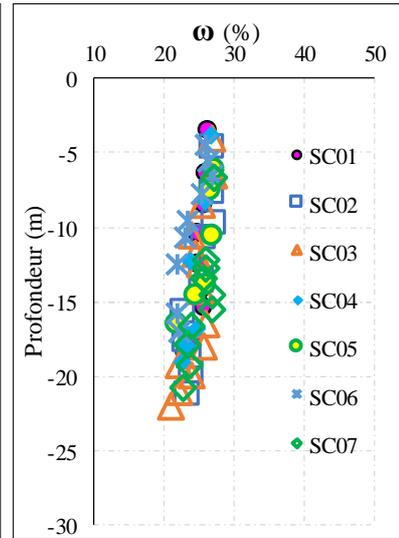


Figure 3.11. Teneur en eau contre profondeur

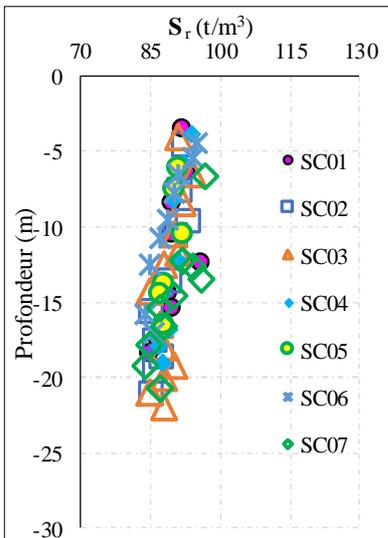


Figure 3.12. Degré de saturation contre profondeur

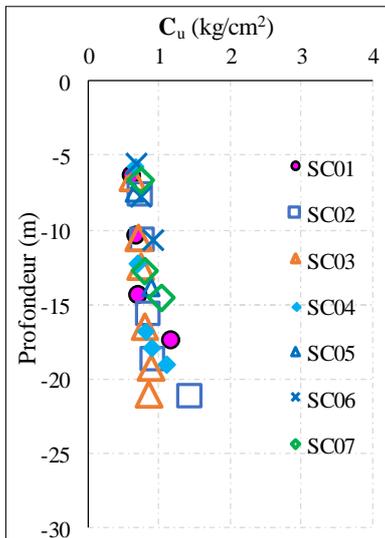


Figure 3.13. Cohésion non drainée contre profondeur

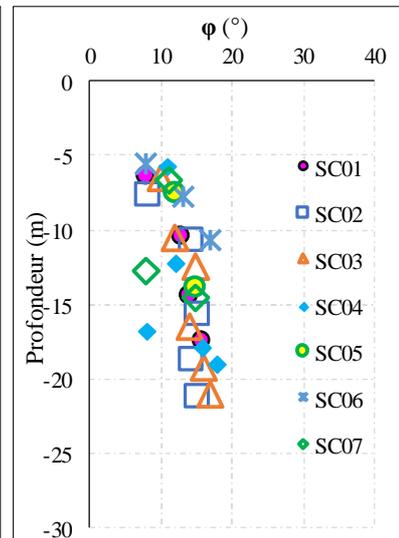


Figure 3.14. Angle de frottement contre profondeur

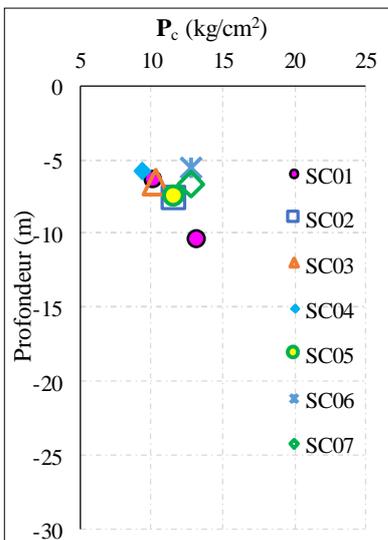


Figure 3.15. Pression de consolidation contre profondeur

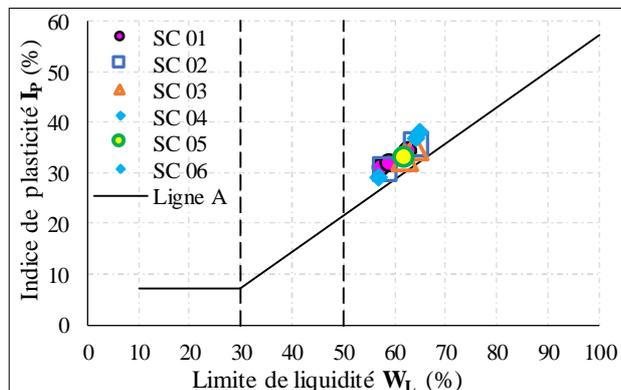


Figure 3.16. Limite de liquidité contre indice de plasticité

Boudraa-Salah

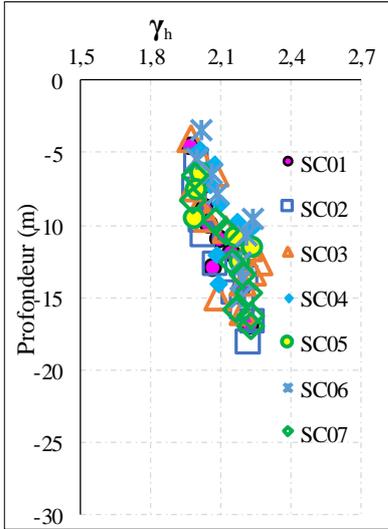


Figure 3.17. Densité humide contre profondeur

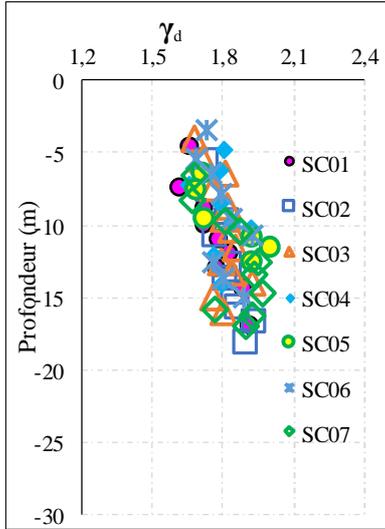


Figure 3.18. Densité sèche contre profondeur

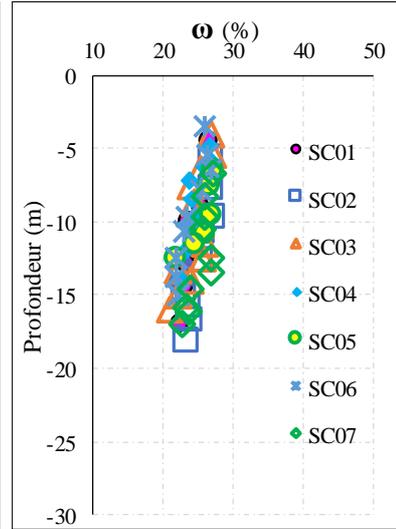


Figure 3.19. Teneur en eau contre profondeur

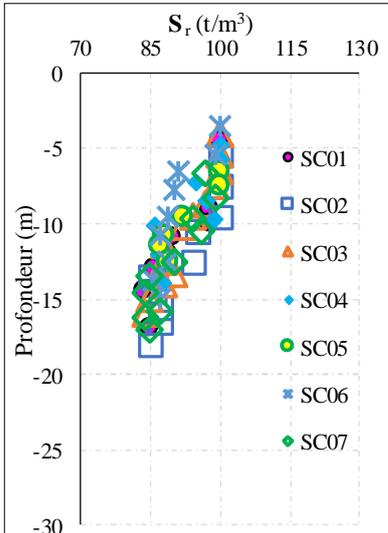


Figure 3.20. Degré de saturation contre profondeur

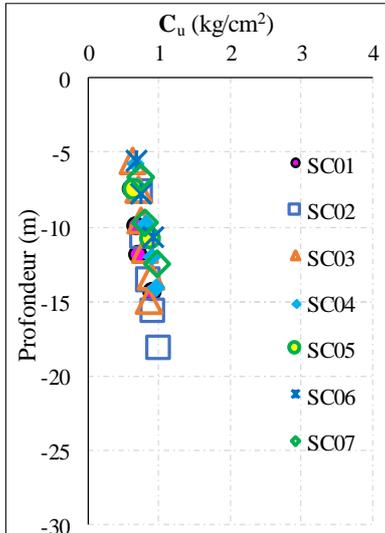


Figure 3.21. Cohésion non drainée contre profondeur

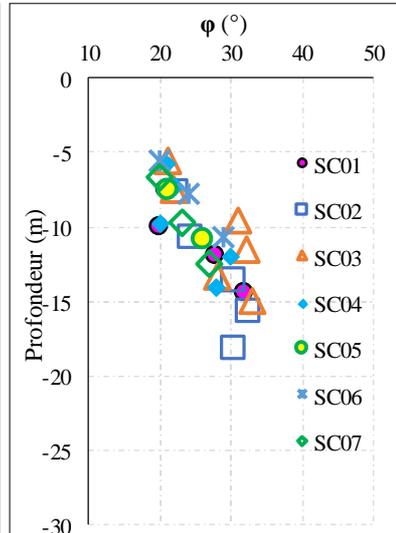


Figure 3.22. Angle de frottement contre profondeur

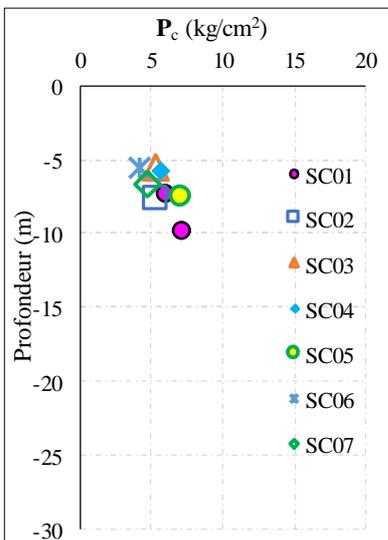


Figure 3.23. Pression de consolidation contre profondeur

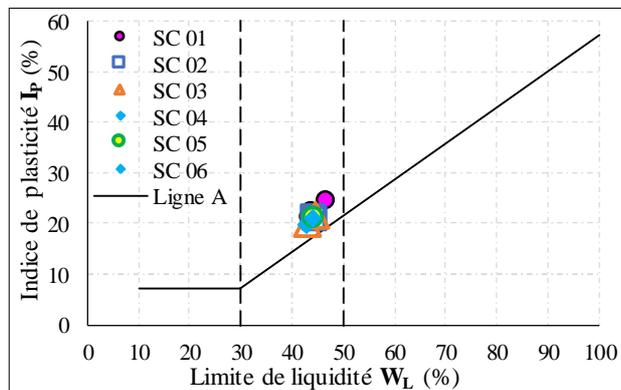


Figure 3.24. Limite de liquidité contre indice de plasticité

Ben-Chergui

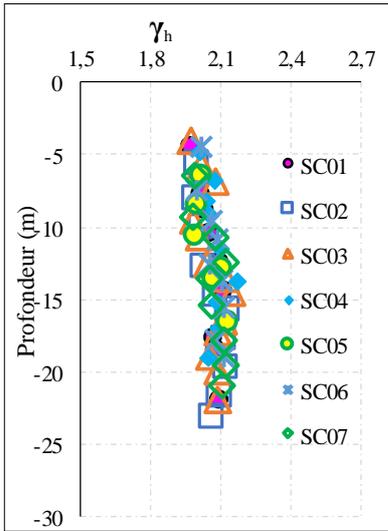


Figure 3.25. Densité humide contre profondeur

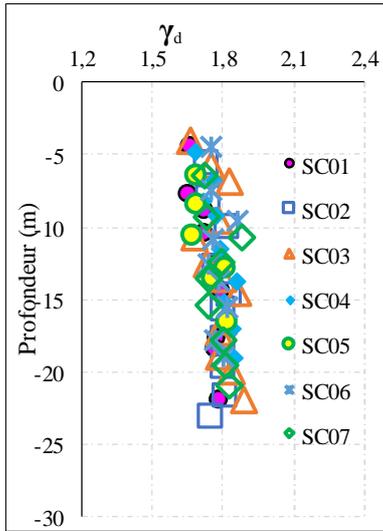


Figure 3.26. Densité sèche contre profondeur

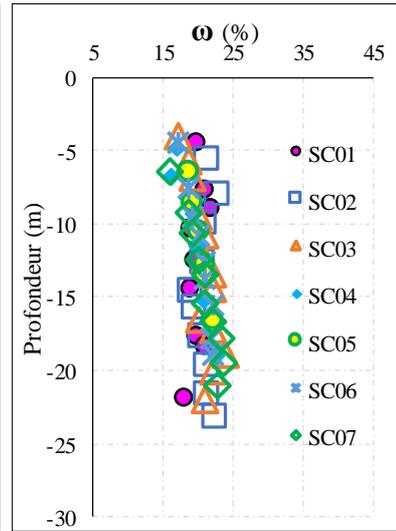


Figure 3.27. Teneur en eau contre profondeur

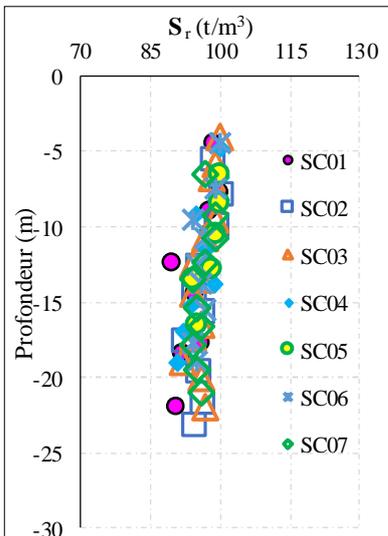


Figure 3.28. Degré de saturation contre profondeur

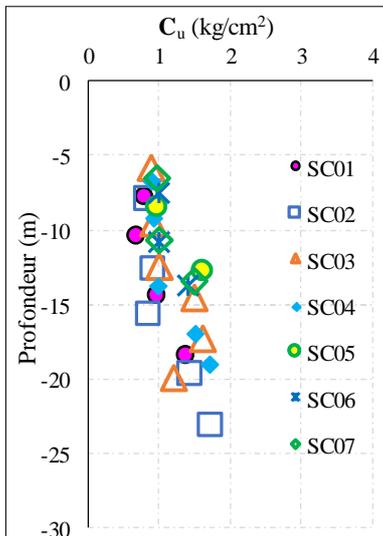


Figure 3.29. Cohésion non drainée contre profondeur

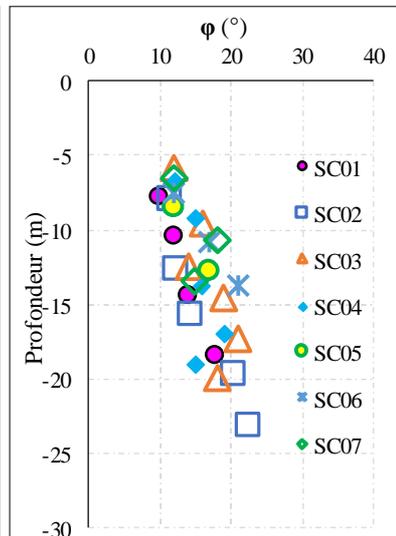


Figure 3.30. Angle de frottement contre profondeur

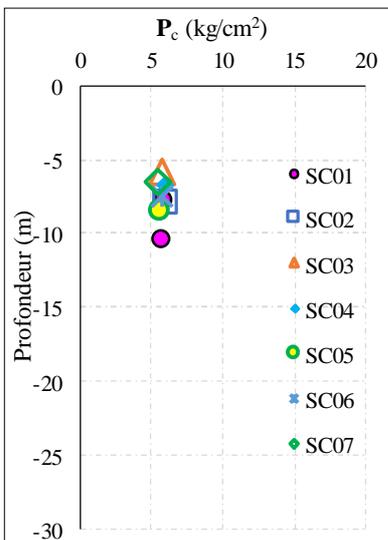


Figure 3.31. Pression de consolidation contre profondeur

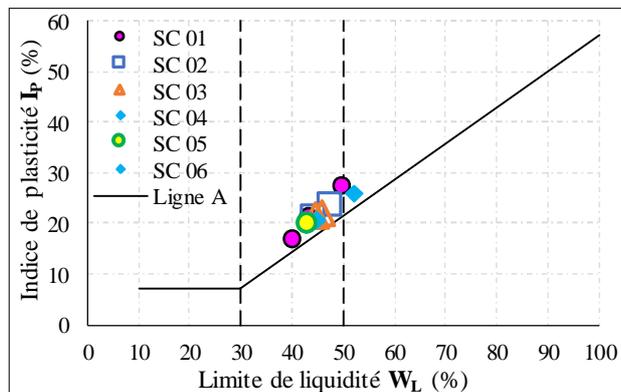


Figure 3.32. Limite de liquidité contre indice de plasticité

La compilation des données dans la base a permis de mettre en évidence l'existence de sols à problèmes sur toute la zone d'étude. Le choix de notre analyse s'est porté sur quatre sites instables à savoir Boussouf, Ben Chergui, Boudraa Salah et la Mosquée Emir Abdelkader et qui ont montrés des valeurs très faibles concernant la cohésion non drainée, une saturation complète sur ces sites, des argiles plastiques à très plastiques et un angle interne de frottement faible. Tous ces résultats laissent prévoir des sols à problèmes allant même jusqu'au sol résiduels. On constate que c'est des argiles soient en état de peu ou pas consolidés ce qui prouve encore une fois l'existence de ces sols à problèmes.

Par exemple voici les résultats obtenus par des graphes du site de Boussouf, Il s'agit ici de formations profondes, constituées d'argiles qui peuvent être limoneuses.

- Masse volumique sèche

Pour la majorité des sites collectés, les valeurs sont comprises entre 1.65 tf/m^3 et 2.05 tf/m^3 .

- Teneur en eau

Les valeurs de teneur en eau sont comprises entre 12 % et 28 %.

- Limites d'Atterberg

Les valeurs de l'indice de consistance sont situées entre 0.6 et 1.4.

Ces terrains correspondent à un sol plastique, de consistance dure.

3.5.2. Caractérisation

Un travail de fond sur ces types de sols à problèmes a été entrepris en utilisant certains essais triaxiaux et qui vise à déterminer les paramètres de résistance des sols argileux dans la zone de glissement de terrain de Constantine et à étudier leur variabilité en profondeur. Un essai triaxial en cellule de contrainte consolidée non drainée (CU) avec mesure de la pression interstitielle a été utilisé. De plus, certaines caractéristiques physiques ont été déterminées et utilisées pour la classification et la description des sols. À cette fin, des échantillons intacts et remaniés représentant plusieurs parties de la zone mentionnée à Constantine ont été collectés et testés. Il propose certains résultats d'essais triaxiaux visant à apprécier l'influence sur le comportement limite des sols argileux et à rendre compte de ce que l'on peut déduire des données expérimentales disponibles sur la ville de Constantine (Algérie).

La plage de variation des caractéristiques géotechniques de ces argiles naturelles, ainsi que leurs valeurs moyennes, sont présentées dans le tableau 3.1. Par conséquent, il est crucial de reconnaître ces sols et de savoir et comprendre leurs caractéristiques mécaniques en raison du risque potentiel posé aux projets d'ingénierie fondés sur des sols glissants et s'effondrant. Cette étude constitue la première tentative de combler le manque de connaissances sur ces argiles à Constantine et à aider les gestionnaires urbains pour les futures constructions sur de tels sols.

Tableau 3.1. Propriétés géotechniques de certains spécimens dans la région de Constantine.

Description	Prof (m)	LL	LP	PI	K_0	G_s	Initiale m/c	Rupture m/c	ϕ'	$K_{jaky} = \frac{1}{1 - \sin \phi'}$	$K_{brooker} = 0.95 - \sin \phi'$	$K_0 = \tan^2(45 - (\phi'/2))$
Argile limoneuse fissure verdâtre - Intacte	2.6	60	25	35	*0.90	2.696	33.591	32.17	25°	0.58	0.53	0.614
Argile limoneuse verdâtre avec des racines tendres Intacte	6.1	74	31	43	0.49	2.696	51.94	39.071	27.5°	0.54	0.48	0.57
Vase argileuse molle - Intact	4.7	167	71	96	*0.64	2.372	79.38	114.15	19.5°	0.67	0.62	0.72
Argile Limoneuse dure - Intact	9.0	63	27	36	*0.85	2.696	48.12	37.65	25.5°	0.59	0.54	0.62
Argile sableuse molle alluviale Intacte	7.2	33	17	16	0.47	2.663	25	16.73	27°	0.55	0.49	0.58
Argile verdâtre uniforme dure Remanié	26.2	73	20	47	0.69	2.702	26.50	34.38	15.5°	0.73	0.68	0.83
Argile orangeâtre à marron dure	1	110	30	80	0.71	2.759	43.0	40.07	13°	0.77	0.72	0.88

Le temps total nécessaire pour réaliser la consolidation complète de K_0 et le cisaillement était d'environ deux semaines pour chaque spécimen. La résistance au cisaillement des échantillons d'argile intact et remaniés avec différentes durées de pollution a été évaluée à l'aide d'un appareil triaxial en cellule de contrainte contrôlé numériquement, pour l'essai de cisaillement triaxial consolidé non drainé. Ces échantillons ont été testés avec un taux de cisaillement réglé à 0,1% par minute. Les déformations axiales et volumétriques étaient à leur maximum à 5 et 15%, respectivement. L'essai de compression triaxial consolidé non drainé (CU) avec mesure de la pression d'eau des pores a été réalisé à l'aide d'un dispositif de chargement contrôlé par la déformation à un taux de 0,05% par minute. Cela a permis de calculer les paramètres de résistance au cisaillement du matériau saturé en termes de contrainte effective. Le résultat de la diffraction des rayons X sur l'échantillon intact est donné dans la figure 3.33, Athmania et al. (2009) et Xu et al. (2019). Le premier minéral de l'argile intact comprend du quartz, de la montmorillonite, de la kaolinite et de l'illite, Stevenson & Gurnick (2016) et Ducasse et al. (2020).

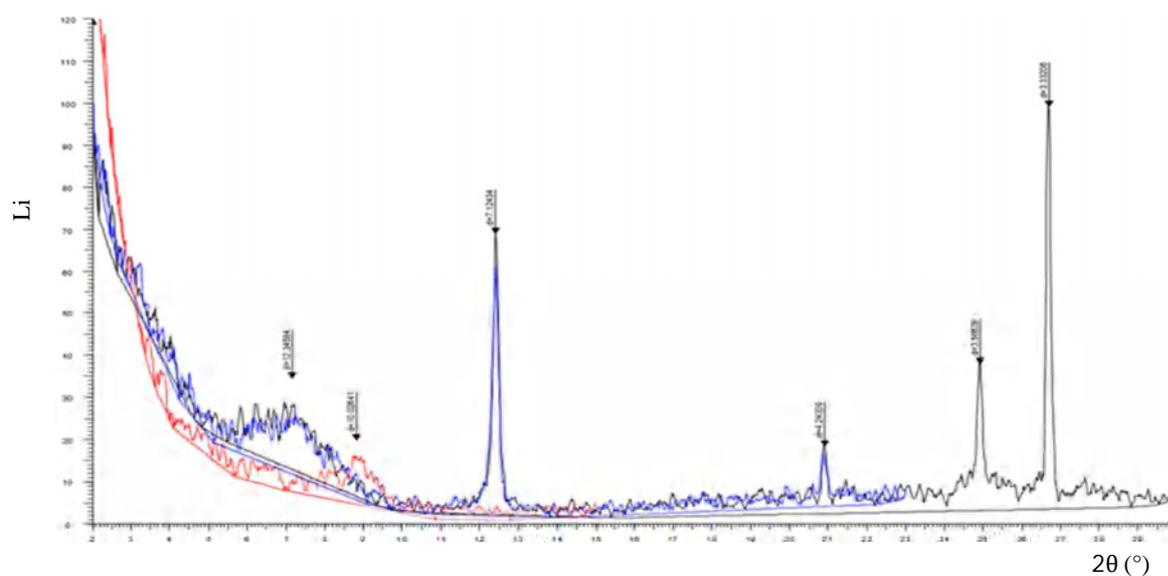


Figure 3.33. Diffraction des rayons X d'argile intacte (Athmania, 2009).

