

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTEMENT AMENAGEMENT

Thèse de Doctorat

Option
Aménagement Urbain

Soutenue par

Abdallah SAIHIA

**Intervention de la Géodésie Classique et
Perspective de la Géodésie Spatiale dans les
Mesures des glissements de terrain dans la ville
de Constantine (Est Algérien).**

Devant le jury

Président :	Yazid HADIDANE	MC	Univ. Annaba
Directeur :	Kaddour BOUKHEMIS	Pr.	Univ. Annaba
Examineurs :	Michel KASSER	Pr.	ENSG-IGN Paris (France)
	Yacine SPIGA	MC	Univ. Annaba
	Kamel KHANCHOUL	MC	Univ. Annaba

REMERCIEMENTS

A mon directeur de thèse, le Professeur Kaddour BOUKHEMIS pour avoir accepté de diriger mon travail de recherche, surtout pour sa simplicité de prendre les choses et pour ses conseils.

A Monsieur le codirecteur de thèse, Professeur Michel KASSER, Directeur de l'ENSG - IGN Paris dont j'admire l'acte qu'il possède de présenter les choses clairement et de ne rien négliger d'un sujet qu'il aborde. C'est sous ses conseils que je me suis engagé dans cette voie. Il m'a permis de transformer en réalité le rêve d'une thèse dans le domaine passionnant de la haute résolution angulaire. Je le remercie d'avoir toujours manifesté toute son attention ; je lui exprime ici toute ma gratitude.

Je remercie le Chef de Département, Mr Abdelrezzak OULARBI pour sa collaboration administrative dans mes demandes de travail.

Je remercie Mr Yacine SPIGA pour m'avoir orienté sur les sites de glissement tout au début de mon travail.

Je remercie également le Chef de Service Topographique du Cadastre, Antenne régionale de Constantine pour son aide à la recherche de points géodésiques que j'ai utilisé sur chaque site.

Je remercie Mr BENCHIHEUB, Directeur régional du C.T.C Constantine et Mr BOURAIYOU, chef du laboratoire du C.T.C. pour tous leurs conseils et recommandations.

Enfin, je remercie vivement tous les membres de jury de thèse pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail.

DEDICACE

Je dédie ce travail à mes très chers parents qui avaient aimé que tous leurs enfants soient bien instruits et à mes enfants en leur souhaitant d'aimer la science et de poursuivre leurs études le plus loin possible.

<u>TABLE DES MATIERES</u>	
RESUME	
REMERCIEMENTS	
DEDICACE	
INTRODUCTION GENERALE	1
PREMIERE PARTIE : PRESENTATION DU CADRE GENERAL DE L' AIRE D' ETUDE	7
Le climat	9
Configuration du relief	11
Les causes humaines	11
Identification des sites glissants dans et en dehors de la ville de Constantine	11
Etapes du phénomène de glissement de terrain	16
Identification des processus en jeux dans le déclenchement et l'accélération des glissements de terrain	20
DEUXIEME PARTIE : ETUDE DU CADRE GEOLOGIQUE	22
Aperçu Géologique	23
Cartographie géologique des sites instables	24
Coupe géologique	26
Le Mio-pliocène	26
Les dépôts récents quaternaires	27
TROISIEME PARTIE : ETUDES DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES SITES INSTABLES	31
Introduction à l'étude géotechnique : Variation des propriétés mécaniques du terrain	32
Caractéristiques géotechniques des sites instables	34

Analyse granulométrique	34
Analyse minéralogique	36
Limites d'Atterberg	37
Indices de glissements	39
Essai inclinométrique	43
L'inclinométrie	43
Domaine d'application	43
Principe de mesure	44
Estimations périodiques	48
Conclusion	51
QUATRIEME PARTIE : ESSAI DE MESURE DE L'INSTABILITE DES TERRAINS PAR LA GEODESIE	52
Mesures de l'instabilité par la géodésie	53
Méthodes de calculs	53
Principe de la méthode du relèvement	56
Principe de la méthode de l'intersection	57
Observations de terrain	60
Détermination du nombre de lectures	60
Détermination de l'échantillonnage	61
Choix de l'instrument de mesure	61
Calculs statistiques	64
Prise de l'échantillon topographique	64
Représentation des observation	65
Tableau de calcul des éléments statistiques	66

Calcul des éléments statistiques	67
Moyenne arithmétique de l'échantillon	67
Variance de l'échantillon	67
Loi normale	67
Niveau de confiance	67
Intervalle de confiance	68
Détermination de la taille de l'échantillon	68
Application de l'erreur moyenne quadratique	69
Construction de la courbe de Gauss	70
Valeurs angulaires horizontales par le graphe	70
Etudes géodésiques des glissements	71
Présentation de la fiche signalétique de chaque site	71
Site de Bardo	71
Observations de terrain	72
Situation de la station d'observation	73
Récapitulatif des observations angulaires azimutales	74
Récapitulatif des calculs de coordonnées	74
Graphe de déplacement du point de station	75
Photographies du site instable	77
Site de Ben Zekri (5 Juillet)	80
Observations de terrain	80