Le processus méthodologique suivant est présenté dans le schéma de ce projet de recherche (figure 3.34).

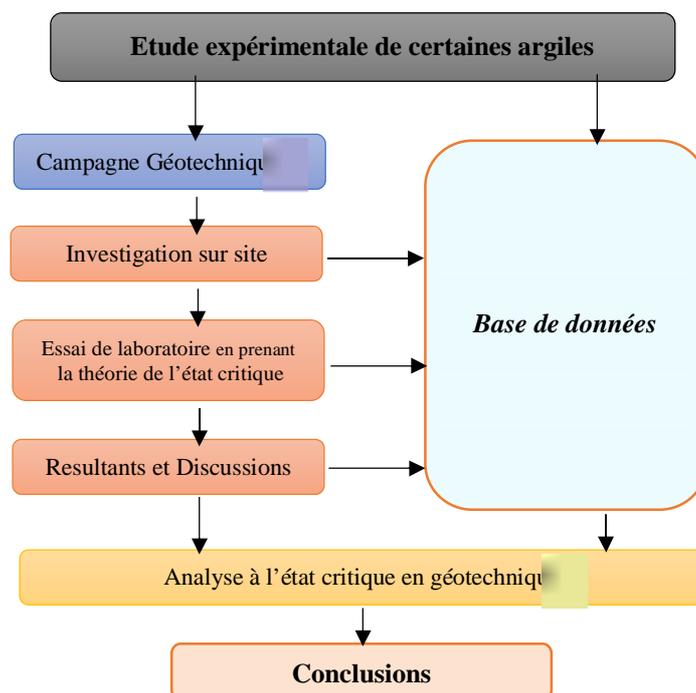


Figure 3.34. Organigramme du concept d'essai.

🏗️ Résultats des essais

Pour déterminer le coefficient de pression latéral du sol au repos et les paramètres de résistance effectives, les essais à l'aide de la cellule de chemin de contrainte ont été réalisés sur les échantillons suivants de la ville de Constantine, à savoir :

- Quatre échantillons intacts provenant des carottes U4 du site de l'Université.
- Un échantillon intact du site de la Mosquée Emir Abdelkader.
- Un échantillon remanié du site de Ciloc.
- Un échantillon remanié du site de Boussouf.

Tous les sept (07) échantillons avaient un diamètre de 38 mm et une longueur de 84 mm. Les propriétés des sept échantillons testés au laboratoire sont données dans les figures suivante : figure 3.35 à figure 3.38.

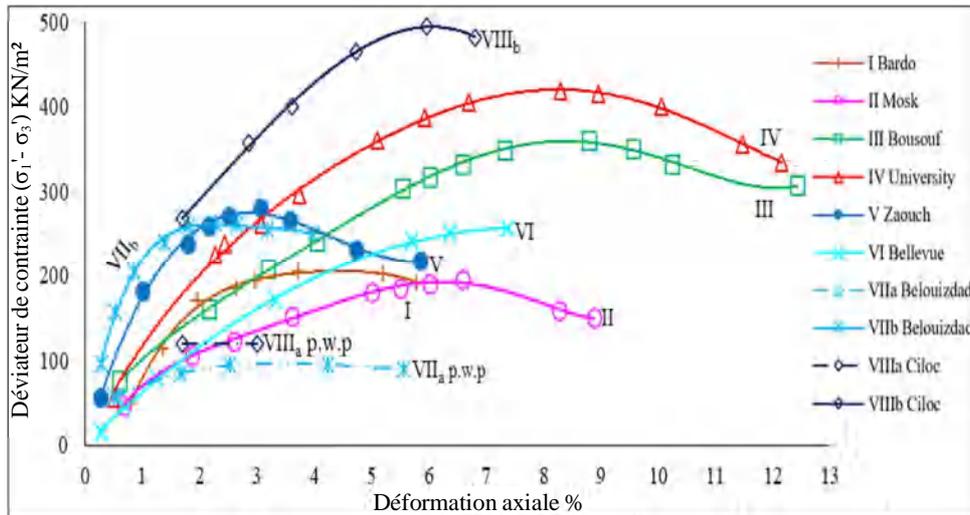


Figure 3.35. Déviateur de contrainte contre la déformation axiale pour les échantillons étudiés.

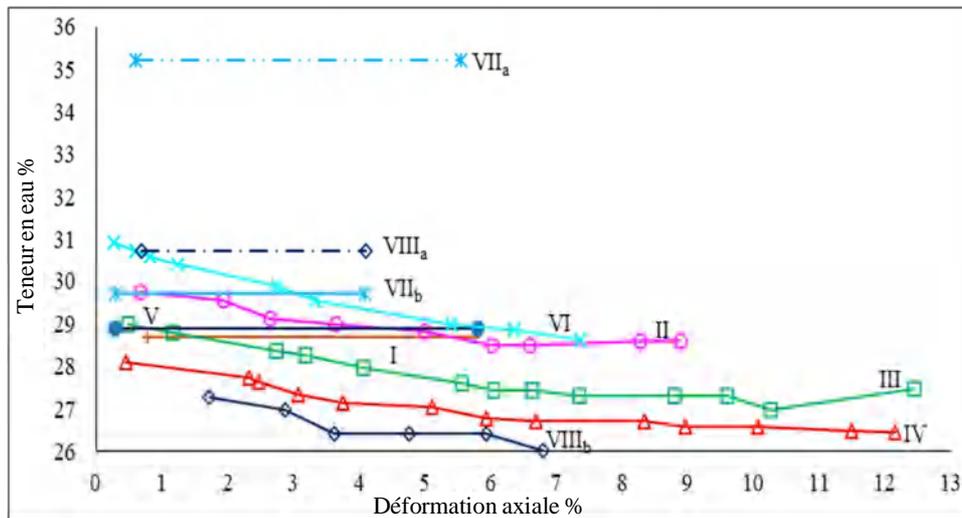


Figure 3.36. Pourcentage de la teneur en eau contre la déformation axiale pour les échantillons étudiés.

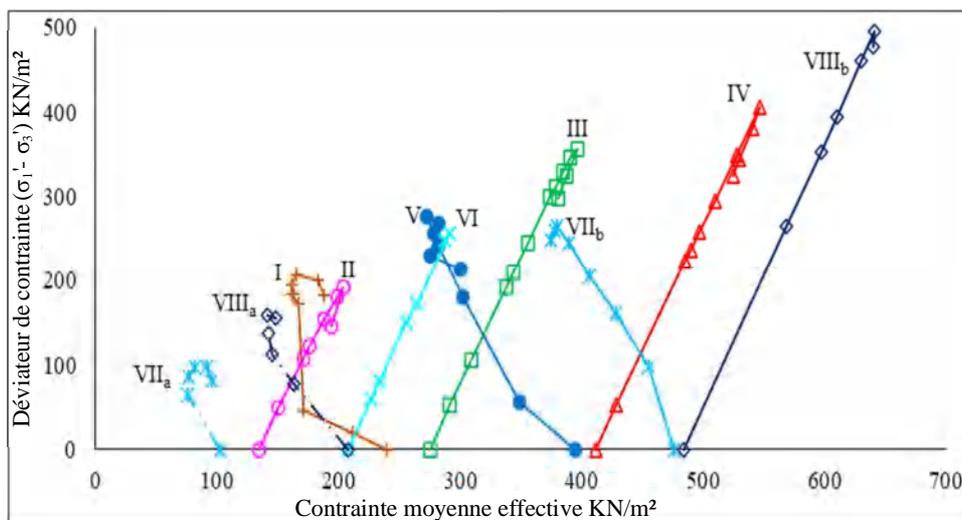


Figure 3.37. Déviateur de contrainte contre la contrainte moyenne effective pour les échantillons étudiés.

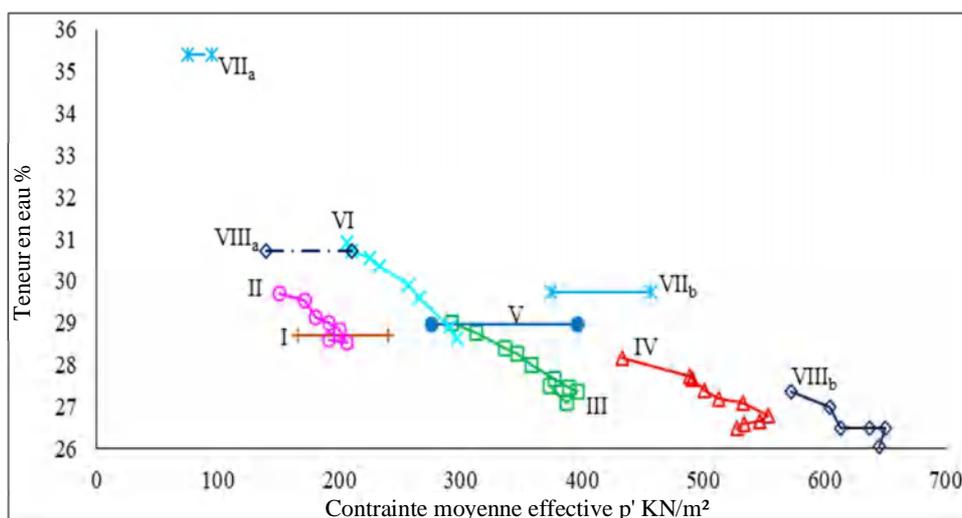


Figure 3.38. Pourcentage de la teneur en eau contre la contrainte moyenne pour les échantillons étudiés.

Sauf pour l'échantillon II (figure 3.35), une tendance reconnaissable en ligne droite est visible entre la contrainte horizontale effective et la contrainte verticale. Dans le cas précédent (Mosquée Emir Abdelkader), les quelques points qui variaient sensiblement de la ligne droite ont été enregistrés peu après une augmentation de la pression de la cellule tout autour, lorsque la réponse de la pression des pores était considérablement plus basse (c'est-à-dire, $\Delta\sigma > \Delta u$). Le rapport σ'_h / σ'_v est ensuite revenu à la ligne K_0 après environ 8 heures. La figure 3.38 montre la relation entre la déformation volumétrique et le logarithme de p' pour tous les tests. Elle indique également que les échantillons suivent les courbes de consolidation vierges tout au long de la séquence de chargement. La pression de surconsolidation a pu être déterminée pour tous les échantillons de la région, sauf l'échantillon de Boussouf, ce qui pourrait être dû à la procédure d'échantillonnage. Cela est principalement causé par la structure cassante des particules argileuses.

La zone desséchée aurait un rapport de surconsolidation plus élevé. La relation entre la contrainte/déformation est montrée dans les figures 3.35 à 38 pour l'étape d'essai triaxial non drainé jusqu'à la rupture, comme discuté par Jelinek et al. (2002) et Ozbay & Cabalar (2016). Les grandes déformations étaient dues au fait que les essais étaient contrôlés par la contrainte à travers le piston.

La tentative de montrer une relation entre K_0 et l'indice de plasticité a donné une dispersion de valeurs qui n'a pas confirmé la relation étroitement mentionnée par Bjerrum (1954), Zhu & Wang (2019) et Silva et al. (2022). L'exception était principalement liée aux argiles alluviales intactes du site de l'Université et était attribuée à la présence de matière organique. Une relation linéaire décente entre K_0 et φ' est montrée dans la figure 3.39 et cela correspond mieux à la formule proposée par Brooker & Ireland (1965), pour les sols cohérents. Les échantillons du site de l'Université qui s'écartaient complètement du graphique ont été récupérés.

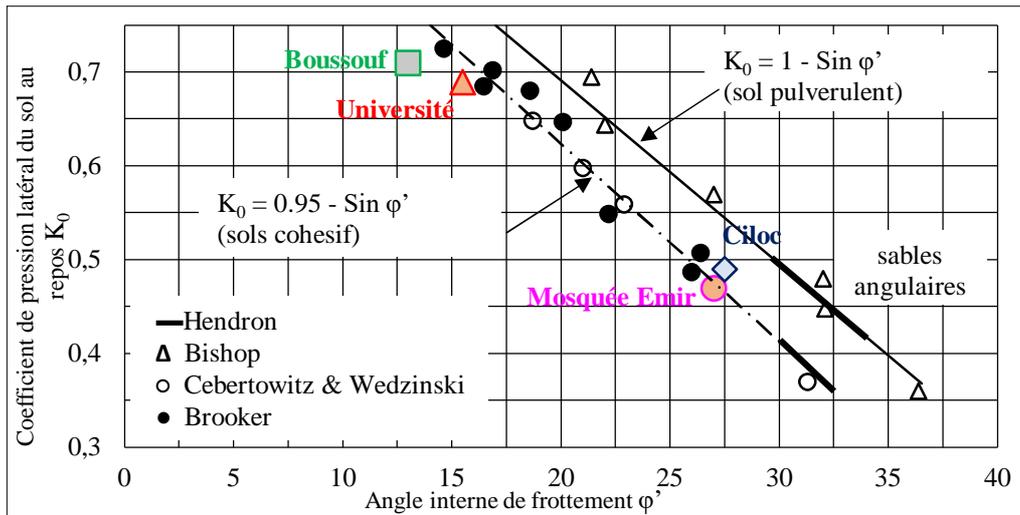


Figure 3.39. Résultats du coefficient latéral au repos et l'angle interne de frottement de la ville de Constantine reproduit par Chandler (1972).

Il convient de mentionner que tous les échantillons testés dans la cellule de chemin de contrainte de la région de Constantine se trouvaient sur la courbe de Brooker et Ireland.

📷 Analyse et Discussion selon la théorie de l'état critique

Une série de dix essais consolidés lentement drainés et non drainés sur des échantillons intacts de 38 mm de diamètre provenant d'un site de la région de Constantine a été analysée selon le modèle de l'état critique. La région de Constantine comprend des dépôts d'argiles altérées de la série Mio-Pliocène. Une première appréciation du comportement de ces échantillons testés est présentée dans la figure 3.35. Une résistance au cisaillement maximale est observée, caractéristique de la surconsolidation, et survient à une déformation axiale de 7% à 10%. Avec l'augmentation de la vitesse de déformation, la résistance diminue, comme le montre la figure 3.35. Les résistances maximales et finales sont suivies à travers les tracés des chemins de contrainte effective dans la figure 3.37. Une relation assez cohérente entre les lignes de consolidation et de rupture est visible ; bien que des écarts par rapport à une courbe lisse se produisent dans les deux cas avec une légère variation de la teneur en eau. Cependant, il a été constaté qu'un meilleur ajustement de courbe pouvait être obtenu si les teneurs en eau au début et à la rupture étaient données sous forme de rapport de la teneur en eau initiale, comme le montre la figure 3.40.

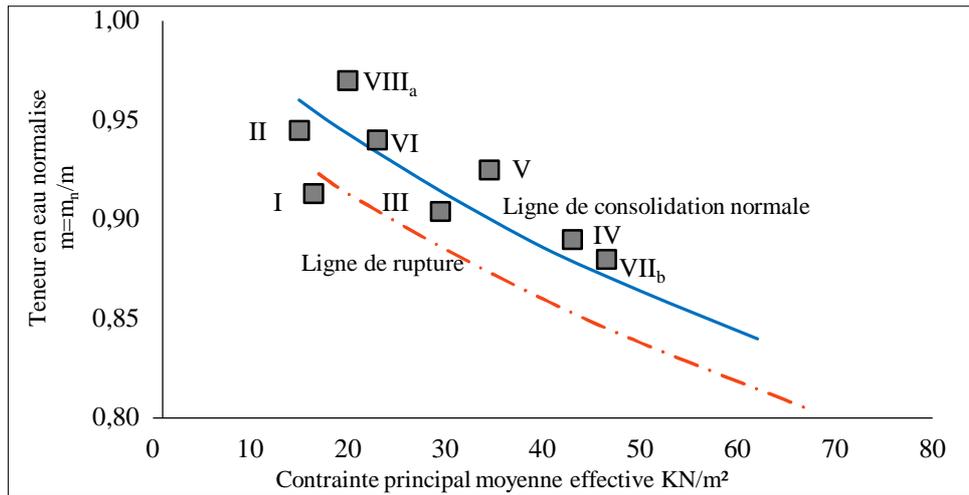


Figure 3.40. Ligne de consolidation et la ligne de rupture pour une teneur en eau normalisée.

De plus, tracer le volume spécifique en fonction du logarithme de p' pour les points de consolidation et de rupture a donné des lignes parallèles avec la même pente ($\lambda = 0,09$) et les valeurs de $N = 2,272$ et $\Gamma = 2,252$, comme le montre la figure 3.41. Cette linéarité correspond bien à la théorie de l'état critique de Yin et al. (2013) et Hamidi et al. (2015).

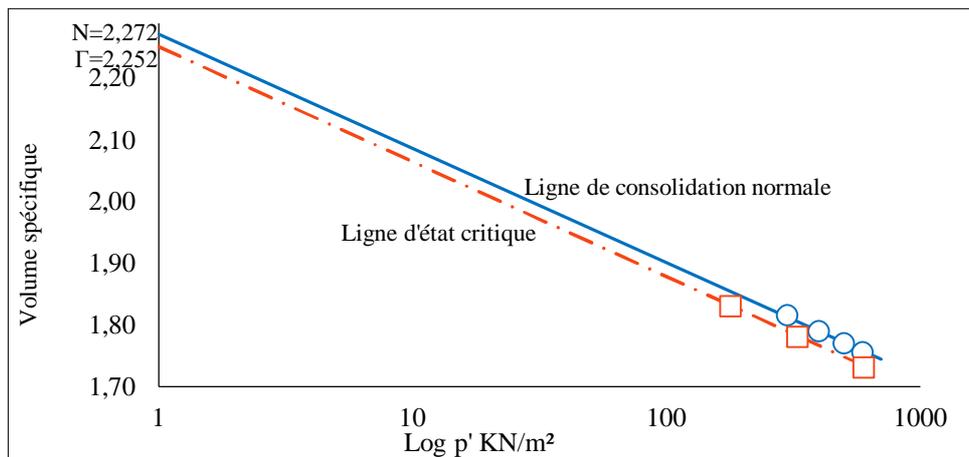


Figure 3.41. Ligne de consolidation à l'état critique pour un volume spécifique et une contrainte de consolidation.

Les principaux minéraux argileux dans les zones de glissement de terrain du Miocène-Pliocène de Constantine sont la montmorillonite et la kaolinite, qui ont la résistance au frottement la plus faible parmi les minéraux argileux. À mesure que la teneur en montmorillonite augmente, l'angle de frottement interne diminue et devient un angle résiduel qui peut créer des glissements de terrain dans cette région (figure 3.39).

La figure 3.42 montre la ligne d'état critique pour la surface de Hvorslev et la surface de Roscoe dans le plan $q' - p'$. L'ajustement linéaire le mieux ajusté a été tracé en passant entre les valeurs maximales et finales, renvoyées à l'origine. Cela définit la ligne d'état critique. Il a également été possible de tracer la surface de Hvorslev et la surface de Roscoe dans le plan $q' - p'$ à la rupture pour trois échantillons.

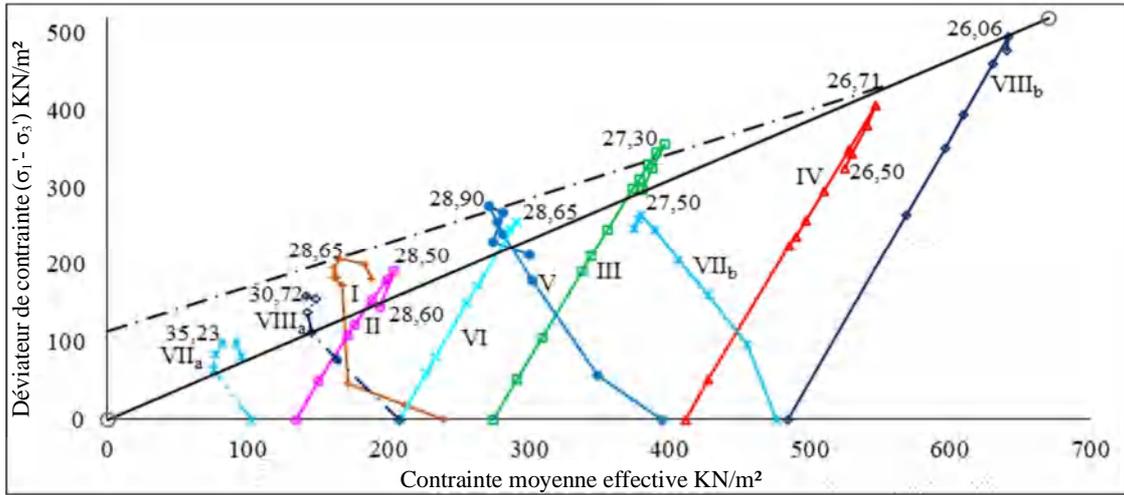


Figure 3.42. Déviateur de contrainte et contrainte moyenne effective pour les échantillons étudiés.

La théorie de l'état critique est un concept lié à la surface limite d'état à l'intérieur de laquelle le comportement de l'échantillon est confiné. Cela a été obtenu en normalisant à la fois la contrainte déviatoire et la contrainte effective moyenne par la pression équivalente (p_e'). La valeur de la pression équivalente a ensuite été calculée lorsque le volume spécifique variait ou restait constant pour chaque test, qu'il s'agisse d'un essai drainé ou non drainé, en appliquant l'équation suivante formulée par Rampello et al. (1997) :

$$p_e' = \exp\left(\frac{N-V}{\lambda}\right) \dots \dots \dots \text{eq.3.1.}$$

Il a été observé que la plupart des échantillons se situent dans la partie légèrement surconsolidée de la limite d'état, comme le montre la figure 3.43. La condition de contrainte effective nulle, telle que décrite par Carey & Petley (2014) et Yin et al. (2021), est représentée par une " traction du sol" tracée dans le plan q/p' avec une inclinaison de $q/p' = 3$ à travers l'origine pour aider à définir le comportement en rupture. Le chemin suivi par les essais drainés et non drainés avait à peu près la même forme courbe dans le plan $q'/p_e' - p'/p_e'$. Cependant, la plupart des échantillons tendent vers la ligne d'état critique à partir des deux parties de la surface limite d'état.

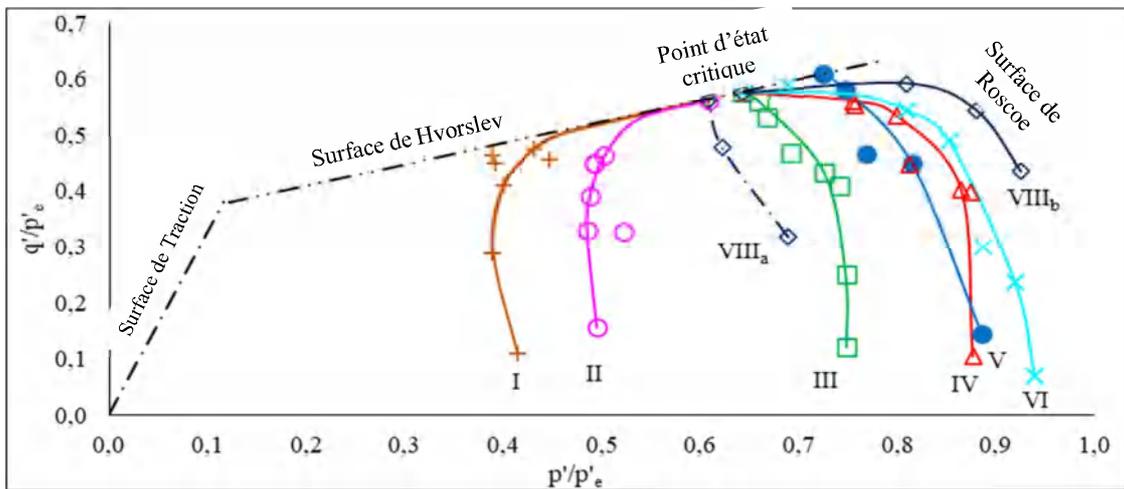


Figure 3.43. Enveloppe critique dans le domaine q'/p' pour les échantillons étudiés.

La ligne d'état critique est délimitée à gauche par la surface de Hvorslev qui commence à partir de la coupure en tension avec $c = 0,33$ et une pente $m = 0,38$ et elle est délimitée à droite par la surface de Roscoe qui doit en fait commencer à partir de la ligne de consolidation normale. Étant donné que le sol (en général) ne peut pas résister aux contraintes de traction, la rupture en tension a commencé à partir de l'origine et a parcouru la surface de Hvorslev avec une pente de 3. Ces trois surfaces ont formé la surface complète de la limite d'état, comme le montre la figure 3.43. Il était impossible de déterminer directement le rapport de surconsolidation des échantillons testés car dans chaque cas, il variait considérablement en raison des effets de l'altération avec la profondeur. En comparant aux autres travaux publiés par Abdelhamid et Krizek (1976), Mesri et al. (1993) et Qiu et al. (2020), il a été constaté que les échantillons testés se trouvaient dans la classification des matériaux de glissement de terrain (figure 3.44). Le degré d'altération de ce matériau est donc évident.

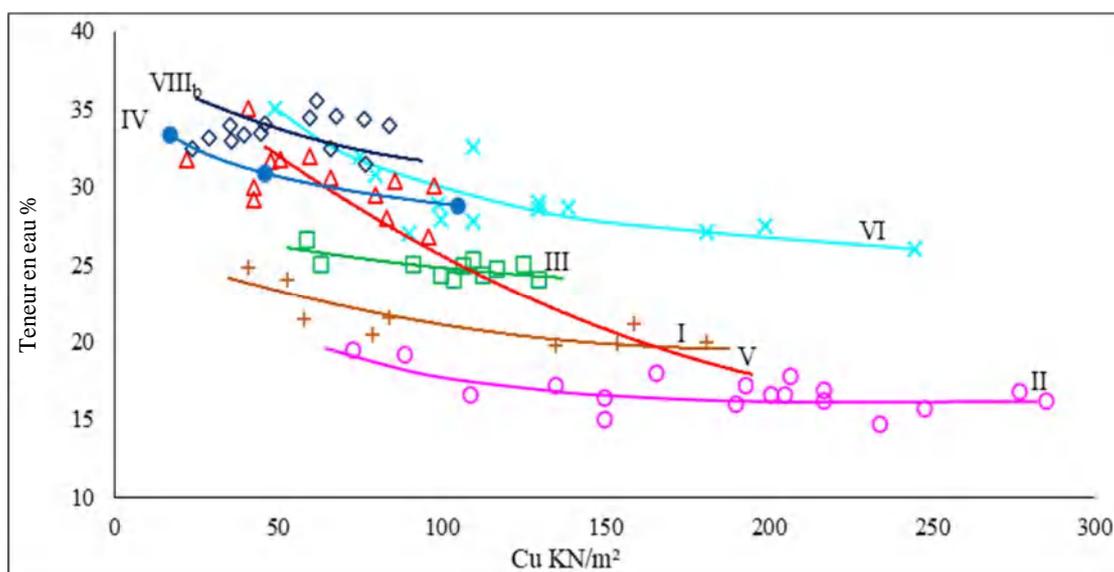


Figure 3.44. Teneur en eau et compression non drainée.

Confrontation avec les résultats de la littérature

De nombreux auteurs ont proposé, après étude statistique de résultats de laboratoire ou in situ, plusieurs relations empiriques entre les paramètres mécaniques classiques et d'autres paramètres physiques plus faciles à obtenir.

Pour l'approche des corrélations, on a pris à titre d'exemple le coefficient latéral des terres au repos d'un site (Emir Abdelkader) et on a constaté qu'il variait de 0,48 à 0,55 en fonction de la relation indirecte de Flavigny, Massarsch, par contre en fonction de l'angle interne de frottement sa valeur varie de 0,6 à 1, on constate que les valeurs calculées indirectement par Jacky, Mayne et Kulhawy sont pratiquement les mêmes. Pour ce qui est de la cohésion non drainée en fonction de la teneur en eau, on constate que c'est une forte cohésion pour la même teneur en eau ; Cette constatation nous permet de

conclure que c'est des argiles surconsolidées. Concernant l'angle interne de frottement on constate que cet angle est petit par rapport au pourcentage des particules fines inférieure à $2\mu\text{m}$. Par contre pour l'indice de plasticité en fonction de $sin\phi$ on remarque que pratiquement c'est une droite ayant la même abscisse I_p et la valeur maximale en ordonnée et ceci toujours pour le site Emir –Abdelkader.

Pour le cas des matériaux argileux qui nous intéresse ici, nous avons utilisé aussi le diagramme obtenu par Skempton et Delory (1957). On constate que les valeurs obtenues du rapport C_u dans les essais non consolidés non drainés à la pression effective du sol sus-jacent P_0' , pour le cas du site de Boussouf, semblent se positionner en droites parallèles figure 3.45.

- Zone B représente l'argile brune, qui coïncide avec la relation de Skempton et Delory (1957).

$$C_u/P_0' = 0.11 + 0.0037 I_p \dots \dots \dots \text{eq.3.2.}$$

Le rapport C_u/P_0' est sensiblement constant ce qui représente des argiles normalement consolidés et relativement homogènes

- Zone A représenté l'argile jaunâtre gypseuse figure 3.45 et pourrait être représenté par l'équation suivante.

$$C_u/P_0' = 0.62 + 0.0046 I_p \dots \dots \dots \text{eq.3.3.}$$

- Zone C représente la couche du remblai figure 3.45 et représenté par

$$C_u/P_0' = - 0.096 + 0.0053 I_p \dots \dots \dots \text{eq.3.4.}$$

Ce rapport est faible par rapport à la zone B et A et il indique bien la consistance et la compacité de ce remblai.

En se référant aux estimations des propriétés établi par Peck et Reed, toujours pour le cas du site de Boussouf, on constate que pour une teneur en eau moyenne ($\omega = 25\%$) de notre site figure 3.46, les valeurs de la résistance à la compression R_c sont assez faibles ($R_c = 1.5 \text{ kg/cm}^2$). Ce qui confirme l'état de consolidation de ce site ainsi que sa nature lithologique.

Toutes ces constatations ont été faite à partir de la base des données et dont on ne peut pas reproduire ici tous ces graphes explicatifs.

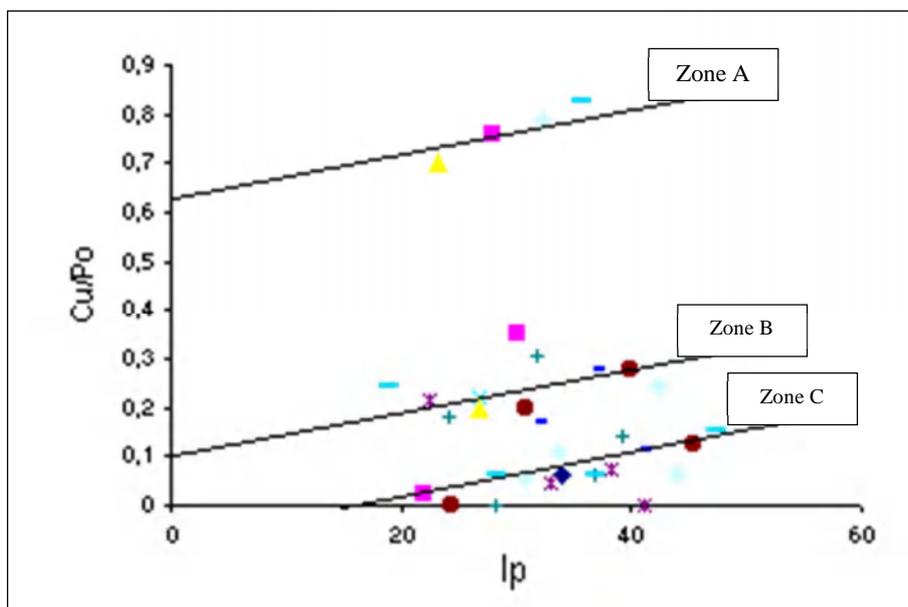


Figure 3.45. Relation entre C_u/P_o et I_p pour les argiles de Boussouf.

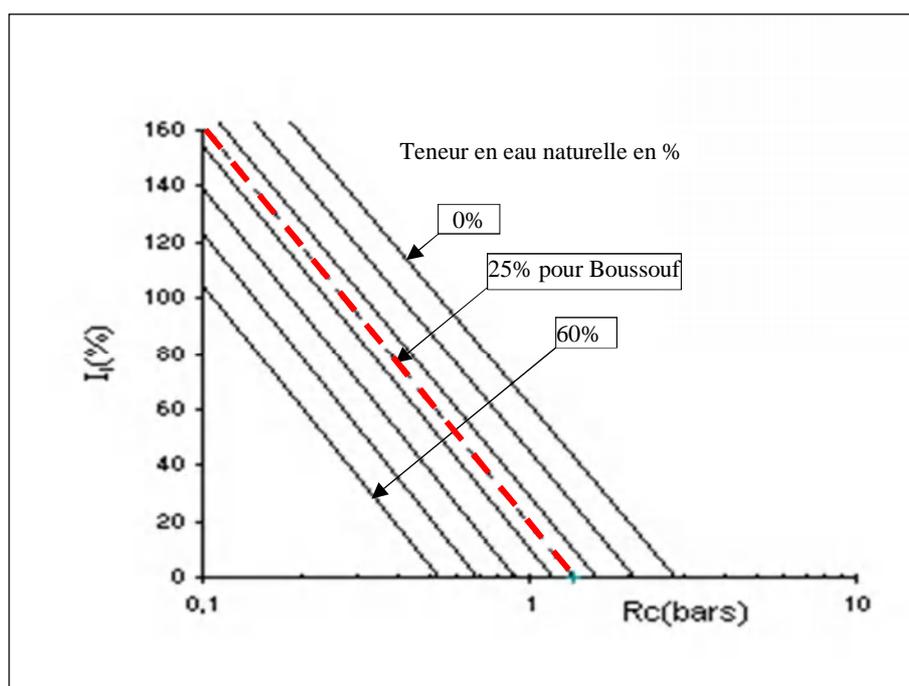


Figure 3.46. Relation entre l'indice de liquidité et la résistance à la compression simple pour le site de Boussouf (d'après Peck 1940).

III Détermination des caractéristiques résiduelles

La stabilité des terrains, déjà affectés par des glissements anciens ou réactivés, doit être menée en utilisant les caractéristiques résiduelles Alhayari. Elles sont obtenues à partir des essais de cisaillement alternés à la boîte circulaire.

Seulement dans les terrains argileux ou marneux, il y a lieu de distinguer :

- Les caractéristiques de cisaillement à court terme C_u et φ_u (essai non consolidé non drainé).
- Les caractéristiques de cisaillement à long terme C' et φ' (essai consolidé drainé, essai consolidé non drainé avec la mesure de la pression interstitielle).
- Les caractéristiques résiduelles C_r et φ_r (essai de cisaillement alterné).

L'évaluation de φ_r pour pratiquement la majorité des sites instables de la ville de Constantine a été faite à partir de φ par l'équation de Bjerrum suivante :

$$\varphi_e = 1,15(\varphi - 9) \dots \dots \dots \text{eq.3.5.}$$

où φ_e = angle vrai de Hvorslev

Rowe a suggéré que φ_{mob} pourrait être pris égal à :

$$\varphi_{mob} = \varphi_e \times 0,75 \dots \dots \dots \text{eq.3.6.}$$

Tandis que l'évaluation de C_r sera faite à partir des graphes de C_u à la profondeur ($C_u=0$) sur tous les sites.

Nous avons également utilisé la relation établie par Biarez et Favre

$$\text{tg } \varphi' = 1.64 - 0.8 \log W_L \dots \dots \dots \text{eq.3.7.}$$

(Pour $W_L < 50\%$)

Ce qui a donné un angle de frottement résiduel $\varphi_r' = 14^\circ$ et une cohésion résiduelle

$$C_r = 0.$$

Un calcul de stabilité avec ces paramètres en utilisant le logiciel Plaxis 3D sur un des sites prédisposés, nous a permis d'avoir un facteur de sécurité inférieur à l'unité ($F_s < 1.0$). Ce qui démontre encore une fois leurs instabilités.

Discussion de l'étude

Ces formations sont très fragiles. Cette fragilité provient essentiellement des propriétés intrinsèques des matériaux. Elles correspondent à la composition minéralogique qui pourrait être faite ultérieurement, la fabrique, la texture et la granulométrie.

L'évaluation de ces paramètres permettra certainement de quantifier la fragilité de ces formations au déplacement. Il faudrait prendre en considération aussi les caractéristiques liées à la structure, soit tous les aspects qui décrivent les composantes et l'ordre de la séquence stratigraphique, l'orientation du pendage, ainsi que le système de fractures, de failles et de discontinuités.

Les agents externes ont aussi une incidence directe sur la stabilité des forces de résistances initiales, et on peut identifier deux types :

- L'altération et autres transformations physico-chimiques qui correspondent au ramollissement de l'argile, à l'hydratation des minéraux argileux, à l'assèchement de l'argile et des lithologies sédimentaires ;
- Les changements de forces intergranulaires, causés par le contenu en eau et la pression d'eau interstitielle Bishop. Ils sont habituellement tributaires de la variation des conditions climatiques, de la transformation des conditions du couvert végétal ou des différentes méthodes d'irrigation.

La réduction des forces de résistances peut aussi être provoquée par des événements externes que l'on appelle "facteurs déclencheurs" suffisamment important pour provoquer un changement rapide des conditions de stabilité. Souvent, un seul phénomène de déclenchement saura expliquer la mise en place d'un mouvement de terrain. Ces conditions extrêmes, sont habituellement provoquées par les événements suivants :

- Pluies intenses
- Changements brusques du niveau d'eau de la nappe phréatique
- Activités humaines (excavations, irrigations).

Tous ces facteurs prédisent des sols à problèmes qui favorisent les mouvements de terrain et c'est le cas propice de la ville de Constantine.

La prédiction exacte du type de mouvement pourrait être estimée sans que la mesure des propriétés internes des matériaux soit réalisée et sans que les éléments déclencheurs les plus susceptibles de se produire soient connus. De toute façon, le concept qui a été privilégié vise plutôt à établir l'emplacement des zones sensibles, le type de mouvements pouvant se produire ; ce que l'on considère suffisamment adéquat pour protéger les populations locales et orienter les décideurs pour les fins de futurs développements urbains à l'aide d'une cartographie à la vulnérabilité du risque.

III Conclusions

La banque de donnée du sous-sol de la ville de Constantine a permis de mettre en évidence les risques d'instabilités dans cette région d'où la nécessité d'un plan de prévention des risques à l'aide d'une cartographie de la zone et qui fera l'objet du chapitre suivant.

Elle contient néanmoins vingt-neuf (29) zones propices aux glissements sur l'étendue de la ville.

Cette banque peut-être actualiser, mise à jour, éditer des informations, modifier ou supprimer certaines données qui seront de l'avis du géotechnicien erronées et aussi comparer certains paramètres entre eux.

L'homogénéisation de toutes les données à stocker, en éliminant les sondages mal situés ou sans plan d'implantation précis quelle que soit leur nature ou leur qualité assure une certaine régularité et fiabilité des résultats.

Elle peut être étendue à d'autres interrogations concernant d'autres paramètres et éventuellement en faisant appel à des logiciels plus performants (ArcGIS etc....).

La synthèse des résultats de caractérisation des essais de la campagne géotechnique a montré la faible capacité de ces sols avec des caractéristiques physico-mécaniques médiocres en surface et s'améliorant très faiblement en profondeur, montrant ainsi des sédiments sous consolidés qui peuvent se mettre en mouvements facilement.

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de l'argile sous chargement en cellule de chemin de contrainte, plusieurs essais triaxiaux non drainés et drainés ont été réalisés sur des échantillons intact et remaniés. Les déformations axiales, la pression interstitielle excédentaire et la résistance au cisaillement ont été déterminées en interprétant les résultats des essais sur le chemin de contrainte.

L'étude offre une meilleure compréhension de certains aspects du mécanisme de défaillance et du comportement du sol dans la zone de glissement de terrain de Constantine. Le programme d'essais et l'étude de caractérisation entrepris indiquent que K_0 est directement lié à l'historique de contrainte du sol et dépend également de l'état de l'échantillon avant l'essai (c'est-à-dire intact ou remanié). De plus, les résultats indiquent une relation linéaire entre K_0 et σ' à des niveaux de contrainte supérieurs à toute pression de surconsolidation. Cela concorde avec les études d'autres auteurs. Cependant, contrairement aux travaux antérieurs, aucune corrélation entre K_0 et l'indice de plasticité (I_p) n'a été trouvée. Il était impossible de déterminer avec précision les valeurs de K_0 pour un matériau en état de surconsolidation.

Cela s'applique dans une certaine mesure aux premières étapes des essais rapportés ici. Les difficultés entourant les mesures de K_0 pour les matériaux surconsolidés ont été prouvées dans ce travail.

Les glissements de terrain et les échecs de pente sont souvent causés par les précipitations et les nappes phréatiques dans les dépôts d'argile et les régions de lit d'argile autour du nord-ouest de la ville de Constantine. L'argile contient principalement des substances minérales qui sont facilement altérables et ont une faible perméabilité, tandis que l'eau conduit à une diminution de la résistance au cisaillement de l'argile expansive.

L'étude a été réalisée avec la théorie de l'analyse d'état critique car tous les problèmes liés au comportement des échantillons testés ont montré une résistance au cisaillement maximale caractéristique des matériaux de surconsolidation pouvant entraîner une instabilité dans cette zone. De plus, il a été possible de retracer la surface de Hvorslev dans le plan $q' - p'$ à la rupture pour trois échantillons. L'objectif de cette expérience est de mieux comprendre comment un glissement de terrain déclenché se produit dans la région autour de Constantine. Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'argile sous chargement en cellule de chemin de contrainte, plusieurs essais triaxiaux non drainés et drainés ont été réalisés sur des échantillons intacts et remaniés. Les déformations axiales, la pression interstitielle excédentaire et la résistance au cisaillement ont été découvertes en interprétant les résultats des essais sur le chemin de contrainte.

L'analyse des corrélations a montré une bonne harmonie avec les lithologies des différents sites et qui reflète bien leurs formations géologiques à savoir des conglomérats, des argiles marneuses et des marnes argileuses. Ces sols sont souvent sujets à des glissements.

CHAPITRE 4

VULNERABILITE AU RISQUE GLISSEMENT ET SA CARTOGRAPHIE CAS DE LA VILLE DE CONSTANTINE

*« Certaines choses du monde écrivent et pensent, de sorte que nous en
construisons d'autres pour qu'elles pensent pour nous, avec nous, parmi
nous et par lesquelles ou en lesquelles même nous pensons ».*

Michel Serres. La légende des anges.

Chapitre 4

Vulnérabilité au risque glissement et sa cartographie Cas de la ville de Constantine

1.1 Introduction

Les glissements de terrain sont des thématiques complexes, caractérisés par des causes multiples. En raison de leur nature spatiale, ils nécessitent l'utilisation de techniques capables de les analyser, de les cartographier et de les gérer efficacement. C'est pour cela que la vulnérabilité au risque à l'aide d'une cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain est une étape cruciale pour mieux appréhender et comprendre ces phénomènes. Elle consiste à déterminer les facteurs de prédisposition aux risques glissements de terrain. Grâce aux progrès scientifiques et technologiques, des méthodes ont été développées pour aborder ces problématiques et atténuer leurs impacts, dans ce cas de figure, le logiciel SIG a été utilisé dans cette thèse pour décrire, collecter, et traiter les couches thématiques de chaque facteur, La base de données de la zone d'étude est composée des six facteurs de prédisposition aux glissements de terrain.

L'évaluation du phénomène glissement s'est faite en fonction de l'application de la méthode d'analyse multicritères (AHP) en vue d'une meilleure gestion pour les mouvements de la ville de Constantine et éventuellement pour identifier d'autres zones qui peuvent se déclencher dans le futur.

1.2 Historique du risque glissement et la cartographie

Le risque de glissement est un événement spatial, lié au terrain, et la carte est toujours son support privilégié. La cartographie et la base de données tentent de répondre aux questions suivantes :

- Où peut se produire un glissement de terrain ?
- Quand et à quelle vitesse cela arrivera-t-il ?
- Quel type de mouvement ?
- Quelle est la marge de sécurité ?
- Quelles seront les dimensions du glissement ?
- Quelle sera son extension (aval ou amont) ?

Du fait des lois existant pour la plupart des pays, et de l'impulsion donnée par l'UNESCO, (décennie des risques naturels), la nécessité de gestion et de décision s'impose partout. Le gestionnaire

du territoire ne peut plus se contenter de descriptions et veut des outils de plus en plus performants pour pouvoir prendre des décisions pertinentes et équitables.

En Algérie, la croissance galopante de la démographie, l'urbanisation anarchique, la dégradation de l'environnement et tous les dérèglements des écosystèmes font aggraver l'ampleur et la fréquence des catastrophes » souligne "Symbiose" dans sa dernière édition.

Selon le Plan des Nations Unies pour l'Environnement, le nombre moyen de victimes est 150 fois plus élevé dans les pays en voie de développement que dans ceux développés.

La revue spécialisée en Environnement estime que pour le cas de l'Algérie, il est plus qu'urgent de passer « d'une stratégie de lutte ou de réhabilitation à une stratégie de prévention des catastrophes ». "Symbiose" se réfère à un récent colloque sur la prévention des risques pour citer le ministre de l'Aménagement du territoire et de l'environnement, Chérif Rahmani, qui a insisté sur une meilleure sensibilisation du public aux risques causés par les dangers environnementaux, naturels et technologiques. Il est à noter que la pollution par les hydrocarbures est un thème qui a particulièrement retenu l'attention des spécialistes.

L'Algérie a connu par le passé des inondations dans le quartier de Bab El Oued d'Alger en 2001 ; le tremblement de terre de Zemmouri-Boumerdès en 2003 et l'accident chimique (gazeux) survenu dans la zone industrielle de Skikda en 2004.

Les pouvoirs publics sont encore fréquemment démunis en matière de prévision, de prévention et de gestion de phénomènes naturels aux conséquences parfois dramatiques (glissements de terrain, coulées boueuses, effondrements de falaises, chutes de blocs, effondrements de cavités souterraines etc.) L'opération vise à améliorer la connaissance acquise depuis plusieurs années dans les différents aspects de l'ingénierie des risques naturels : identification, caractérisation, prévision du comportement des phénomènes, définition des outils de cartographie et de gestion des risques liés aux mouvements de terrain au regard des personnes, des ouvrages, des réseaux et des biens menacés.

D'une manière générale le risque majeur se caractérise par de nombreuses victimes, un coût important de dégâts matériels, des impacts sur l'environnement ; la vulnérabilité mesure ces conséquences.

Le risque majeur est donc la confrontation d'un aléa avec des enjeux. Ainsi la société comme l'individu doivent s'organiser pour y faire face.

Un événement potentiellement dangereux aléa n'est un risque majeur que s'il s'applique à une zone où des enjeux humains, économiques ou environnementaux sont en présence.

Deux critères caractérisent le risque majeur :

- Une faible fréquence : l'homme et la société peuvent être d'autant plus enclins à l'ignorer que les catastrophes sont peu fréquentes ;
- Une énorme gravité : nombreuses victimes, dommages importants aux biens et à l'environnement.

D'où on peut parler :

- Aléa : probabilité d'apparition d'un phénomène donné sur un territoire donné, dans une période de référence donnée. L'aléa est caractérisé par (3) trois éléments selon le cas, comme par exemple : description du phénomène, définition spatiale (point de départ et épandage) et appréciation de l'occurrence temporelle (rupture peu probable dans les 5 ans).
- Enjeu : Personnes, biens, équipements ou environnement menacés par l'aléa et susceptibles de subir des préjudices ou des dommages.

Tout citoyen a droit à l'information sur les risques auxquels il est soumis, ainsi que sur les moyens de s'en protéger.

■■■ Principes de base de l'instabilité des versants

Un mouvement de terrain se traduit par le transport de matériaux (sol ou roche) vers le bas de la pente en réponse à la gravité Skempton (1964). La force gravitationnelle agit comme une force de cisaillement en exerçant un stress naturel sur tous les versants. Cette force augmente en fonction des conditions géométriques liées à l'angle, à la longueur de la pente, ainsi qu'en fonction du poids unitaire des matériaux impliqués. Un mouvement débute lorsque ce stress devient supérieur à la force de résistance ou de cohésion des matériaux. Lorsque ces deux forces sont presque égales, le mouvement est lent et correspond à l'érosion naturelle des formations superficielles. Les mouvements rapides se produisent lors d'une augmentation soudaine de la force de cisaillement ou encore lors d'une réduction soudaine de la force de cohésion Terzaghi and Peck (1967). Les changements brutaux sont habituellement induits par des facteurs déclencheurs.

À l'état initial, certaines formations sont plus fragiles que d'autres. Cette fragilité provient des propriétés intrinsèques des matériaux. Elles correspondent à la composition minéralogique, la fabrique, la texture, la porosité et la granulométrie Skempton et Huthinson (1969).

L'évaluation de ces paramètres permettra de quantifier la fragilité des formations au déplacement à partir de différentes méthodes de mesures géotechniques. On y inclut aussi les caractéristiques reliées à la structure, soit tous les aspects qui décrivent les composantes et l'ordre de la séquence stratigraphique, l'orientation du pendage, ainsi que le système de fractures, de failles et de discontinuités Hansen (1984).

Les agents externes ont aussi une incidence directe sur la stabilité des forces de résistances initiales. Par conséquent on peut parler de :

- L'altération et autres transformations physico-chimiques. Elles correspondent au ramollissement de l'argile fissurée, à la désintégration granulaire de la roche, à l'hydratation des minéraux argileux, à l'assèchement de l'argile et des lithologies sédimentaires et finalement, à la dissolution du ciment qui retient les grains entre eux ;
- Les changements de forces intergranulaires, causés par le contenu en eau et la pression d'eau interstitielle. Ils sont habituellement tributaires de la variation des conditions climatiques,

de la transformation des conditions du couvert végétal ou des différentes méthodes d'irrigation.

- La réduction des forces de résistances initiales peut aussi être provoquée par des événements externes que l'on appelle "facteurs déclencheurs". Un facteur déclencheur est un stimulus suffisamment important pour provoquer un changement rapide des conditions de stabilité Varnes (1984). Souvent, un seul phénomène de déclenchement saura expliquer la mise en place d'un mouvement de terrain. Ces conditions extrêmes, sont habituellement provoquées par les événements suivants :
- Pluies intenses
- Fonte soudaine de neige
- Tremblements de terre • changements brusques du niveau d'eau de la nappe phréatique
- Éruptions volcaniques • activités humaines (excavations, irrigations, explosions).

Nous prétendons que la prédiction exacte du type de mouvement peut difficilement être estimée sans que la mesure des propriétés internes des matériaux soit réalisée et sans que les éléments déclencheurs les plus susceptibles de se produire soient connus. De toute façon, nous considérons qu'il n'est pas requis d'ajouter cet élément d'information dans le cadre de la cartographie des NSMT. Le concept que nous privilégions vise plutôt à établir l'emplacement des zones sensibles peu importe le type de mouvements pouvant se produire ; ce que l'on considère suffisamment adéquat pour protéger les populations locales et orienter les décideurs pour les fins de futurs développements urbains Mascarelli. (1994).

Notions de susceptibilité

La susceptibilité correspond à un concept évolué (2ième ordre) qui exprime le degré auquel un phénomène puisse exister ou se produire (spatiale et temporelle) en considérant le croisement d'une série d'évidences (1er ordre) concrètes et mesurable.

Le glissement (slide) est un mouvement de pente qui se caractérise par le glissement de matériaux sur une ou plusieurs surfaces. On subdivise les glissements en deux catégories distinctes :

- 1) Les glissements rotationnels ou circulaires, lorsque les matériaux déplacés sont peu ou pas déformés ;
- 2) Les glissements translationnels ou en plan, lorsque les matériaux sont complètement déformés ;

La notion de susceptibilité est typiquement utilisée dans le domaine des Géosciences pour déterminer l'emplacement de zones sensibles Bonham-Carter (1994) prévoir un tremblement de terre ou encore pour exprimer spatialement l'emplacement des zones potentiellement sensibles aux mouvements de terrain.

Le défi relié à l'établissement des différents niveaux de susceptibilité est relativement grand et inconfortable compte tenu les nombreux facteurs impliqués ainsi que la difficulté reliée à l'évaluation

de la qualité de l'estimation. De plus, contrairement à l'identification des conditions de terrain (évidences) qui, somme toute, se distinguent concrètement sur le terrain, la susceptibilité demeure une notion abstraite ne pouvant être établie que sur la foi d'un modèle local et non-universel ou encore établi empiriquement sur la base de connaissances ou d'expériences accumulées.

Les difficultés liées à l'établissement des (NSMT) niveaux de susceptibilité des mouvements de terrain est analogue à celles confrontées lors de l'identification d'une zone potentiellement sensible.

L'établissement des NSMT se fait dans le même esprit et vise à délimiter les zones de différentes sensibilités sur la foi des connaissances qui caractérisent chacun des niveaux. Ces connaissances proviennent à la fois de concepts scientifiques précis liés à la stabilité des versants, mais aussi, elles proviennent des évidences établies empiriquement à partir de zones de stabilité et d'instabilité reconnues Carrara (1988). Selon ces principes de base, plusieurs méthodologies ont été développées dans l'unique objectif d'établir, avec la plus grande certitude possible, l'état de la stabilité d'une région.

III. Description et évaluation des méthodes classiques de cartographie des niveaux de Susceptibilité des Mouvements de Terrain (NSMT)

Il existe une multitude d'approches méthodologiques différentes pour cartographier les NSMT. Cependant, aucune d'elle n'a été reconnue comme étant une méthodologie « standard » acceptée par la communauté scientifique intéressée par ces phénomènes. Cependant derrière chacune des méthodes révisées se cache un modèle conceptuel unique qui implique les trois étapes analytiques suivantes :

- Identification et cartographie d'une série de facteurs géologiques et géomorphologiques, directement ou indirectement corrélés aux phénomènes d'instabilité ;
- Évaluation de la contribution de chacun des facteurs ;
- Classification du territoire en niveaux de sensibilité homogènes.

Les différentes méthodologies existantes se distinguent selon :

- 1) Les techniques de cueillette d'information (campagnes de terrain, photo-interprétation, images satellitaires).
- 2) Le choix des évidences.
- 3) L'assignation des poids relatifs (contribution) des évidences.
- 4) Les moyens utilisés pour diviser la région en zones homogènes de NSMT.

Cette section correspond à un inventaire et à une revue des approches classiques de cartographie des NSMT. Pour en faciliter la lecture, nous conservons l'acronyme NSMT en remplacement des nombreuses expressions utilisées dans la littérature pour décrire le même concept ; telle que la cartographie des risques, la cartographie des dangers, la cartographie de la fragilité, la cartographie de la sensibilité, pour en nommer que quelques-unes. Ceci constitue une opportunité de faire adopter cette expression générale qui intègre avec justesse et précision le sens et l'objectif des différents travaux cartographiques fait en ce sens mais identifiés autrement.

À la manière de Crozier (1986), nous regroupons ces méthodes en trois classes distinctes :

- Méthodes inductives ;
- **Méthodes déductives** ;
- Méthodes numériques.

Méthodes inductives

Les méthodes inductives, aussi appelées : approches cartographiques approches géomorphologiques, Kienholtz (1992) ou encore évaluation d'experts correspondent à la cartographie géomorphologique classique 2 où les différentes conditions identifiées sont reclassifiées en NSMT. Ces étapes nécessitent toutefois l'expertise de spécialistes qui sauront établir les règles et les critères nécessaires à la conversion des caractéristiques du terrain en NSMT. Ces règles et critères ont, cependant, le désavantage d'être subjectifs et non-explicites. De plus, ils sont totalement tributaires du jugement personnel de l'expert. À ce moment-ci, il est important de noter que le terme « subjectif » n'a rien de négatif puisqu'il est reconnu que les compétences expertes, appliquées à cette tâche, procurent les meilleurs résultats connus à ce jour, toutes méthodologies confondues Bonham-Carter (1994), Kienholtz (1992) ; Van Westen (1993). À cet effet, plusieurs exemples d'application existent dans la littérature, lesquels est pour la plupart inspirés de huit travaux classiques, réalisés dans les années 70 et 80.

Les travaux de cartographie classique sont habituellement réalisés à partir de photographies aériennes et de campagnes de terrain. On y inclut aussi dans cette classe méthodologique, l'approche dite « cartographie qualitative », dans laquelle un poids est assigné de façon empirique à chaque facteur considéré. Encore une fois, l'attribution de ce poids est subjective et tributaire de l'expérience de celui qui l'établi. Cette méthode a été utilisée pour la première fois par Stevenson (1977), pour cartographier les NSMT dans une région argileuse de la Tasmanie.

Méthodes déductives

Dans l'esprit de mettre au point des méthodes plus objectives, les approches déductives/statistiques ont été mises au point pour cartographier les NSMT. Par ces méthodes, on tente d'établir les règles et les critères cartographiques. On procède à l'étude d'une région là où des mouvements anciens ont déjà été reconnus, ou encore des secteurs caractérisés par de nombreuses cicatrices de mouvements. Cette stratégie présuppose que le contexte identifié en ces lieux est caractéristique des zones sensibles. Bonham-Carter (1994), utilise l'expression suivante “ le passé est garant du futur (...) surtout dans l'évaluation des risques géologiques”. Conséquemment, si des conditions semblables sont identifiées ailleurs dans le secteur, elles seront jugées, elles aussi, comme étant sensibles. Brabb et al (1999) furent les premiers à utiliser cette technique lors de travaux réalisés dans le secteur de San Mateo en Californie.

Ainsi, en superposant la carte d'inventaire des mouvements anciens à la carte géologique et à la carte topographique, il fut possible d'identifier les secteurs les plus sensibles en calculant la fréquence d'occurrence des événements antérieurs par unité géologique. Tel que souligné par Carrara et al (1992) et Van Westen (1993), l'ajout de facteurs supplémentaires autre que la pente, la lithologie et la densité des mouvements anciens, est bénéfique en termes de la qualité finale des documents produits lorsque cette méthode est retenue. A ce titre, les travaux de Carrara et al (1992) et Carrara (1988), introduisent l'approche d'analyse statistique multi variée en établissant le contexte des zones sensibles à partir de plusieurs paramètres (>100) mesurés sur les sites d'anciens mouvements. Des travaux semblables ont aussi été réalisés par Neuland (1976), Baeza et Corominas (1996), Mulder (1991) et Clouâtre (1994). Leurs techniques s'apparentent aux méthodes utilisées pour identifier les gisements métallifères et qui intègrent une série de variables géologiques, géochimiques et géophysiques jugées discriminantes en regard à une zone anomalique.

Parmi ces travaux, deux variantes méthodologiques sont habituellement utilisées :

- Analyse statistique (corrélations) des conditions ponctuelles relevées sur les sites de mouvements anciens et évaluation du voisinage (régionalisation) en fonctions des résultats obtenus ;
- Division de la zone en unités de terrain homogènes (sur la foi de conditions géoécologiques) et classification des unités de terrain selon deux classes (stable et instable) et selon la fréquence des indices d'instabilité retrouvés dans chacune des unités.

D'autres méthodes statistiques sont aussi existantes, telles la modélisation probabiliste Sabto (1991) ; Gonzalez (1992) et celle du modèle des messages logiques Runqui and Yuanguo (1992).

En résumé, les méthodes statistiques offrent un point de vue plus objectif sur le contexte géoécologique responsable de la mise en place des mouvements de terrain.

■■■■ Méthodes numériques

Les méthodes numériques réfèrent à celles qui établissent l'état de la stabilité d'un versant à l'aide de fonctions mathématiques. Elles sont fondées sur des concepts reliés à la géotechnique et à la mécanique des sols et elles sont basées sur l'estimation d'un facteur de sécurité et qui s'exprime comme suit :

$$F = \text{Force de cisaillement disponible} / \text{Force de cisaillement mobilisée}$$

La force de cisaillement mobilisée se calcule à partir de la loi de Coulomb selon une relation qui tient compte entre autres du poids unitaire, de la cohésion, de la pression interstitielle, de l'angle de friction interne du dépôt et de l'angle de la pente. La valeur F obtenue doit par la suite être interprétée en termes de sensibilité aux mouvements de terrain. Il s'agit donc d'une relation qui n'est pas linéaire et, par surcroît, subjective, puisqu'elle dépendra du jugement personnel de celui qui l'interprète. Toutefois, ces méthodes ont l'avantage d'être fondées sur des principes physiques solides et acceptés

Clouâtre (1994). Selon Leroueil et al (1996), la complexité du phénomène, qui est reliée aux conditions géologiques multiples et à la mauvaise compréhension des mécanismes, fait en sorte qu'aucune approche unifiée et conforme n'a pu encore émerger. Cette remarque s'est avérée évidente lors de la revue de littérature. On y retrouve une série de variantes méthodologiques

Comme les modèles d'éléments finis Ward et al (1982); Brass et al (1989); Murphy and Vita-Finzi (1991) ou encore des modèles développés à partir de la simulation des conditions hydrogéologiques Okimura and Kawatani (1986).

En somme, plusieurs approches sont disponibles pour cartographier les NSMT. La considération d'une méthode plutôt que d'une autre se fera en fonction de l'échelle de travail, du budget disponible, mais aussi en fonction des données en mains et de la qualité des résultats désirée. Cette qualité correspond à la précision à laquelle la distribution spatiale des différents NSMT est établie, donc au niveau d'incertitude qui est associé à la carte finale.

Utilisation des SIG pour cartographier

Il est de moins en moins requis de faire l'éloge des SIG et de décrire les nombreux avantages qu'ils procurent dans les études qui nécessitent l'analyse spatiale des données. En quelques mots, on dira que les SIG offrent un excellent support pour prendre des décisions grâce aux nombreuses fonctions offertes pour organiser, visualiser, rechercher, combiner et analyser une grande quantité d'information. Burrough (1992) et Aronoff (1989) ont présenté une description détaillée de ces systèmes ainsi que de leurs avantages en comparaison aux méthodes plus conventionnelles.

L'utilisation des SIG pour cartographier les NSMT est de plus en plus courante. Cependant, la majorité des ouvrages consultés présente des travaux où les méthodologies existantes ont été transformées de sorte à automatiser davantage les différentes étapes qui mènent au document final. Aucune nouvelle technique n'a été développée à partir de l'utilisation de cet outil d'analyse.

Regroupement de tous les variables identifiées comme étant utiles à prédire l'emplacement des futurs glissements de terrains d'une région du Constantinois et pour établir la vulnérabilité des installations pouvant être affectées.

Approche et méthode utilisés

Le Système d'Information Géographique (SIG) représente un système de gestion de base de données conçu pour l'acquisition, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage des données référencées. L'importance et la facilité d'utilisation des SIG ont été soulignées par R. Prélaz-Droux (1995), R. Tomlinson et B. B. Petchenik (1988), D'après eux, les données nécessaires à une évaluation sont très diverses, rendant l'intégration des données et des relations entre les facteurs incontournables pour résoudre les problèmes. Cependant, une approche intégrée, à multiples niveaux, permet d'évaluer les différentes étapes points de vue interactions entre les composants individuels J. T. Coppock et DW. Rhind (1991).

Chakhar (2006), s'est penché sur les stratégies d'intégration entre les SIG et l'Analyse Multicritère d'Aide à la Décision (AMC) et a donné la définition suivante : « Le système d'information géographique est un ensemble de matériel, de logiciels, de données, de personnes, d'organisations et d'arrangements institutionnels pour la collecte, le stockage, l'analyse et la diffusion d'informations sur les régions terrestres ».

De cette définition, on peut déduire les fonctionnalités opérationnelles des SIG comme le montre la figure 4.1 :

- Stockage, représentation et gestion des données,
- Manipulation et analyse des données,
- Affichage et visualisation (rapports, cartes statistiques, etc.).

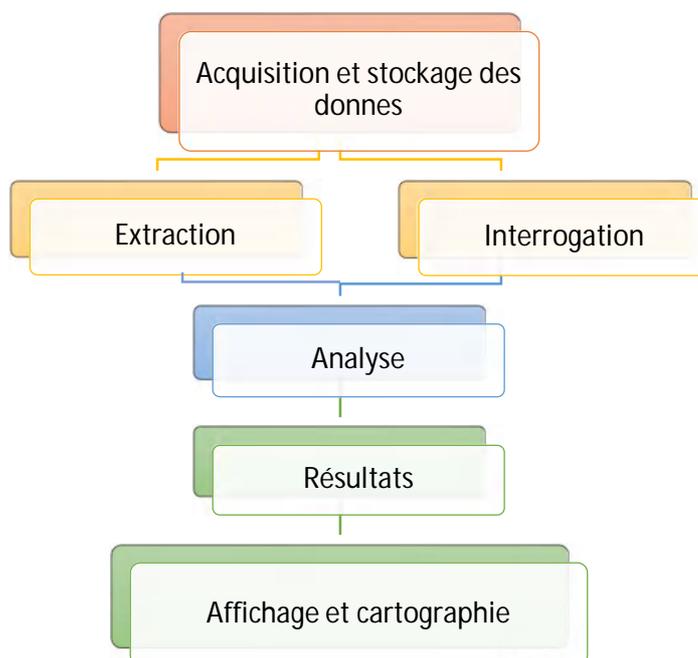


Figure 4.1. Structure d'un SIG (Malczewski, 1999).

L'analyse multicritères (AMC) représente un domaine interdisciplinaire impliquant la théorie de la décision, les systèmes d'information et les statistiques. Son objectif principal est d'aider à la prise de décisions dans des situations caractérisées par des choix et des conflits de critères.

La modélisation joue un rôle central dans le processus d'analyse multicritères. Pour les problèmes structurés, des approches quantitatives reposant sur des fondements mathématiques sont souvent utilisées. En revanche, pour les problèmes non structurés, lorsqu'il est impossible d'établir des modèles mathématiques en raison du manque d'explicités connaissances, on fait appel à la modélisation des connaissances et du raisonnement via des approches plus qualitatives.

L'analyse multicritères permet de gérer la diversité, les divergences et la nature, quantitative ou qualitative, des critères en vue d'atteindre des compromis acceptables.

Il existe plusieurs méthodes d'analyse multicritères, chacune présentant des spécificités.

Dans ce cas de figure l'analyse multicritère hiérarchique (Analytic Hierarchy Process AHP) a été utilisée pour la ville de Constantine.

1.2 L'Analyse Multicritère Hiérarchique (AHP)

L'Analyse Hiérarchique des Processus (AHP) a été développée par le mathématicien Thomas Saaty en 1977. Cette méthode d'Aide à la Décision Multicritère propose une approche flexible et facile à comprendre pour analyser des problèmes complexes. L'AHP représente une méthode de prise de décision qui permet à l'utilisateur de parvenir à une échelle de préférences à partir d'un ensemble d'alternatives. Elle a trouvé de nombreuses applications dans des domaines variés tels que la sélection de sites, l'analyse d'adéquation, la planification régionale et l'analyse de la sensibilité aux glissements de terrain.

L'AHP est une approche de résolution de problèmes et un processus méthodique permettant de représenter les éléments de tout problème (Saaty et Vargas, 1991). Divers chercheurs ont utilisé la méthode AHP pour cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain, Achour et al. (2017), Q. Meng et al. (2016), P. Kayastha et al. (2013).

1.3 Principes de la méthode AHP

Pour appliquer cette méthode AHP, il est essentiel de décomposer un problème complexe et non structuré en ses composants, d'organiser ces éléments dans une hiérarchie, d'attribuer des valeurs numériques aux jugements subjectifs sur l'importance relative de chaque composant, et de synthétiser ces jugements pour déterminer les priorités à accorder à ces éléments.

Un ensemble de modèles a été amélioré en utilisant des valeurs statistiques pour manuellement décrire les relations entre les divers paramètres selon la méthodologie AHP. Par la suite, ces valeurs ont été intégrées dans les matrices AHP. Un autre ensemble de modèles a été élaboré en important automatiquement les valeurs de relations calculées entre différents facteurs, fondées sur des valeurs statistiques, dans les matrices AHP. Les matrices de comparaison par paire ont été établies en effectuant des comparaisons binaires dans ce contexte. Les poids sont calculés à partir de ces matrices en réalisant des calculs de valeurs propres et de vecteurs propres.

Il a été démontré que le vecteur propre correspondant à la plus grande valeur propre de la matrice fournit les priorités relatives des facteurs. Cela signifie que si un facteur est préféré, sa composante dans le vecteur propre est plus élevée que celle des autres facteurs. La somme des composantes des vecteurs propres est égale à l'unité.

En résumé, la méthode AHP comprend trois étapes principales :

- Structuration hiérarchique.
- Établissement de matrices de comparaison.
- Vérification de la cohérence.

La structuration hiérarchique de la méthode AHP

La méthode AHP repose sur une décomposition d'un problème complexe en facteurs constitutifs suivant une structure hiérarchique où chaque niveau est composé d'indicateurs spécifiques : l'objectif principal, les critères d'analyse et les classes, comme illustré dans la figure.4.2.

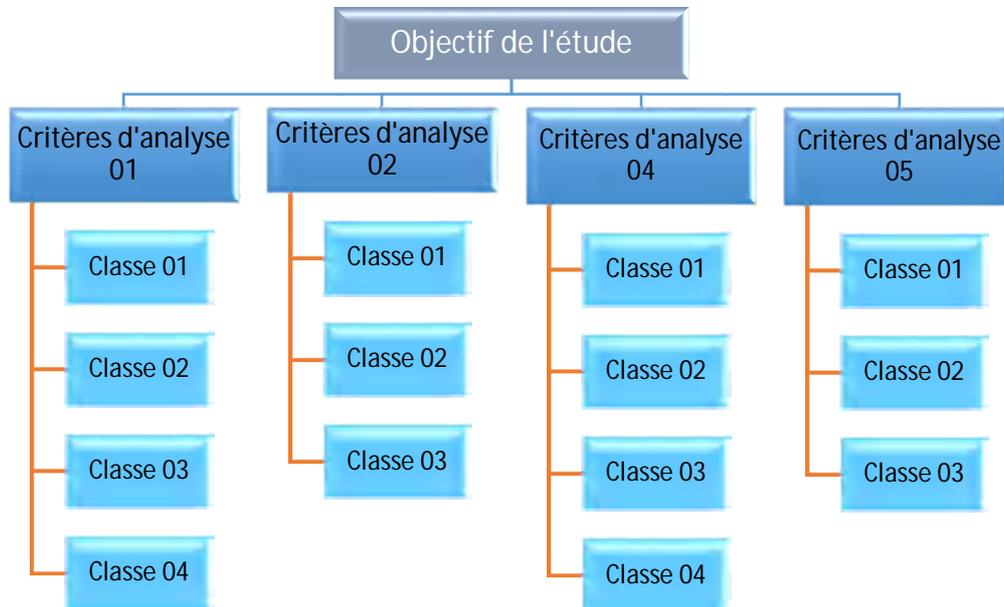


Figure 4.2. La structure hiérarchique de la méthode AHP.

Matrice de comparaison

Cette méthode implique initialement la création de matrices de comparaison binaire (par paire) pour chaque niveau en utilisant une échelle qui va de 1/9 à 9, reflétant l'importance des critères (facteurs) et des classes (tableau 4.1). Les pondérations attribuées aux critères et aux classes sont des jugements résultant d'une connaissance approfondie du terrain et de la compréhension de l'importance des facteurs dans le processus de glissement.

Tableau 4.1. L'échelle fondamentale des valeurs absolus de Saaty (1977).

Intensité d'importance	Définition de la préférence d'importance
1	Egale
3	Modérée
5	Forte
7	Très-forte
9	Extrême
2, 4, 6, 8	Jugements intermédiaires entre les préférences 1, 3, 5, 7 et 9

Les éléments de la diagonale de la matrice sont toujours égaux à 1, tandis que les éléments non diagonaux représentent l'importance relative du critère ou de la classe par rapport à un autre.

Par exemple, la comparaison par paire de l'élément *i* avec l'élément *j* est positionnée à l'entrée a_{ij} de la matrice de comparaisons par paire. Les valeurs inverses de ces comparaisons sont placées dans les positions a_{ji} de la matrice *A*, afin de maintenir la cohérence du jugement. Le décideur concerné doit évaluer l'importance relative d'un élément par rapport à un autre en utilisant l'échelle de neuf points indiqués dans le tableau 4.1. Par exemple, si le premier élément est considéré comme étant fortement dominant par rapport au deuxième élément, alors la valeur 7 est attribuée à l'entrée a_{12} , et réciproquement, 1/7 est attribué à l'entrée a_{21} pour maintenir la cohérence.

■■■■■ Vérification de la cohérence

La notion de cohérence dans la méthode de comparaison par paires de Saaty repose sur le calcul de l'indice de cohérence (CI), qui est exprimé par l'équation mathématique (Équation 4.1) suivante :

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \dots \dots \dots \text{eq.4.1.}$$

Où : λ_{max} : est une valeur calculée sur la base de la moyenne des valeurs des vecteurs propres.

n : est le nombre des critères comparés.

Tableau 4.2. Indice de cohérence aléatoire (Saaty, 1980).

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Le Ratio de Cohérence (RC) établi par Saaty est défini comme le rapport entre l'Indice de Cohérence (CI) et l'Indice de Cohérence Aléatoire (RI). Ce ratio, calculé à l'aide de l'équation mathématique (Équation 4.2), permet d'évaluer la cohérence des jugements effectués par la méthode de comparaison par paires, fournissant ainsi une mesure de la cohérence logique des évaluations des experts.

$$RC = \frac{CI}{RI} \dots \dots \dots \text{eq.4.2.}$$

RC : Ratio de cohérence (Consistency Ratio).

RI : Indice de cohérence aléatoire (Random Consistency Index).

CI : Indice de cohérence (CI : Consistency Index).

Selon Saaty, si le Ratio de Cohérence (RC) excède 10%, cela suggère une incohérence dans les comparaisons par paires. En conséquence, la matrice résultant des comparaisons devrait être réévaluée pour améliorer la cohérence des jugements fournis.

1.1 Identification de l'objectif de l'analyse

L'étude vise principalement à cartographier la susceptibilité aux glissements de terrain dans la ville de Constantine. Le risque de glissement de terrain constitue actuellement un problème majeur dans cette région en raison de son relief accidenté, de ses formations géologiques meubles et des fortes précipitations avec un réseau d'assainissement très vétuste et dégradé.

Les glissements de terrain sont dus au déplacement gravitaire de masses de terrain instables sous l'influence de phénomènes naturels tels que la fonte des neiges, des précipitations anormalement fortes et des secousses sismiques sans pour autant parler de l'action anthropique qui est très néfaste pour l'étude de la stabilité des terrains. Ces mouvements ont un impact significatif sur les conditions de vie locales à savoir les biens, les personnes et l'environnement.

1.2 Les couches thématiques

Les données utilisées pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain ont été sélectionnées en se basant sur des travaux antérieurs. Cette démarche a permis d'identifier six facteurs principaux qui influent la probabilité de survenue des glissements de terrain : la composition lithologique, la pente du terrain, son exposition, la courbure du versant, la distance par rapport aux cours d'eau, les précipitations, l'altitude et l'utilisation du sol.

Les risques géotechniques encourus et identifiés sur la région de Constantine sont essentiellement liés à des facteurs structurels tels la géologie, la topographie, la structure (faillé ou non), l'hydrologie et les paramètres géotechniques et d'autres aggravants tels que l'action humaine (urbanisation anarchique, excavations en pied des talus, canalisation défailante des eaux usées), les précipitations saisonnières sans pour autant parler de certains paramètres à prendre en compte lorsqu'il s'agit d'un mouvement ancien ou nouveau.

Notre étude porte en général sur des sites prédisposés à des instabilités.

L'analyse de ces facteurs déclenchant (déterminants) dans ces zones va permettre de définir des zones de présomptions dans ces sites où ces facteurs sont très importants.

1.3 La lithologie

La lithologie est l'un des paramètres le plus important dans l'étude des glissements de terrain, car les différentes unités lithologiques présentent des degrés de sensibilité variables (Dai et Lee, 2002). Les glissements de terrain font partie intégrante de la recherche des géosciences et sont intrinsèquement liés aux caractéristiques lithologiques du terrain. Il est largement reconnu que la lithologie exerce une influence significative sur l'occurrence des glissements de terrain, car les variations de la composition minéralogique entraînent souvent des différences dans la résistance et la perméabilité des sols (Yalcin et al, 2011).

La carte lithologique de la ville de Constantine a été faite par nos soins en se basant sur la carte de l'ouest de la chaîne numidique et des régions voisines Delga (1955), figure 4.3.

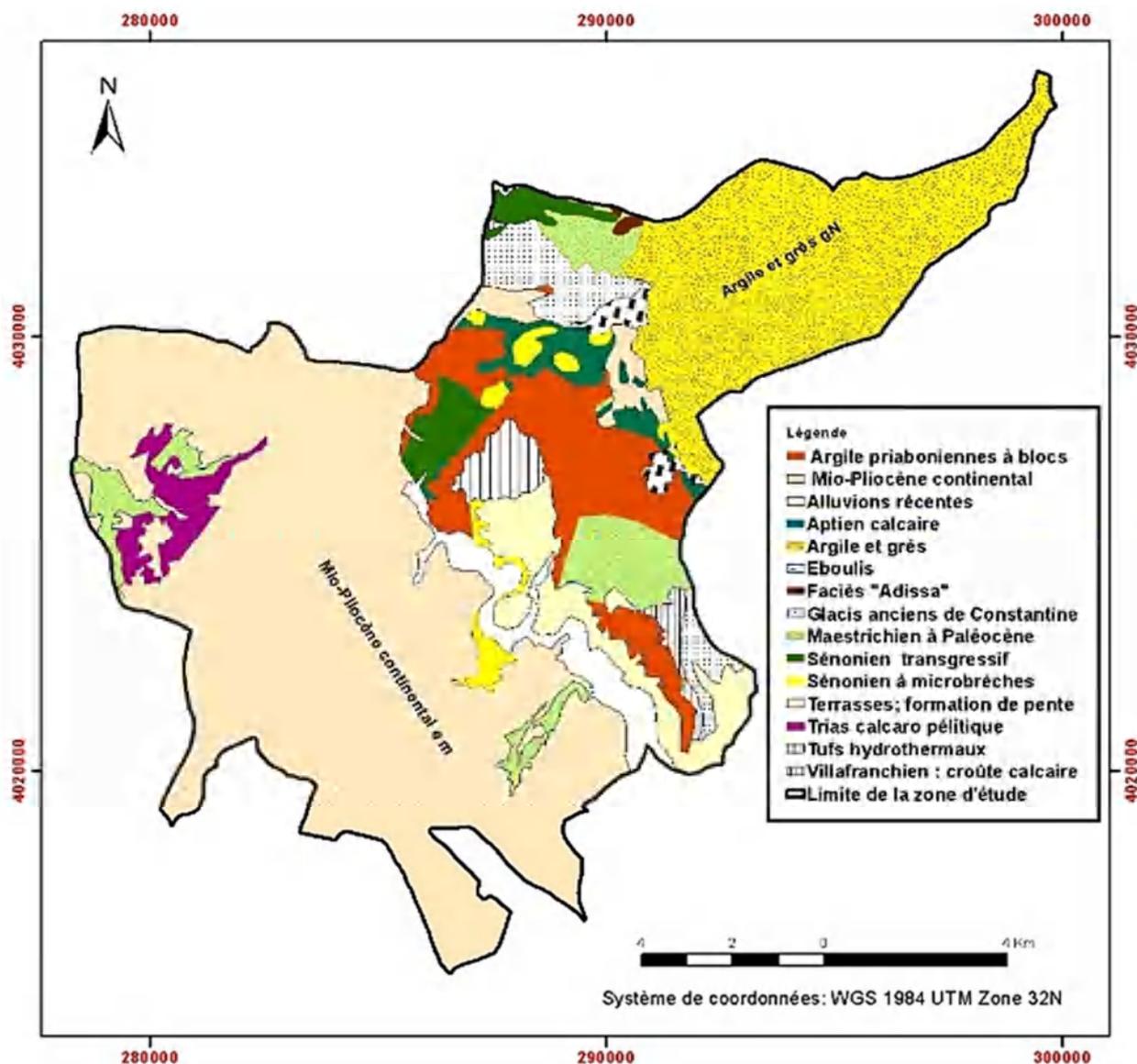


Figure 4.3. Carte lithologique de la zone d'étude en utilisant ArcGIS Pro.

À partir de cette carte, on constate que la ville de Constantine est fondée essentiellement sur cinq formations prédominantes comme la montre le tableau 4.3.

Tableau 4.3. Les surfaces des formations lithologiques de la zone d'étude.

Lithologie	Surface	
	(Km ²)	(%)
Mio-Pliocène	88,3	48
Argile	14,7	8
Alluvions récentes	5,5	3
Terrasses, formation de pente	7,4	4
Argiles et grès	33,1	18

Selon l'analyse des distributions des unités lithologiques, l'unité la plus dominante dans la région de la ville de Constantine est les argiles du Mio-Pliocène avec un pourcentage de 48%, suivi par le complexe argiles et grès de 18%, pour le reste, un pourcentage plus bas avec les alluvions récentes et les terrasses de formation de pente comme le montre l'histogramme suivant (figure 4.4).

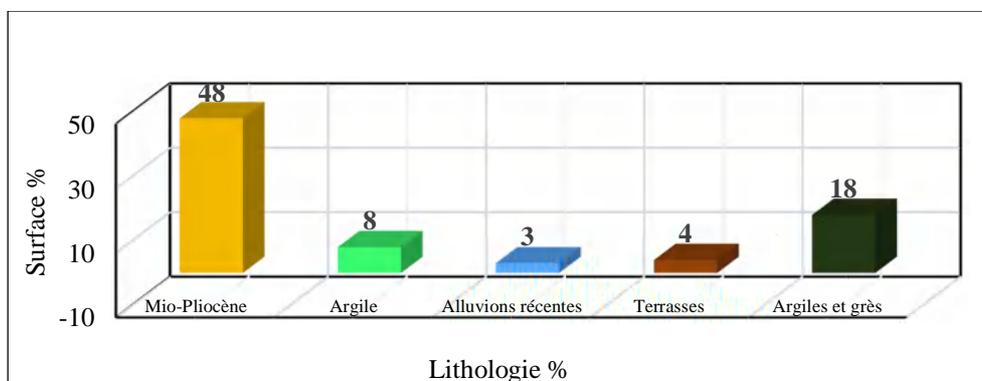


Figure 4.4. Histogramme montrant le pourcentage de différents types lithologiques.

La Pente

La pente joue un rôle important dans les études sur le comportement des mouvements de terrain, car elle a une influence majeure sur la susceptibilité de ces derniers. Sur une pente composée d'un matériau uniforme et isotrope, une augmentation du gradient de pente est corrélée à une probabilité accrue de la défaillance. Cependant, les variations d'épaisseur et de résistance d'un sol sont deux facteurs qui varient considérablement dans les zones de rupture et de non-rupture (Dai et Lee, 2002).

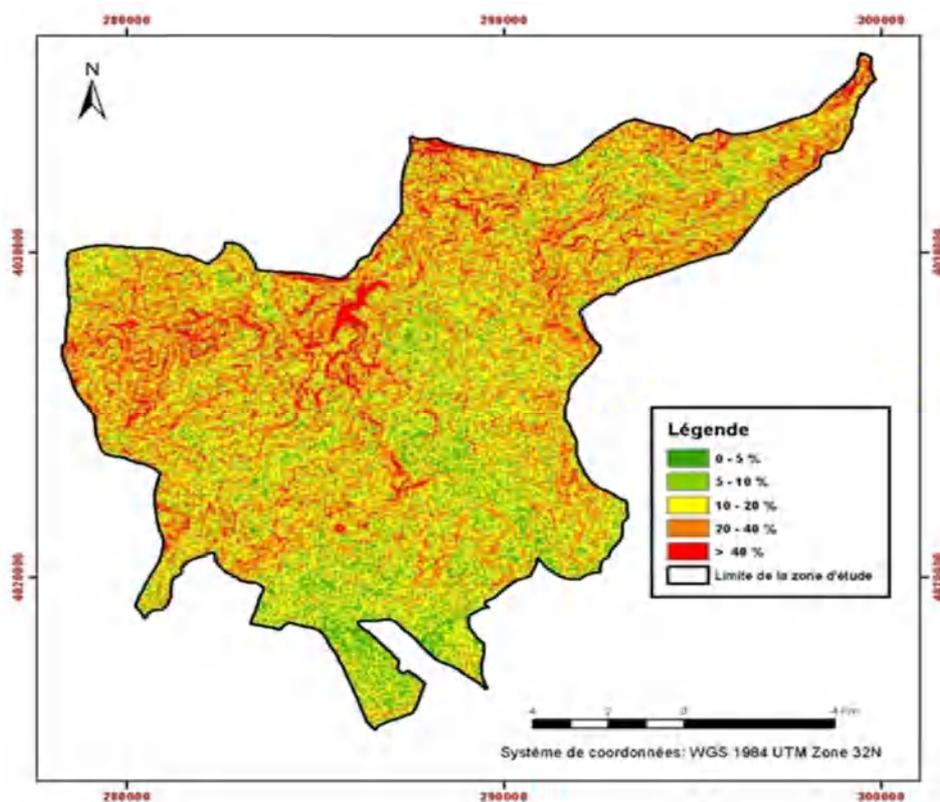


Figure 4.5. Carte des pentes de la zone d'étude en cinq classes.

Les mouvements gravitationnels sont directement liés à la pente et, par conséquent, à la contrainte de cisaillement à laquelle les matériaux sont soumis. Selon (Dai et Lee, 2002), l'examen de la fréquence des glissements de terrain en fonction des catégories de gradient de pente montre une augmentation avec ce gradient jusqu'à ce que la fréquence maximale soit atteinte dans la catégorie 35°-40°, suivie d'une diminution dans la catégorie supérieure à 40°. En se basant sur cette étude, la carte des pentes de la ville de Constantine a été extraite et générée à partir du Modèle Numérique d'Élévation (MNE ou DEM) avec une résolution de 28,20 m en utilisant le logiciel ArcGIS Pro, puis elle a été divisée en cinq catégories de pentes, comme indiqué dans la figure 4.5.

L'analyse des données extraites de la carte des pentes indique que les pentes comprises entre [10-20°] sont dominantes, avec un pourcentage de 36%, suivi par les classes, [0-10°] de 23%, et [20-30°], [30-40°], [>40°] successivement comme le montre le tableau 4.4 et l'histogramme, figure 4.6.

Tableau 4.4. Les surfaces des différentes classes des pentes dans la zone d'étude.

Pentes	Surface	
	(Km ²)	(%)
0-10	42,3	23
10-20	66,2	36
20-30	36,8	20
30-40	27,6	15
> 40	11,0	6

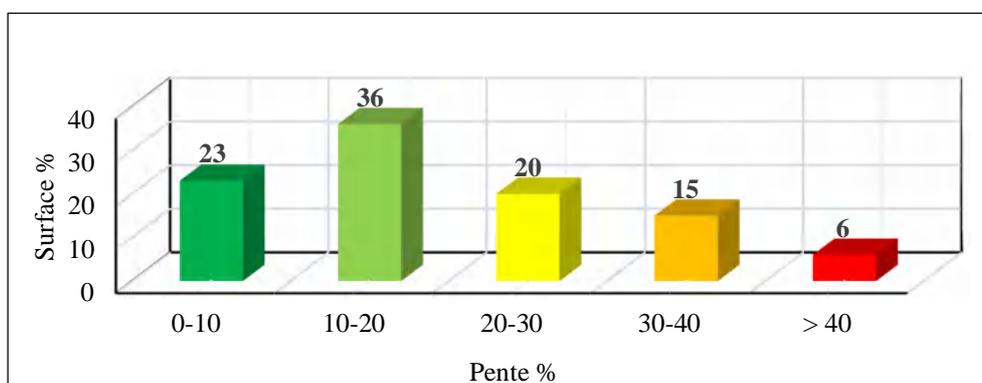


Figure 4.6. Histogramme présente le pourcentage de différentes classes des pentes.

■ Précipitations

Les glissements de terrain surviennent principalement en réaction aux précipitations, notamment les pluies fines et pénétrantes ainsi qu'à la fonte des neiges, agissant comme des déclencheurs majeurs. Ces événements contribuent à l'initiation des mouvements de terrain, entraînant une élévation du niveau d'eau souterraine et de la pression hydrostatique (Kayastha et al., 2013) ; (H.Shahabi et al., 2014).

Le climat de la ville de Constantine est humide, pluvieux en hiver, et chaud et sec en été, avec des précipitations annuelles variant entre 612 et 640 mm, L'histogramme suivante représente la moyenne pluviométrique de la ville de Constantine entre (1992-2021), comme la montre la figure 4.7.

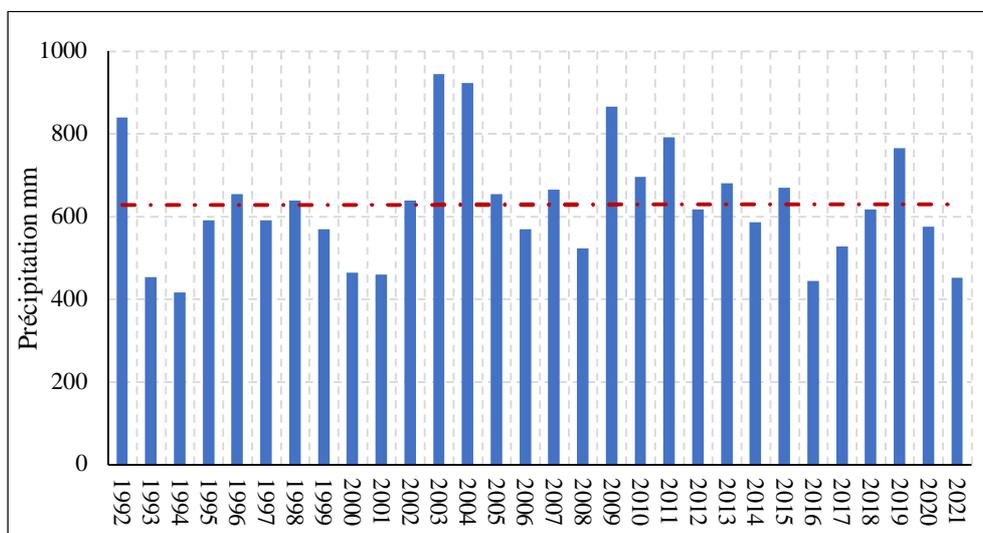


Figure 4.7. Histogramme représentant la moyenne pluviométrique de la ville de Constantine selon NASA.

La carte des précipitations a été reproduite, représentant ainsi cinq classes de précipitation comme la montre la figure 4.8.

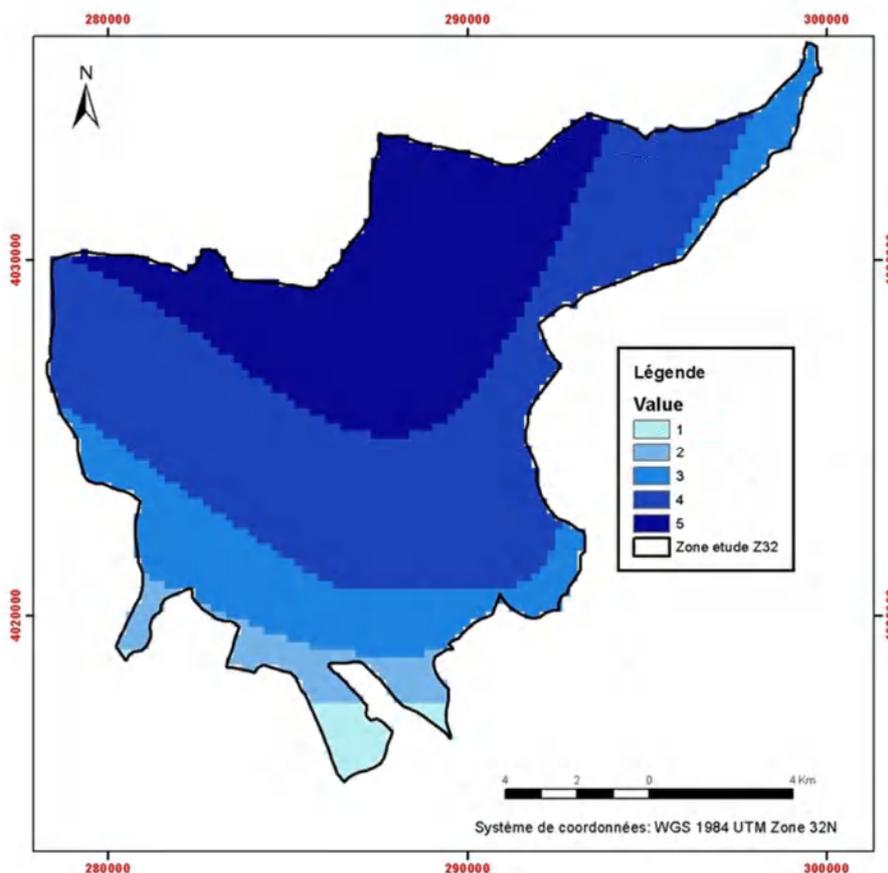


Figure 4.8. Carte des précipitations de la zone d'étude.

Les surfaces des cinq classes sont représentées dans le tableau 4.5 et l'histogramme (figure 4.9).

Tableau 4.5. Les surfaces des classes de la précipitation dans la zone d'étude.

Précipitations	Surface	
	(Km ²)	(%)
612-618	3,7	2
618-623	7,4	4
623-629	31,3	17
629-634	84,6	46
> 634	57,0	31

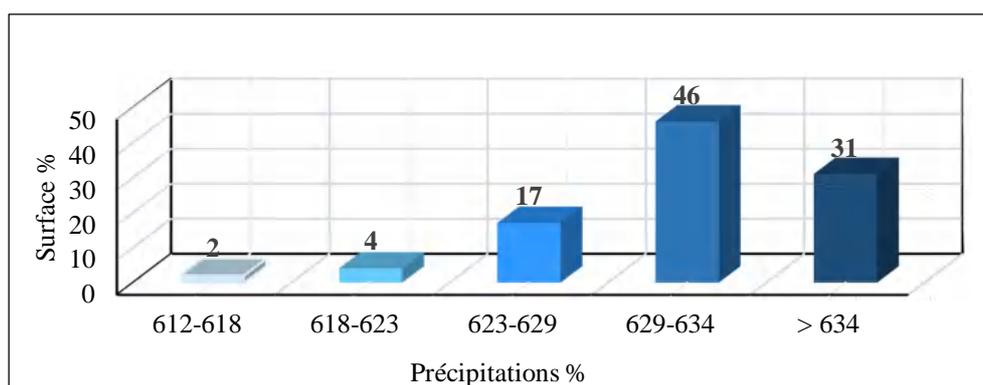


Figure 4.9. Histogramme en pourcentage des différentes classes de la précipitation.

Distance par rapport au cours d'eau

La proximité des cours d'eau joue un rôle déterminant dans la genèse des glissements de terrain. Certains mécanismes de glissement de terrain sont étroitement liés à l'effet érosif des rivières. Le schéma de drainage peut influencer la répartition des zones instables, régulant ainsi le comportement du terrain. Selon les études menées par Dai et Lee (2002) et Achour (2017) et qui ont démontré l'impact significatif du schéma de l'écoulement sur la thématique des glissements de terrain.

La saturation en eau des couches influe directement sur la stabilité des pentes. Tous les talus sont sujets à des cours d'eau en aval entraînant ainsi une importance capitale pour leur stabilité. Les débits peuvent impacter négativement la stabilité en érodant les pentes ou en saturant le matériau au point où le niveau d'eau s'élève. Dans ce contexte, la relation entre les cours d'eau et les eaux souterraines est cruciale. Les eaux souterraines interagissent directement avec les caractéristiques des eaux de surface, influençant le flux primaire des cours d'eau. Elles influent sur les eaux de surface en fournissant de l'humidité à la végétation riveraine et en contrôlant la résistance au cisaillement des matériaux constituant les pentes, affectant ainsi leur stabilité et les processus d'érosion.

Le débit minimal d'une rivière pendant les périodes sans précipitations ou fonte des neiges, désigné comme débit primaire, représente l'état normal des cours d'eau. Les eaux souterraines contribuent à ce débit de base pour toutes les rivières et exercent une influence considérable sur la quantité d'eau et la composition chimique des cours d'eau. Dans les rivières plus petites et moins

régulières, les eaux souterraines apportent également une augmentation significative du débit pendant et juste après les tempêtes. Ces flux ont un impact sur l'occurrence des glissements de terrain à travers tous ces événements (Yalcin, 2008).

Sur cette base des travaux cités précédemment, la carte des distances des cours d'eau de la ville de Constantine a été établie à partir du modèle numérique. Elle a été classée sur en cinq classes comme le montre la figure 4.10.

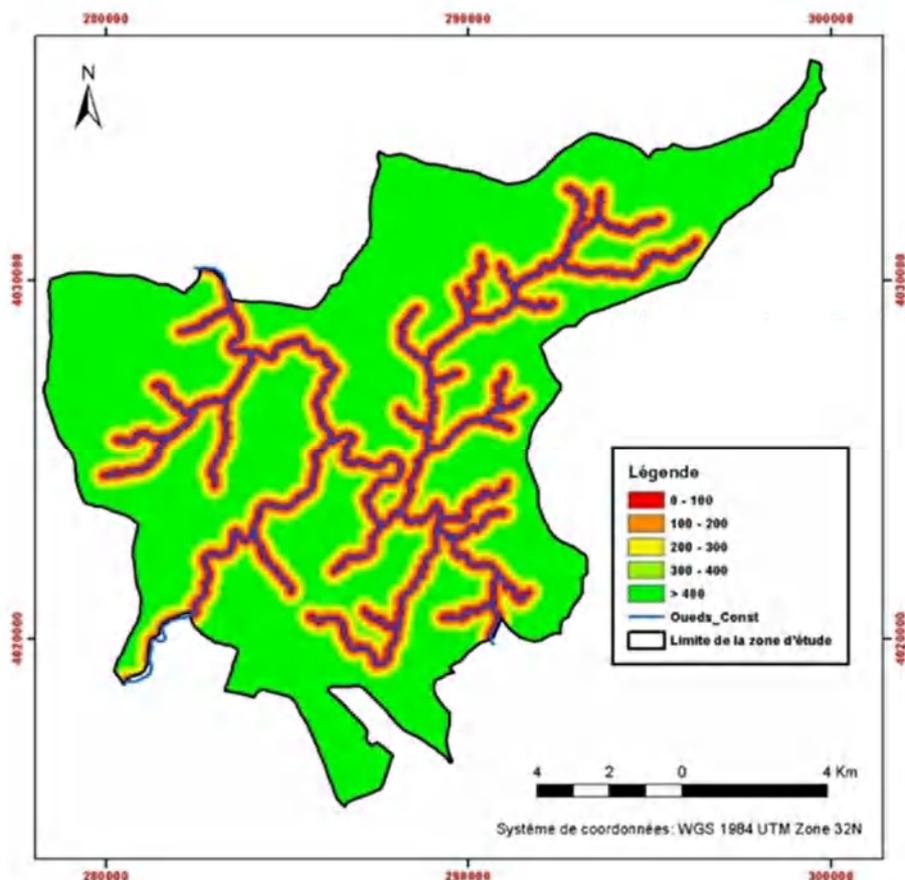


Figure 4.10. Carte de distance aux cours d'eau de la zone d'étude.

Les surfaces des cinq classes sont présentées dans le tableau 4.6 et l'histogramme de la figure 4.11.

Tableau 4.6. Les surfaces des classes de la distance aux cours d'eau dans la zone d'étude.

Distance cours d'eau	Surface	
	(Km ²)	(%)
0-100	20,2	11
100-200	18,4	10
200-300	16,6	9
300-400	16,6	9
> 400	112,2	61

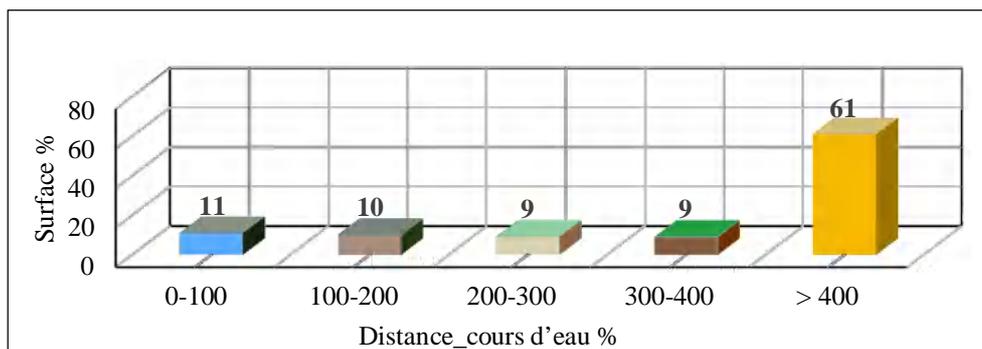


Figure 4.11. Histogramme en pourcentage des différentes classes de la distance aux cours d'eau.

L'altitude (Élévation)

La corrélation entre la fréquence des glissements de terrain et l'élévation est décrite par (Dai et Lee, 2002) comme suit :

- À de très hautes altitudes, on observe des sommets montagneux constitués principalement de roches altérées, offrant une résistance au cisaillement nettement plus élevée.
- À des altitudes intermédiaires, les pentes sont souvent recouvertes d'une fine couche de colluvion, ce qui les rend plus sujettes aux glissements de terrain.
- À de très basses altitudes, la fréquence des glissements de terrain est faible car le terrain lui-même est plus meuble, recouvert de colluvions épaisses et/ou de sols résiduels, nécessitant une nappe phréatique perchée plus haute pour déclencher une rupture de la pente.

La carte d'élévation de la ville de Constantine a été dérivée à partir du modèle numérique d'élévation MNE (OpenStreetMap, OSM), et classer en cinq classes sur la base d'un intervalle de 150 mètres comme le montre la figure 4.13.

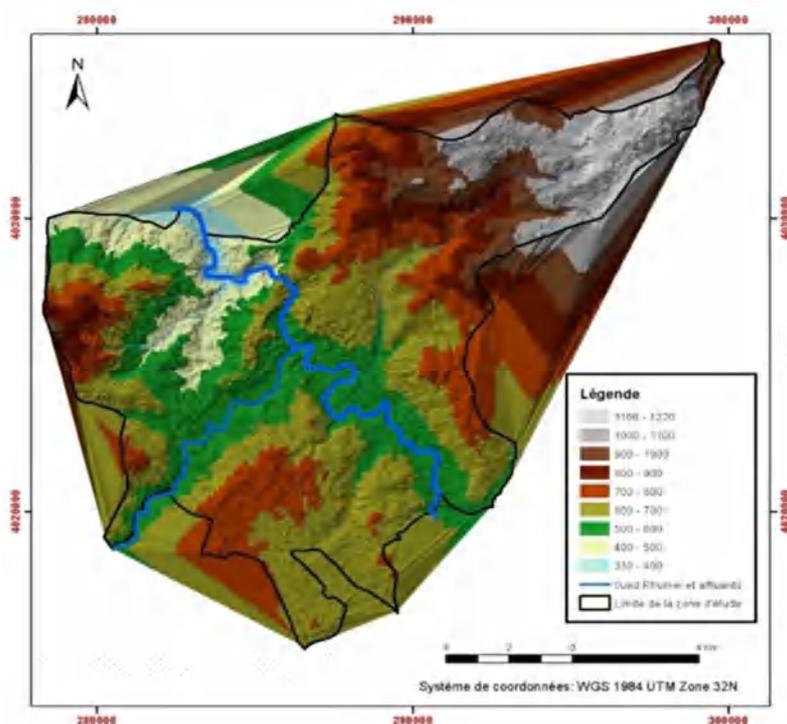


Figure 4.12. Carte d'élévation de la zone d'étude.

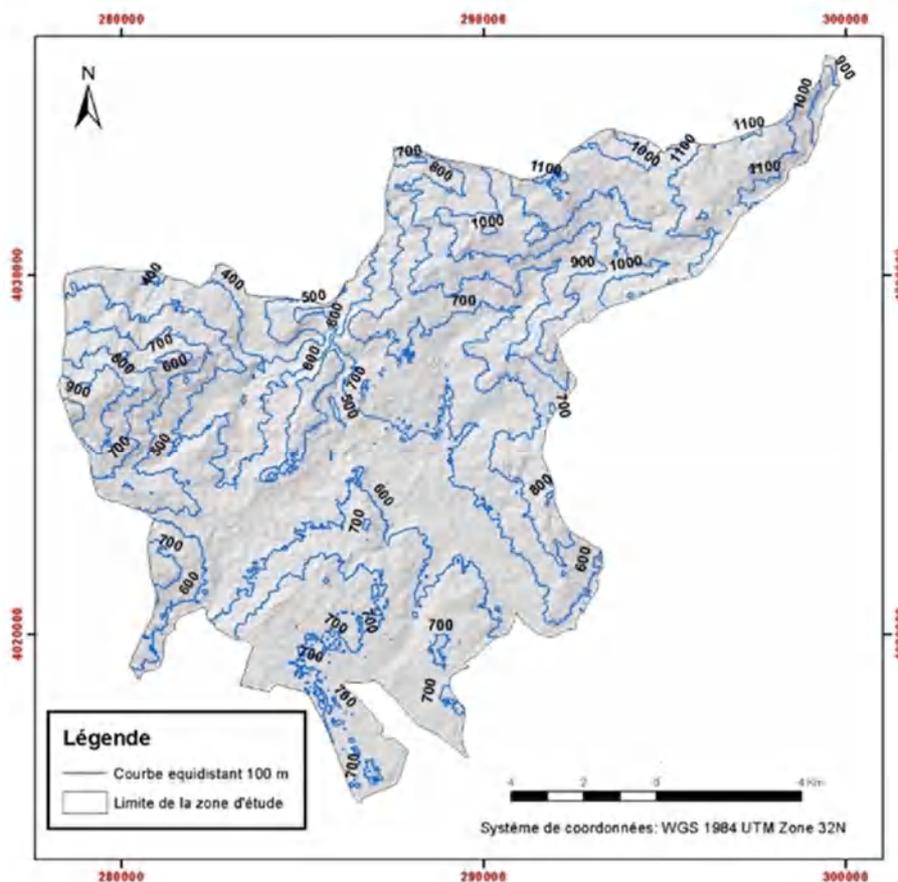


Figure 4.13. Carte d'élévation en courbe de niveau de la zone d'étude.

Dans le tableau 4.7 et la figure 4.14, on constate que les classe (750-900) et (>900) est la plus dominante avec un pourcentage de 38 % et 31%.

Tableau 4.7. Les surfaces des classes d'élévation dans la zone d'étude.

Elévation	Surface	
	(Km ²)	(%)
> 900	57,0	31
750-900	69,9	38
600-750	27,6	15
450-600	16,6	9
300-450	12,9	7

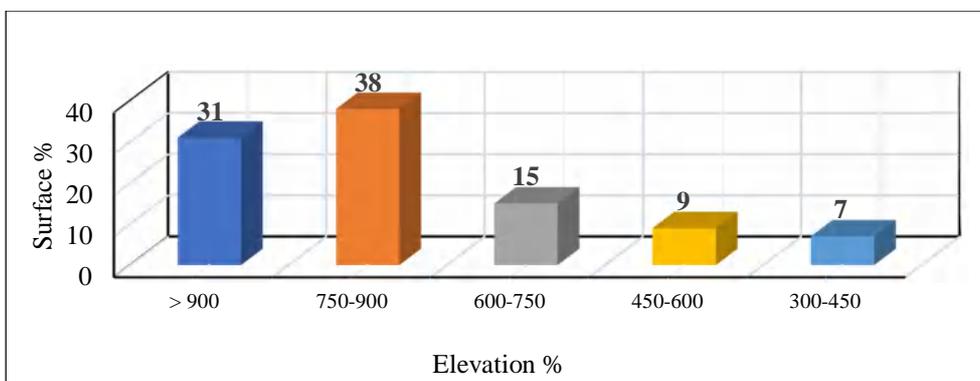


Figure 4.14. Histogramme des surfaces en pourcentage des différentes classes d'élévation.

L'occupation des sols

L'occupation du sol représente un facteur prépondérant dans la genèse des phénomènes de glissements de terrain. Les changements d'utilisation des terres sont influencés par des besoins de la population tels que la conversion des terres agricoles et forestières en zones urbaines et la modification involontaire ou non éthique des pentes pour le développement des infrastructures. L'utilisation des terres joue un rôle majeur dans la cartographie de la susceptibilité aux glissements de terrain (El Jazouli et al., 2019).

La couvert végétal ou l'occupation du sol, notamment avec une végétation ligneuse possédant des systèmes racinaires robustes et étendus, contribue à renforcer la stabilité des pentes. La végétation exerce des effets à la fois hydrologiques et mécaniques qui généralement favorisent la stabilité des pentes (Dai et Lee, 2002).

La carte d'occupation des sols de la zone d'étude a été générée à l'aide de l'image Landsat 8, et reclassifiée en cinq classes, à savoir zone urbaine, les terres nues (parcours), les terres végétales (cultures), les forêts, et les surfaces d'eau comme le montre la figure 4.15.

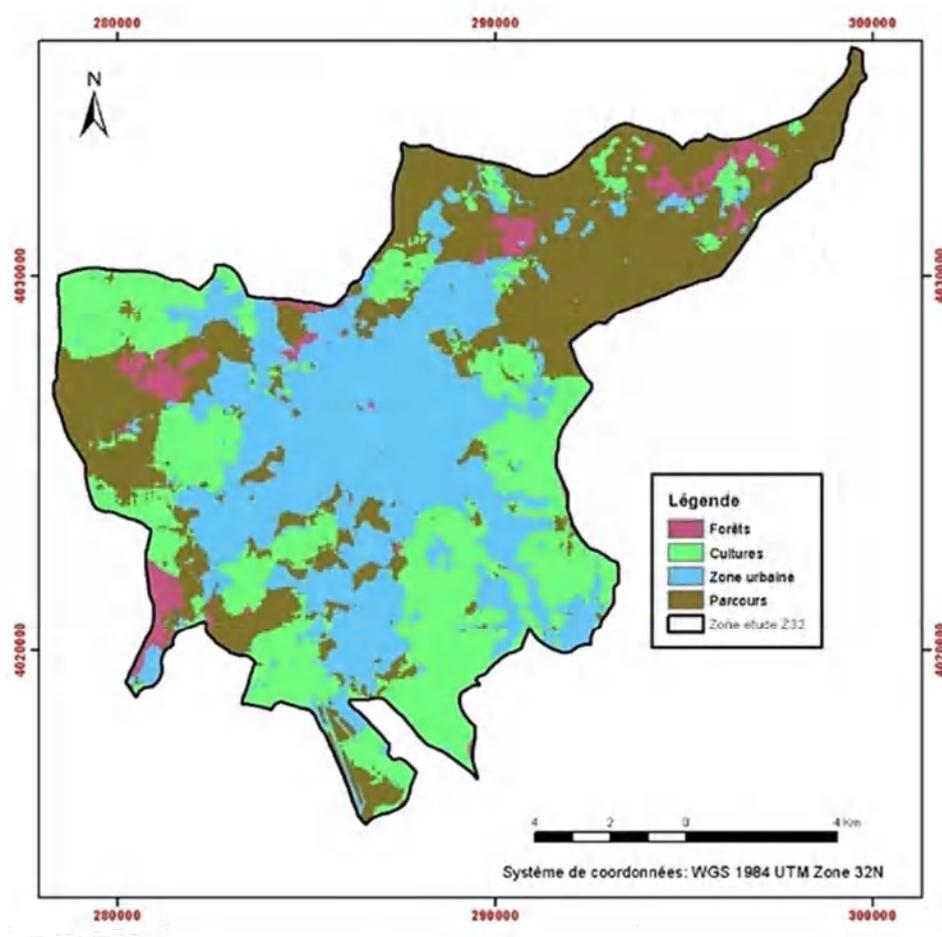


Figure 4.15. Carte d'occupation des sols de la zone d'étude.

On remarque que d'après le tableau 4.8 et la figure 4.16, que les surfaces sont réparties entre la zone urbaine, parcours, et cultures représente d'une manière presque équitable.

Tableau 4.8. Les surfaces des classes d'occupation des sols dans la zone d'étude.

L'Occupation des sols	Surface	
	(Km ²)	(%)
Forets	7,4	4
Cultures	55,2	30
Zone urbaine	60,7	33
Parcours	58,9	32
Surface d'eau	0,3	1

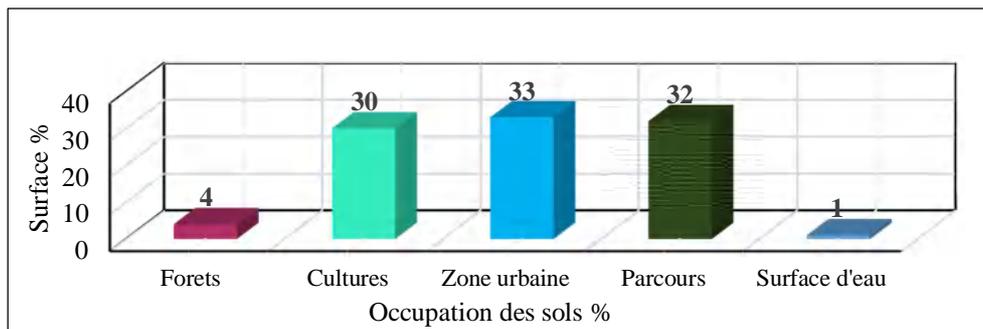


Figure 4.16. Histogramme en pourcentage des différentes classes d'occupation des sols.

🏗️ Détermination des poids

Après avoir identifié les six facteurs de prédisposition aux glissements de terrain, comme illustré dans l'organigramme, figure 4.17, nous allons maintenant évaluer l'importance relative de chacun de ces facteurs (critères). Cette évaluation se fera en calculant les pondérations des différents facteurs et classes. Pour ce faire, nous avons utilisé Excel pour le traitement des données, afin de mettre en œuvre la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process).

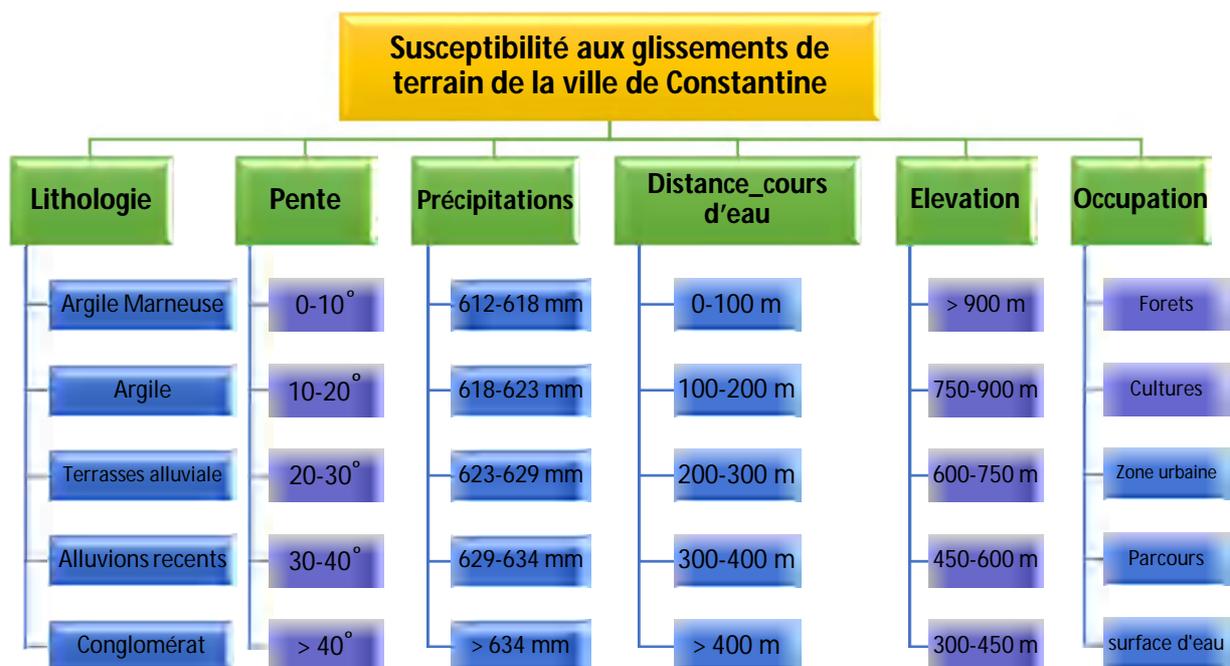


Figure 4.17. Susceptibilité aux glissements de terrain de la ville de Constantine selon le modèle AHP.

Le modèle AHP repose généralement sur une méthode de notation issue des études statistiques basées sur des inventaires des glissements. Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau 4.9, qui montrent les matrices de comparaison par paires pour les classes et les critères, ainsi que leurs poids relatifs, selon la méthodologie de Saaty. Le Consistency Ratio (RC) a été calculé pour tous les facteurs et s'est avéré être inférieur à 0,10, indiquant que les poids attribués étaient cohérents et que toutes les matrices étaient conformes.

Tableau 4.9. Matrice de comparaison par paire de différents critères.

		Lithologie	Pente	Précipitation	Distance cours d'eau	Elévation	Occupation	Poids
1	Lithologie	1	1	4	5	5	5	0,365
2	Pente	1,000	1	3	4	4	4	0,312
3	Précipitation	0,250	0,333	1	1	1	1	0,086
4	Distance Cours d'eau	0,200	0,250	1,000	1	1	1	0,079
5	Elévation	0,200	0,250	1,000	1,000	1	1	0,079
6	Occupation	0,200	0,250	1,000	1,000	1,000	1	0,079

4.1.1 Délimitation des zones susceptibilité au risque glissement

Une fois que les différentes couches thématiques relatives aux facteurs d'appréciation ont été établies et que des coefficients de pondération leur ont été attribués, nous allons procéder à l'analyse multicritères ou à l'agrégation des facteurs. Pour ce faire, nous avons utilisé la méthode de combinaison linéaire pondérée (WLC), qui intègre totalement tous les facteurs considérés en une seule étape. Cette méthode consiste à multiplier chaque couche facteur par son coefficient de pondération respectif, puis à additionner ces résultats pour produire un coefficient de susceptibilité aux glissements de terrain, tel que représenté par la formule suivante (équation 4.3) :

$$C_{SG} = \sum_1^n X_{ab} * W_b \dots \dots \dots \text{eq.4.3.}$$

C_{SG} : Coefficient de susceptibilité aux glissements de terrain.

n : nombre des facteurs.

W_b : c'est le poids du critères b.

X_{ab} : poids de la classe a dans le paramètre b.

Une fois l'équation mentionnée précédemment appliquée, la carte de susceptibilité aux glissements de terrain est obtenue, comme illustré dans la figure 4.18.

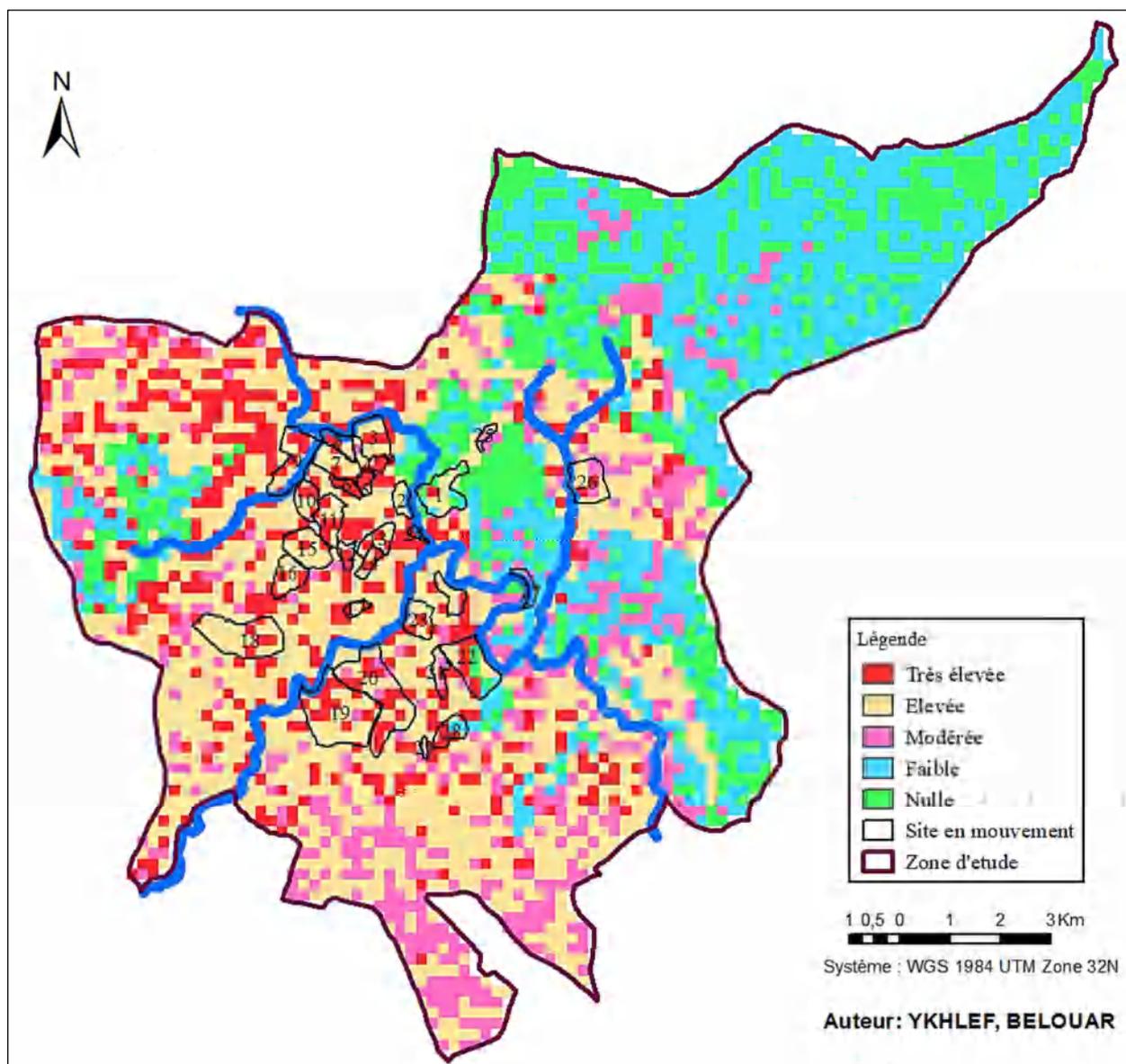


Figure 4.18. Carte de susceptibilité aux glissements de terrain de la zone d'étude.

Sur cette carte, chaque valeur de pixel représente la susceptibilité globale aux glissements de terrain, les valeurs plus basses correspondant à des classes de sensibilité faible. Les valeurs additionnées ont été reclassées en cinq classes de susceptibilité de base, faciles à interpréter : très élevée, élevée, modérée, faible et nulle.

D'après les résultats de l'analyse de la répartition et de l'étendue des différentes zones qui se répartissent comme suit : 23,9 km² (13 %) pour la très élevée, 66,2 km² (36 %) pour l'élevée, 25,8 km² (14 %) pour la modérée, 40,5 km² (22 %) pour la faible et 27,6 km² (15 %) pour nulle, comme indiqué dans le tableau 4.10 et l'histogramme de la figure 4.19.

On remarque d'après cette étude que la surface la plus touchée et la plus importante se situe sur les argiles du Mio-Pliocène d'âge géologique quaternaire d'où l'importance de la lithologie concernant les études des mouvements de terrains. On a relevé aussi que le pourcentage des surfaces très élevée, modérée et nulle est presque identique sur la zone d'étude (Constantine).

Tableau 4.10. Surfaces des glissements de terrain pour les différentes zones de susceptibilité.

Susceptibilité aux Glissements de terrain	Surfaces	
	(Km ²)	(%)
Très élevée	23,9	13
Elevée	66,2	36
Modérée	25,8	14
Faible	40,5	22
Nulle	27,6	15

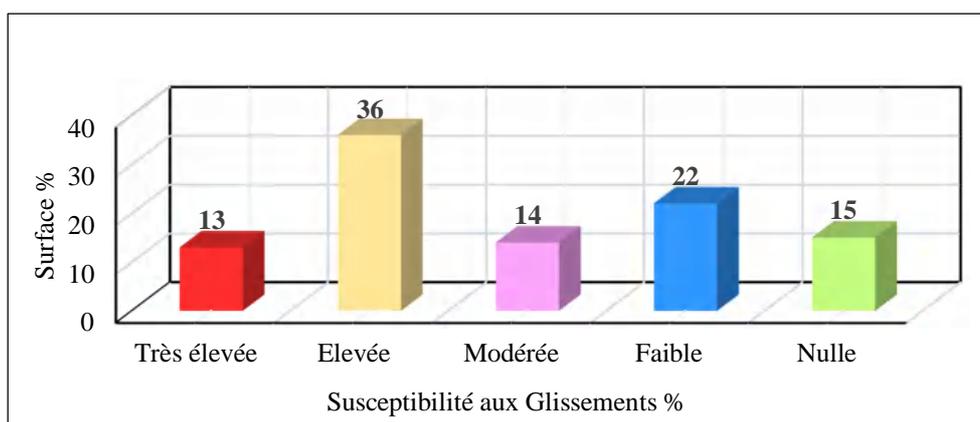


Figure 4.19. Histogramme montrant le pourcentage de différentes classes de susceptibilité.

1.2. Validation de la cartographie de zonage de susceptibilité aux glissements

Il existe diverses méthodes de validation pour la cartographie de zonage de la susceptibilité aux glissements de terrain. La méthode la plus fiable consiste à effectuer une validation physique sur site. Dans ce cadre, des visites ont été effectuées, ainsi que les emplacements des glissements de terrain recueillis en utilisant la carte géoréférencée obtenue via ArcGIS Pro, notamment pour les zones identifiées comme présentant une sensibilité élevée et très élevée, comme illustré dans la figure 4.20.

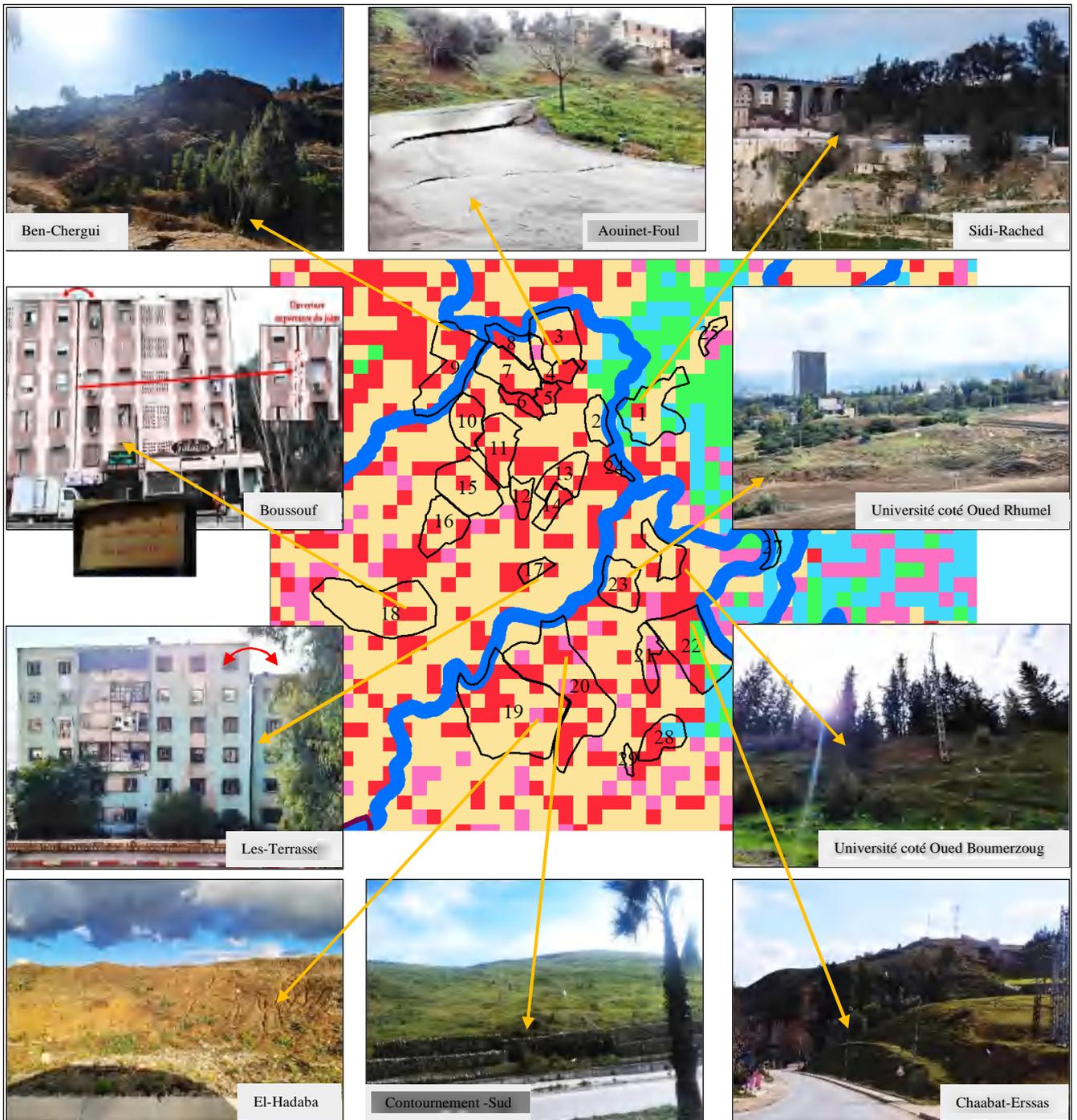


Figure 4.20. Cartographie des zones susceptibles aux glissements obtenue par AHP et validation des résultats de la méthode sur quelques sites bien connus pour leurs mouvements.

La validation de la cartographie des terrains susceptibles aux terrains instables est nécessaire pour une évaluation crédible qui doit prendre en considération :

- L'ensemble des études menées sur des sites : La cartographie peut être appliquées à ces derniers pour une évaluation adéquate du modèle utilisé que ce soit pour les glissements récents ou réactivés.
- L'analyse des effets positifs ou négatifs : L'identification des effets positifs (zones prédites comme à risque mais sans glissements) et négatifs (comme zones sûres mais avec des glissements) dont l'évaluation du modèle permet une sensibilité et ayant ainsi des informations sur sa validation.
- Sorties sur terrain : Des visites sur les sites en question pour visualiser la présence ou l'absence de mouvements pour prédire une validation juste du modèle.
- Analyse probabiliste et statique : L'approche mathématique par l'utilisation des méthodes statistiques et probabilistiques permet d'avoir une précision à la sensibilité et peut aider à promouvoir la performance de la cartographie à la susceptibilité.
- Comparaison avec d'autres modèles : Une comparaison à des modèles utilisées (tel que le BRGM) ailleurs peut apporter une bonne appréciation sur la cohérence des résultats obtenus dans cette zone d'étude et sert à fournir aux décideurs et aux gestionnaires du tissu urbain de cette ville une approche adéquate pour les constructions dans cette région.

Conclusions

La présente approche cartographique offre un intérêt particulier pour localiser les zones exposées aux glissements de terrain anciens qui peuvent se réactiver et des futurs qui peuvent se déclencher dans la zone d'étude et de donner une évaluation qualitative de ce risque.

Les méthodes AHP (Analytic Hierarchy Process), WLC (Weighted Linear Combination), et les SIG (Systèmes d'Information Géographique) ont été employés pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain dans la ville de Constantine. Les SIG ont été utilisés pour l'identification des zones d'étude, la manipulation des données recueillis, le traitement des cartes, et la présentation finale des résultats. L'AHP a été essentiel dans l'attribution des poids aux différents facteurs, et la méthode de combinaison linéaire pondérée (WLC) a été utilisée pour convertir les données pondérées de chaque facteur en un indice de susceptibilité aux glissements de terrain.

Cette étude démontre également l'efficacité et la souplesse de la technique SIG dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain, en comparaison avec les méthodes manuelles utilisées dans le passé. L'intégration de WLC et AHP avec les SIG fournit une combinaison puissante pour l'analyse de la susceptibilité aux glissements de terrain.

Dans cette étude, six (06) facteurs ont été considérés, à savoir : la lithologie, la pente, les précipitations, l'élévation, la distance par rapport aux cours d'eau et l'occupation des sols. Le choix de ces facteurs repose sur leur pertinence par rapport aux occurrences de glissements de terrain. Les résultats révèlent que les zones présentant une sensibilité élevée et très élevée couvrent 49% de la zone étudiée. De plus, les larges glissements de terrain observés sont nettement localisés dans les zones identifiées comme ayant une sensibilité élevée et très élevée. La carte de sensibilité aux glissements de terrain présentée dans cette étude peut être une ressource précieuse pour les décideurs, les planificateurs et les ingénieurs. Elle peut être utilisée par les autorités compétentes pour planifier la gestion des catastrophes liées aux glissements de terrain.

La ville de Constantine est sujet aux glissements de terrain en raison de son cadre géologique (argiles, marnes, grès), géomorphologique et climatologique avec la moyenne pluviométrique varie de 415-950 mm par an.

Au sein de cette étude, la corrélation spatiale entre les événements de glissement de terrain survenus sur place et les facteurs déclenchants tels que la lithologie, la pente, les précipitations, la distance aux cours d'eau, l'élévation et l'occupation des sols a été examinée en utilisant des techniques

de Systèmes d'Information Géographique (SIG) combinées aux méthodes d'évaluation multicritères WLC et AHP.

L'analyse finale de la carte de susceptibilité montre que la zone d'étude est délimitée en cinq zones susceptibilité aux glissements de terrain, à savoir : nulle, faible, modéré, élevé, très élevé, couvrant 13 %, 36 %, 14 %, 22 % et 15 % de la zone d'étude, respectivement. Plus de 49 % de la zone d'étude présente une susceptibilité « élevé » à « très élevé » aux glissements de terrain ainsi 14 % modéré.

La carte de susceptibilité aux glissements de terrain proposée dans cette étude représente un outil important pour les responsables et les décideurs, afin de faciliter des prises de décisions rapide et bien fondée. Son utilisation permet de réduire au minimum, voire d'éviter, les dommages et les pertes dus aux glissements de terrain actuels et futurs. Elle contribue également à prévenir les zones hautement vulnérables grâce à la mise en place de mesures préventives adéquates et de procédures d'atténuation.

La ville de Constantine s'est admirablement prêtée à la mise au point de la méthode proposée en raison de la bonne connaissance des différents secteurs sujets à des mouvements évolutifs et de l'abondance des informations géotechniques. Celles-ci proviennent d'une pratique systématique de l'échantillonnage suivis d'essais d'identification.

La validation des résultats de la méthode sur des sites bien connus a permis de la préconiser pour un repérage à priori des zones sensibles au mouvement.

De cette manière et par l'utilisation de cette technique cartographique reposant sur des critères géotechniques plus fiables et leur exploitation plus cohérente scientifiquement, il est possible d'appréhender globalement les points faibles d'un territoire de manière à en orienter les conditions d'aménagement.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

« Et si j'ai réussi mon dernier souhait est qu'il se soit noué un lien supérieur, indestructible, entre le beau et le vrai, lien qui aura suscité une union éternelle et indissoluble entre nous ».

G.W.F.Hegel.

Conclusions et recommandations

1. Conclusions

Le présent travail a permis de mettre en évidence les conclusions suivantes :

Globalement, toute la partie Nord-Ouest de la ville de Constantine est dans une situation très défavorable, pour les versants existants et reconnu comme instable d'où la nécessité d'étude géotechnique très poussées concernant les caractéristiques médiocres de ces sols sensibles pour éventuellement les utiliser comme sols support ou de fondations. En effet :

- Les argiles minéralogiquement sensibles à ces phénomènes, y sont très répandues, car souvent ce sont ces variations climatiques extrêmes qui sont à l'origine de la formation des minéraux argileux qui constituent les argiles gonflantes.
- La topographie accidentée laisse naître des terrains avec des talus à la limite de la stabilité.
- L'existence des réseaux d'assainissement défectueux favorise les instabilités.

En plus d'une géologie de Constantine constituée de :

- Les terrasses alluviales limoneuses du Quaternaire ;
- Formations argileuses contenant des passages lenticulaires de sables du Pliocène favorisant le développement des pressions hydrostatiques et des marnes grises ;
- Présence de gypse qui par dissolution contribue à modifier les caractéristiques mécaniques des argiles.

Ces constatations ont un effet direct sur le comportement des sols de la région de Constantine.

Ces éléments ont joué un rôle très important contre la stabilité des versants.

Il est nécessaire de connaître les caractéristiques de ces sols par les résultats des essais géotechniques réalisées par différentes institutions et recueillis par nous-mêmes de ces institutions pour être analysés et exploités dans des fichiers en Excel et interprétés par le modèle d'analyse à l'état critique afin de pouvoir parler d'une vulnérabilité au risque à l'aide d'une cartographie.

Une typologie des glissements de terrains qui affectent la ville de Constantine montre que :

- Presque toutes les couches lithologiques se trouvent inclinées à 30°. Cela signifie que les couches sont inclinées vers la vallée, favorisant l'instabilité, en addition au phénomène d'eau qui est un facteur important dans le déclenchement des mouvements de terrain ;
- Un relief accidenté dû essentiellement à une tectonique cassante ;

- Une géologie avec une déposition en surface de sédiment sensible dû à la période du quaternaire constituant une stratification d'argiles et de marnes du Mio-Pliocène ;
- Un réseau d'assainissement et d'eaux potables défaillant (déperdition de l'ordre de 50 %).
- L'action anthropique et les constructions anarchiques permettent les instabilités ;

Tous ces facteurs conduisent à élaborer une base de données du sol permettant de mettre en évidence les risques d'instabilités d'où la nécessité d'une cartographie à la vulnérabilité au risque.

Cette banque peut-être actualiser, mise à jour, éditer des informations, modifier ou supprimer certaines données qui seront erronées.

L'homogénéisation des données à stocker, en éliminant les sondages mal situés assure une certaine régularité et fiabilité des résultats.

La synthèse des résultats de caractérisation des essais de la campagne géotechnique a montré la faible capacité de ces sols avec des caractéristiques physico-mécaniques médiocres en surface et s'améliorant très faiblement en profondeur.

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de l'argile sous chargement en cellule à chemin de contrainte, plusieurs essais triaxiaux non drainés et drainés ont été réalisés sur des échantillons intacts et remaniés. Les déformations axiales, la pression interstitielle excédentaire et la résistance au cisaillement ont été déterminées en interprétant les résultats des essais sur le chemin de contrainte.

L'étude a permis une meilleure compréhension de certains aspects du comportement du sol dans la zone de glissement de terrain de Constantine. Le programme d'essais entrepris indiquent que K_0 est directement lié à l'historique de la contrainte du sol et dépend également de l'état de l'échantillon avant l'essai. De plus, les résultats indiquent une relation linéaire entre K_0 et σ' . Cela concorde avec les études d'autres auteurs. Cependant, contrairement aux travaux antérieurs, aucune corrélation entre K_0 et l'indice de plasticité (I_p) n'a été trouvée.

La présente étude a été entreprise avec la théorie de l'analyse d'état critique car tous les problèmes liés au comportement des échantillons testés ont montré une résistance au cisaillement maximale caractérisant des matériaux surconsolidation pouvant entraîner une instabilité dans cette zone. Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de l'argile, plusieurs essais triaxiaux non drainés et drainés ont été réalisés. Les déformations axiales, la pression interstitielle excédentaire et la résistance au cisaillement ont été découvertes en interprétant les résultats des essais sur le chemin de contrainte.

Les glissements de terrain sont souvent causés par les précipitations et **les nappes phréatiques** dans les dépôts d'argile autour du nord-ouest de Constantine. L'argile contient principalement des

substances minérales qui sont facilement altérables et ont une faible perméabilité, tandis que l'eau conduit à une diminution de la résistance au cisaillement de l'argile expansive.

L'approche cartographique offre un intérêt pour localiser les zones exposées aux glissements de terrain anciens qui peuvent se réactiver et des futurs qui peuvent se déclencher.

Les méthodes AHP (Analytic Hierarchy Process), WLC (Weighted Linear Combination), et les SIG (Systèmes d'Information Géographique) ont été employés pour évaluer la susceptibilité aux glissements de terrain dans la ville de Constantine. a été utilisée pour convertir les données pondérées de chaque facteur en un indice de susceptibilité aux glissements de terrain.

Cette étude démontre l'efficacité et la souplesse de la technique SIG dans l'évaluation de la susceptibilité aux glissements de terrain.

Dans cette étude, six (06) facteurs ont été considérés, à savoir : la lithologie, la pente, les précipitations, l'élévation, la distance par rapport aux cours d'eau et l'occupation des sols. Le choix de ces facteurs repose sur leur pertinence par rapport aux occurrences de glissements de terrain. Les résultats révèlent que les zones présentant une sensibilité élevée et très élevée couvrent 49 % de la zone étudiée. De plus, les larges glissements de terrain observés sont nettement localisés dans les zones identifiées comme ayant une sensibilité élevée et très élevée. La carte de sensibilité aux glissements de terrain présentée dans cette étude peut être une ressource précieuse pour les décideurs, les planificateurs et les ingénieurs.

L'analyse finale de la carte de susceptibilité montre que la zone d'étude est délimitée en cinq zones susceptibilité aux glissements de terrain, à savoir : nulle, faible, modéré, élevé, très élevé, couvrant 13 %, 36 %, 14 %, 22 % et 15 % de la zone d'étude, respectivement. Plus de 49 % de la zone d'étude présente une susceptibilité aux glissements de terrain « élevé » à « très élevé » et 14 % modéré.

La carte de susceptibilité aux glissements de terrain proposée dans cette étude représente un outil important pour les responsables et les décideurs, afin de faciliter des prises de décisions rapide et bien fondée. Son utilisation permet de réduire au minimum, voire d'éviter, les dommages et les pertes dus aux glissements de terrain actuels et futurs. Elle contribue également à prévenir les zones hautement vulnérables grâce à la mise en place de mesures préventives adéquates et de procédures d'atténuation.

La ville de Constantine s'est admirablement prêtée à la mise au point de la méthode proposée en raison de la bonne connaissance des différents secteurs sujets à des mouvements évolutifs et de l'abondance des informations géotechniques. Celles-ci proviennent d'une pratique systématique de l'échantillonnage suivis d'essais d'identification.

La validation des résultats de la méthode sur des sites bien connus a permis de la préconiser pour un repérage à priori des zones sensibles au mouvement.

2. Recommandations

Il est nécessaire d'approfondir cette recherche par d'autres inventaires de glissements de terrain, pour concevoir et appréhender d'autres modèles. Les bases de données existantes pourraient être améliorées en introduisant des dimensions temporelles et d'échelle.

La dimension d'échelle signifie la capacité de changer la représentation du glissement de terrain à différentes échelles, d'un simple point à un ensemble de polygones représentant les caractéristiques du glissement de terrain.

D'autres aspects tels que l'ampleur, le moment de l'occurrence, les dimensions géométriques sont très utiles pour l'analyse statistique des glissements de terrain et pour prédire l'ampleur et la distance de déplacement attendues.

La pénurie de données est l'une des principales limitations sur l'étude de cette thématique.

La sélection des indicateurs pour l'évaluation des risques et de la vulnérabilité nécessite des investigations approfondies sur des questions telles que la redondance en mesurant les corrélations et la cohérence en comparant les évaluations à différents niveaux d'analyse.

Des études seraient nécessaires pour déterminer tous les coûts liés à l'équation des risques pour différents éléments à risque et discuter avec les autorités des valeurs réelles.

Les objectifs de l'évaluation des risques de glissements de terrain à différents niveaux pourraient être analysés plus en détail. De plus, les sciences sociales pourraient améliorer de manière significative les méthodes actuelles d'évaluation des risques, notamment en évaluant l'acceptation et la tolérance du risque par différents intervenants.

Bibliographies

- [1] Mitchell J.K., 1986, Practical problems from surprising soil behaviour (20th Terzaghi lecture). Journal of Geotechnical Engineering. ASCE. Vol 112, n°3.
- [2] Abelev Y.M., Abelev M.O.Y., 1986, Bases de l'élaboration des projets et de la construction sur les sols loessiques affaissables. Lavoisier. Techniques et Documentation, Paris (traduction française J.-P. Magnan), p787.
- [3] Travers T., Ammi M., Bideau D., Gervois A., Lemaitre J., Messenger J.C. et Troadec J.P., 1988, Compression de milieux granulaires modèles à deux dimensions. Rev. Fr. Géotech. N° 43, 21–34.
- [4] Schlosser F., Elias V., 1978, Friction in Reinforced Earth. Proc.of ASCE Symposium. Pittsburgh.
- [5] Cambou J., Benahmed N., Dupla J.-C. and De Gennaro V., 2002, Instabilités de liquéfaction et phénomène de mobilité cyclique dans les sables, Revue française de géotechnique Issue, 98 Pages 29-46.
- [6] Habib P., 1994, Aspects géotechniques de l'accident du nouveau port de Nice, Revue Française de Géotechnique, Issue 66 Pages 3-15.
- [7] Cui Y. J., Delage P., Durand F., Schlosser F., Wojnarowicz. M., 1993, Comportement mécanique des loess sur le tracé du TGV Nord. Comptes rendus du 12ème CEMSTF. Copenhague.
- [8] Leroueil S. and Hight D., 2002, Mechanical behaviour and properties of natural soils and soft rocks Proc. Int. Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore.
- [9] Kabbaj M., Leroueil S., Oka F., Tavenas F., 1986, Consolidation of natural clays and laboratory testing, ASTM STP 892, R. N. Yong and F.C. Townsend, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia.
- [10] Leroueil S., 2006, Šuklje Memorial Lecture: The isotache approach. Where are we 50 years after its development by Professor Šuklje? Proc. 13th Danube Eur. Conf. Geotech. Engng, Ljubljana 2, 55–88.
- [11] Zaghouani K., Chouikha A., Guilloux A., Schlosser F. and Berthelot P., 2009, Pont de Radès La Goulette (Tunisie): consolidation des remblais d'accès, Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (Volumes 1, 2, 3 and 4), Publisher: IOS Press Pages: 1630-1633.
- [12] Escher M. C., 2009, The Graphic Work - Taschen.
- [13] Jolleaud L., 1912, Étude géologique de la chaîne Numidique et des Monts de Constantine. Thèse de doctorat, Paris p436.

- [14] Deleau P., 1952, Etude stratigraphique de Constantine (Djebel Oum Settas). Thèse de doctorat, pub serv. Carte géol Algérie, (2), N°14, texte et atlas.
- [15] Villa J. M., 1977, Carte géologique à 1/50 000 El Aria avec notice explicative, Publ. SGA.
- [16] Lahondere F., 1987, Les séries ultra - telliens d'Algérie Nord orientale et les formations environnantes dans leur cadres structurales, Thèse d'état U.P. Sabatier Toulouse.
- [17] Chadi, 1991, Allochtone des massifs néritique (thèses Paris) Bull Serv Carte Géolo Algérie (Nord Constantinois).
- [18] Coiffait P.E., 1992, Un bassin post-nappe dans le cadre structural. L'exemple du Bassin de Constantine (Algérie Nord Orientale). Thèse de Doctorat d'Etat ès Science Naturelle, Nancy.
- [19] Aris y., 1994, Etude tectonique et microtectonique de la chaîne calcaire (nord constantinois, Algérie) C.R. somm. Soc. Géol.fr.Paris fig.1 p 178.
- [20] Benaissa A., 1999, Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine (Algérie) : Bull Eng Geol Env,57,301-310.
- [21] Direction d'Urbanisme et de Construction DUC, 2003, Rapport de glissements de terrain, ville de Constantine, Algérie.
- [22] Institut National de Cartographe et de Télédétection, 1998, Ministère de la Défense Nationale, Tripoli Houssein-Dey Alger, Carte d'Algérie, Constantine, E1/50000.
- [23] Belouar A., Seridi A., 2005, Typologie de certains glissements de terrain à Constantine. First Middle East International Conference of Engineering.
- [24] Paulsen S., Krauter E., Hanisch J., 1999, Rapport d'expertise sur les glissements de terrain de la ville de Constantine (Algérie), Institut Fédéral des Géosciences et des ressources naturelles Hanovre (R.F.A), N° arch. 117989.
- [25] Evans S.G., 1998, Les glissements de terrain de la ville de Constantine, Géologie, géotechnique, et travaux de correction potentielle. Commission géologique du Canada, rapport final pour l'Office de Recherche Géologique et Minière (O.R.G.M), Alger, 48 pages.
- [26] Google Earth Pro, 2023, Logiciel de cartographie et de visualisation géospatiale AR Keyhole Inc, aux États-Unis. Entreprise spécialisée dans les technologies de cartographie et d'imagerie géospatiale.
- [27] Benayoun F, Belouar A., 2001, Caractérisation d'un site géotechnique. Séminaire national de génie civil. Tébessa, Algérie. Vol1 pp 35-47.

- [28] Belouar.A, Seridi.A, Mongereau.N, Vinet.L et Boulfoul.A. 2004, Etude Géotechnique, Géologique et Géophysique pour caractériser un site sur sol problématique. International Conference on Geotechnical Engineering, Beyrouth, Lebanon.pp799-805.
- [29] URBACO, 1981, Centre d'Etudes & de Réalisation en Urbanisme de Constantine, Etude d'impact du PUD de la ville de Constantine.
- [30] Durozoy G., 1998, Reconnaissance géologique dans le Hank (Sahara occidental). Publ. Serv. Carte géol. Algérie, Trav. Collab.
- [31] Benaissa, A. ; Cordary, D. ; Gioraud, A., 1989, Ground motions in the urban area of Constantine (Algeria), Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur, Vol 40, p 85-90, ISSN 0074-1612.
- [32] EEG-Simecsol, 2004, L'entreprise française, étude d'expertise de glissements de terrains à Constantine algerie.
- [33] Excel, 2019, Logiciel utilisé pour la création, gestion, calcul et analyse des données numériques. Microsoft.
- [34] Athmania, D., Benaissa, A., & Bouassida, M., 2009. Mineralogical properties of swelling clays of the wilaya of Mila. Colloque international Sol Non Saturés et Environnement. Tlemcen-Algérie-27 et, 425-435. (In French).
- [35] Xu, S., Lu, H., Liu, J., & Li, J., 2019. An experimental study on the microstructure and triaxial shear of structured clay in contact with landfill leachate. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78(6), 4611–4622. doi:10.1007/s10064-018-1409-0.
- [36] Stevenson, C. M., & Gurnick, M., 2016. Structural collapse in kaolinite, montmorillonite and illite clay and its role in the ceramic rehydroxylation dating of low-fired earthenware. Journal of Archaeological Science, 69, 54–63. doi: 10.1016/j.jas.2016.03.004.
- [37] Ducasse, E., Adeline, K., Briottet, X., Hohmann, A., Bourguignon, A., & Grandjean, G., 2020. Montmorillonite estimation in clay-quartz-calcite samples from laboratory SWIR imaging spectroscopy: A comparative study of spectral preprocessing and unmixing methods. Remote Sensing, 12(11). doi:10.3390/rs12111723.
- [38] Jelinek, R., Omura, H., Morita, K., Nagasawa, T., & Kubota, T., 2002. Mechanical properties and behaviour of soils under the triaxial test, the Yamauchi landslide, Japan. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 61(3), 207–212. doi:10.1007/s10064-002-0159-0.
- [39] Ozbay, A., & Cabalar, A. F., 2016. Effects of triaxial confining pressure and strain rate on stick-slip behavior of a dry granular material. Granular Matter, 18(3), 1–9. doi:10.1007/s10035-016-0664-7.

- [40] Bjerrum, L., 1954. Theoretical and experimental investigations on the shear strength of soils. Ph.D. Thesis, Swiss Federal Institute of Technology, Zürich, Switzerland.
- [41] Zhu, E., & Wang, S., 2019. Modeling Confined Compression on Structured Soils. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 371(2), 22091. doi:10.1088/1755-1315/371/2/022091.
- [42] Silva, I. N., Indraratna, B., Nguyen, T. T., & Rujikiatkamjorn, C., 2022. Shear behaviour of subgrade soil with reference to varying initial shear stress and plasticity index. *Acta Geotechnica*, 17(9), 4207–4216. doi:10.1007/s11440-022-01477-w.
- [43] Brooker, E. W., & Ireland, H. O., 1965. Earth Pressures at Rest Related to Stress History. *Canadian Geotechnical Journal*, 2(1), 1–15. doi:10.1139/t65-001.
- [44] Chandler, R. J., & Nicholls, R. A., 1973. Discussion: Lias clay: Weathering processes and their effect on shear strength. *Geotechnique*, 23(1), 131–133. doi :10.1680/geot.1973.23.1.131.
- [45] Yin, Z. Y., Xu, Q., & Hicher, P. Y., 2013. A simple critical-state-based double-yield-surface model for clay behavior under complex loading. *Acta Geotechnica*, 8(5), 509–523. doi:10.1007/s11440-013-0206-y.
- [46] Hamidi, A., Tourchi, S., & Khazaei, C., 2015. Thermomechanical Constitutive Model for Saturated Clays Based on Critical State Theory. *International Journal of Geomechanics*, 15(1), 4014038. doi:10.1061/(asce)gm.1943-5622.0000402.
- [47] Rampello, S., Viggiani, G. M. B., & Amorosi, A., 1997. Small-strain stiffness of reconstituted clay compressed along constant triaxial effective stress ratio paths. *Geotechnique*, 47(3), 475–489. doi:10.1680/geot.1997.47.3.475.
- [48] Carey, J. M., & Petley, D. N., 2014. Progressive shear-surface development in cohesive materials; implications for landslide behaviour. *Engineering Geology*, 177, 54–65. doi:10.1016/j.enggeo.2014.05.009.
- [49] Yin, J., Zhang, K., Geng, W., Gaamom, A., & Xiao, J., 2021. Effect of initial water content on undrained shear strength of K0 consolidated clay. *Soils and Foundations*, 61(5), 1453–1463. doi:10.1016/j.sandf.2021.08.010.
- [50] Abdelhamid, M. S., & Krizek, R. J., 1976. At-Rest Lateral Earth Pressure of Consolidating Clay. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 102(7), 721–738. doi:10.1061/ajgeb6.0000295.
- [51] Mesri, G., & Hayat, T. M., 1993. The coefficient of earth pressure at rest. *Canadian Geotechnical Journal*, 30(4), 647–666. doi:10.1139/t93-056.
- [52] Qiu, Z., Wang, J., Chen, Y., Yang, Y., & Li, Y., 2020. Effects of periodic saturation on K0 for a sandstone-mudstone particle mixture. *Marine Georesources & Geotechnology*, 38(7), 867–875. doi :10.1080/1064119X.2019.1637486.

- [53] Flavigny E., 1978, Trois aspects des propriétés mécaniques des sols, Thèses D.S. Uni. De Grenoble 1978.
- [54] Massarsch K.R., 1979, Lateral earth pressure in normally consolidated clay, Proc. 7eme ECSMFE Brighton 2, d12, 245-249.
- [55] Jacky J., 1944, The coefficient of earth pressure at rest, J. of the society Hungarian architects an engineer's Budapest, 355-358
- [56] Mayne P.W., Kulhawy F.H., 1982, K_0 – OCR relationships in soil, J. Geotech. Engng. Div. ASCE, Vol. 108, GT6, 851-872.
- [57] Skempton A. W., Delory, F.A., 1957, Stability of natural slopes in London clay, Compte rendu du 4eme congrès international de mécanique des sols et des travaux de fondations, Londres, Vol.2, 378.
- [58] Peck R.B., Reed W.C., 1954, Engineering properties of Chicago subsoils, University of Illinois, Bulletin 423, vol.51, N°44.
- [59] Alhayari M., 1989, Une détermination des caractéristiques mécaniques résiduelles des versants naturels : Méthodes à l'équilibre limite et des éléments finis. Thèse de Doct., Univ. Joseph Fourier, Grenoble I, 214
- [60] Bjerrum L., 1954, Theoretical and experimental investigation on the shear strength of soils, Norwegian Geotechnical Institute Publication N°.5, Oslo, Norway.
- [61] Hvorslev M. J., 1937, Uber die festigkeitseigenschaften gestorter bindiger boden, Ingeniorvidenkabelige Skrifter, ser.A, 35 samfund Copenhagen.
- [62] Rowe, P.W., 1958, General report on papers in section 1, Proceedings of the Brussels Conf on Earth Pressure Problems, Brussels, Belguim, Vol.3, 25-30.
- [63] Biarez J., Favre J.L., 1972 : " Corrélations de paramètres en mécanique des sols ", Table Ronde Nationale, Ecole Centrale Paris, 292p.
- [64] Plaxis 3D, 2021, Logiciel spécialisé dans la modélisation géotechnique numérique et l'analyse par éléments finis, par l'Université de Technologie de Delft, aux Pays-Bas.
- [65] Bishop A.W., 1967, Progressive failure with special reference to the mechanism causing it, Proc. Geotechnical Conf. Oslo., II, 3-10.
- [66] Skempton A. W., 1964, Long term stability of clay slopes, Géotechnique, Vol. 14, 77-101.
- [67] Terzaghi, K. and Peck, R.B. 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice, Mc Graw-Hill, New York.

- [68] Skempton A.W., Hutchinson G., 1969, Stability of natural slopes and embankment foundation, State of art report, 291-340
- [69] Hansen A., 1984. Landslide hazard analysis. In: Brunsten D., and Prior D.B., (Editors), Slope stability. Wiley, New York, pp 523-602.
- [70] Varnes D.J. and Commission on Landslides and Other Mass-Movements-IAEG, 1984. Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. Naturel Hazards N° 3, The Unesco Press, Paris, 63 pp.
- [71] Mascarelli, D, 1994, Ingénierie des pentes instables ; Approche orientée structuration de la connaissance. These de doctorat INSA pp 1-204.
- [72] Bonham-Carter,G.F. 1994, Geographic Information System for Geoscientists: Modelling with GIS, Pergamon,pp370-381.
- [73] Carrara, A., 1988. Landslide hazard mapping by statistical methods. A black box approach. Workshop on Natural Disasters in European Mediteranean Countries, Perugia, Italy, p. 205-224.
- [74] Crozier, M. J., 1986. Landslides: Causes, Conséquences and environment. Croom Helm, London.
- [75] Kienholtz,H., 1992. Slow mass movement of soil in the different climatic et altitudinalzones. 27th Int Geogr Congress Washington pp283-293.
- [76] Van Westen, C. J., 1993, GISSIZ – Training Package for Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation: ITC publication Nr. 15, vol.2, Enschede,245.
- [77] Stevenson, P.R, 1977, An empirical method for the evaluation of relative landslip risk. Bull. IAEG 16. pp 69-72.
- [78] Brabb, E.E; Pampeyan, E.H; Bonilla,M.G., 1999. Landslide susceptibility in San Mateo Country, California. US Geol. Surv. Misc. Field Studies Map MF 360 scale 1:62.500.
- [79] Carrara A., Cardinali M., Guzzetti F., 1992. Uncertainty in assessing landslide hazard and risk. ITC Jour., v. 1992:2, 172-183.
- [80] Neuland, H., 1976. A predictive model of landslip. Catena, vol. 3, p. 215-230.
- [81] Baeza, C. and J. Corominas 1996. Assessment of shallow landslide susceptibility, by means of statistical techniques. Proceedings of the Seventh International Symposium on Landslides, Trondheim, Norway, June 17-21, vol. 1, p. 147-152.
- [82] Mulder,H.F.H.M., 1991, Assessment of landslide hazard. Nederlandse Geografische Studies. PhD Thesis, University of Utrecht, pp150.

- [83] Clouatre, H, 1994, Delimitations des zones à risque de glissement par intégration des données multisources dans un SIG : region de Hult-Gatineau. Mémoire de M.Sc. Département de Géographie et télédétection, Université de Sherbrooke 76p.
- [84] Sabto, M., 1991, Probabilistic modelling applied to landslides in Central Columbia using GIS procedures Unpublished M.Sc thesis ITC, Enschede, The Netherlands, pp26.
- [85] Gonzalez, A. J. 1992, Avalanche risk evaluation at Utica (Columbia). Proc. 1er Simposio Internacional sobre Sensores Remotos y Sistemas de Informacion Geografica (SIG) para el Eustudios de riesgos Naturales, Bogotos, Colombia, pp356-378.
- [86] Runqui, H.Y, Yuanguo, L., 1992, Logical message model of slope stability prediction in the Three Gorges reservoir area, China Proc 6th Int. Symp on Landslides, Christchurch, New Zealand, vol 2 pp 977-981.
- [87] Lerouiel, S. Vaunat, J. Picarelli, L. Locat, J. Lee, H. et Faure, R., 1996. Geotechnical Characterization of Slope Movements. 7th Int Symp on Landslides, Trondheim, Vol I; 53-74.
- [88] Ward, T.J., Ruh-Ming, Liy Simons, D.B, 1982, Mapping landslide hazards in forest watershed. Journal of Geotech Engin Divi, Proc of the Amer Society of Civil Engi, Vol 108, N° GT2, pp 319-324.
- [89] Brass, A; Wadge, G; Reading, A.J., 1989, Designing a geographical Information System for the prediction of landsliding potential in the West Indies. Proceeding Economic Geology and Geotechnics of Active Tectonic Regions. University College London. pp13.
- [90] Murphy, W.Y. Vita-Finzi, C, 1991, Landslides and seismicity: an application of remote sensing. Proc. 8th. Thematic Conference on Geological Remote Sensing (ERIM), Denver, Colorado, USA, Vol.2, pp 771-784.
- [91] Okimura, T. Y, Kawaytani, T, 1986, Mapping of the potential surface- failure sites on granite mountains slopes En.V. Gardiner (Editor), International Geomorphology. Part 1. Wiley, New-York, pp 121-138.
- [92] Burrough, P.A, 1992, The development of Intelligent Geographical Information System. Int. Journal. Geogra. Information. System Vol 6 N°1 pp 1-11.
- [93] Aronoff S., 1989. Geographic Information Systems: a management perspective. WDL Publications, Ottawa, 294 pp.
- [94] R. Prélaz-Droux, 1995, Systeme d'Information et Gestion du territoire : Approche Systémique et Procedure de Realisation, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1995.

- [95] R. Tomlinson et B. B. Petchenik, 1988, Reflections on the Revolution: The Transition from Analogue to Digital Representations of Space 1958-1988, *The American Cartographer*, vol. 15, n° 13, pp. 243-334.
- [96] J. T. Coppock et DW. Rhind, 1991, The History of GIS in Maguire et al: *Geographical Information Systems*, Longman Scientific & Technical, pp. 21-43, 1991.
- [97] Chakhar 2006, *Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation informatique*, Université Paris Dauphine-Paris IX.
- [98] Malczewski, Jacek, 1999, *GIS and multicriteria decision analysis*, John Wiley & Sons, 0471329444.
- [99] Saaty, T. L., 1977. A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology* 15(3):59–62.
- [100] Saaty, T. L., Vargas, L.G., 1991. *Prediction, Projection, and Forecasting: Applications of the Analytical Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games, and Sports*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [101] Achour, Y., Boumezbeur, A., Hadji, R., Chouabbi, A., Cavaleiro, V., Bendaoud, E. A., 2017. Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arabian Journal of Geosciences*, 10(8), 194.
- [102] Meng, Q., Miao, F., Zhen, J., Wang, X., Wang, A., Peng, Y., Fan, Q., 2016. GIS-based landslide susceptibility mapping with logistic regression, analytical hierarchy process, and combined fuzzy and support vector machine methods: a case study from Wolong Giant Panda Natural Reserve, China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 75(3), 923-944.
- [103] Kayastha, Prabin, Dhital, Megh Raj, De Smedt, Florimond, 2013, Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: A case study from the Tinau watershed, west Nepal, *Computers & Geosciences*, V 52, 398-408, 0098-3004.
- [104] Saaty, T. L., 1980. *The analytical hierarchy process, planning, priority. Resource allocation*. RWS publications, USA.
- [105] Dai, F. C., & Lee, C. F., 2002. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. *Geomorphology*, 42(3-4), 213-228.
- [106] Yalcin, A., Reis, S., Aydinoglu, A. C., Yomralioglu, T., 2011. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. *Catena*, 85(3), 274-287.

- [107] Durand Delga, M., 1955. Étude géologique de l'Ouest de la chaîne numidique. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 2ème série, (24), 533.
- [108] ArcGIS Pro, 2019, Logiciel pour la gestion, l'analyse et la visualisation de données géospatiales. Développé par la société Esri (Environmental Systems Research Institute).
- [109] DEM, 2023, (MNE, Modèle Numérique d'Élévation) : Agence spatiale telle que la NASA, OpenStreetMap (OSM).
- [110] Shahabi, Himan, Keihanfard, Soroush, Ahmad, Baharin Bin, Amiri, Mohammad Javad Taheri, 2014, Evaluating Boolean, AHP and WLC methods for the selection of waste landfill sites using GIS and satellite images, Environmental Earth Sciences, 71, 4221-4233, 1866-6280.
- [111] NASA, 2023, POWER Data Access Viewer. POWER (Prediction of Worldwide Energy Resource) Données sur les ressources énergétiques mondiales basées sur des observations satellitaires et des modèles climatiques.
- [112] Yalcin, A., 2008. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): comparisons of results and confirmations. Catena, 72(1), 1-12.
- [113] El Jazouli A., 2019, Barakat A., Khellouk R., GIS-multicriteria evaluation using AHP for landslide susceptibility mapping in Oum Er Rbia high basin (Morocco), Geoenvironmental Disasters, 1, 2197-8670,
- [114] Landsat 8, 2023, géré conjointement par la NASA (National Aeronautics and Space Administration) et l'USGS (United States Geological Survey).