Situation de la station d'observation	81
Récapitulatif des observations angulaires azimutales	81
Récapitulatif des calculs de coordonnées	82
Graphe de déplacement du point de station	83
Photographies du site instable	85
Site de Belle Vue	87
Observations de terrain	87
Situation de la station d'observation	88
Récapitulatif des observations angulaires azimutales	89
Récapitulatif des calculs de coordonnées	89
Graphe de déplacement du point de station	90
Photographies du site instable	90
Conclusion Générale	96
Recommandations	98
CINQUIEME PARTIE : PERSPECTIVES, LA GEODESIE SPATIALE	106
Généralités	107
Présentation des méthodes de surveillance	108
L'interférométrie radar	113
L'interférométrie	113
Le radar	114
Le Radar à Synthèse d'Ouverture ou (S.A.R.)	115

Techniques utilisées	116
Propriétés de l'amplitude de l'image radar	118
Mesure des déplacements	120
Détection des déplacements	121
Domaine d'application	121
Les avantages	121
Conclusions	122
LE GPS (Global Positionning System)	124
Définition	124
Principe	125
Les différents récepteurs GPS et mode de mesure	128
Les avantages	131
L'intérêt du GPS	132
Les satellites	133
Méthode différentielle	135
CONCLUSION GENERALE	138
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	140
ANNEXE	146
LISTE DES FIGURES	172
LISTE DES TABLEAUX	174

INTRODUCTION GENERALE

L'objet d'étude du présent travail est l'étude du glissement de terrain qui représente l'un des six types de catastrophes naturelles (éruption volcanique, cyclone, séisme, sécheresse, glissement de terrain, inondation).

Le terme « catastrophe » exprime un évènement brutal, d'origine naturelle ou humaine, ayant la mort et la destruction à grande échelle pour conséquence. Parmi les désastres les plus meurtriers du 20^{ème} siècle, on pourrait citer le glissement de terrain qui a fait 12 000 morts en URSS en 1949. (Banque Mondiale, CRED). Mais bien sûr, tous les glissements de terrain n'ont pas autant d'effets catastrophiques. En effet, le glissement de terrain est un mouvement d'une masse de terrain d'épaisseur et d'extension variable le long d'une surface de rupture. L'ampleur du mouvement, sa vitesse et le volume de matériaux mobilisé varie considérablement dans l'espace et dans le temps. Aussi, un glissement de terrain pourrait affecter un versant sur quelques mètres, comme sur plusieurs dizaines de mètres voire sur la centaine de mètre.

En terme de vitesse, le glissement est un déplacement généralement lent mais un évènement naturel exceptionnel (des pluies torrentielles successives par exemple) ou les actions humaines peuvent l'accélérer. Des indices caractéristiques peuvent être observés dans les glissements de terrain actifs : niche d'arrachement, fissures, bourrelets, arbres bousculés, zone de rétention d'eau, etc.

S'il est impossible de lutter contre les forces de la nature, l'homme a la capacité de développer les moyens et les techniques pour diminuer leurs impacts négatifs. En 2007, les connaissances scientifiques et technologiques permettent de connaître les processus en oeuvre, de mesurer l'ampleur du glissement, de suivre dans le temps la dynamique des terrains, et par voie de conséquence d'aider à mettre en place des stratégies d'approches et d'intervention efficace.

Actuellement il existe des méthodes très modernes, rapides et moins coûteuses qui permettent le suivi de la dynamique des terrains ; ce sont les mesures par la Géodésie Spatiale (GPS, IRSP, SLR). Le **GPS** à mesures de précision, l'Interférométrie Différentielle appelée aussi **IRSP** (Interférométrie Radar Satellitaire de Précision) et le **SLR** (Satellite Laser Ranging) sont des méthodes qui peuvent couvrir de très grandes surfaces allant de quelques hectares à des milliers d'hectares, cela dépend de l'intérêt de la mesure. Ainsi, une périodicité de mesures trimestrielles suffit pour suivre l'évolution des glissements de terrain des zones en question, que ce soit pour le GPS ou pour l'Interférométrie pour les prises d'images de toute la région ou des zones.

L'intérêt de mieux comprendre les origines et les conséquences des glissements et d'affiner la mesure est d'orienter la réflexion comme les actions et les actes sur les moyens et techniques pouvant être préconiser pour atténuer les risques de glissement de terrain, et donc de minimiser les dégâts humains et matériels. L'affinement de la connaissance sur la thématique aidera la réflexion sur les ouvrages de

protection, sur les normes de constructions, sur les mesures réglementaires et sur le partage des responsabilités.

S'inscrivant dans cette problématique générale, l'objectif principal de la thèse est la production d'un travail d'application et donc à caractère technique, qui mette en évidence les apports des techniques de positionnement à l'étude des glissements de terrain. Il repose sur le développement et l'application la géodésie spatiale pour localiser et mesurer l'ampleur des glissements de terrain en zone urbaine en liaison avec les propriétés topographiques, climatiques, géologiques, géotechniques et géodésiques. L'identification des processus mis en jeu pour le déclenchement et l'accélération des glissements de terrain suppose une approche multiparamétriques basée sur les données GPS, inclinométriques.

Il se veut, donc, une contribution à l'amélioration dans la qualité et la quantité d'informations sur les glissements de terrain en zone urbaine.

Le champ d'application concerne la ville de Constantine. La ville de Constantine occupe des terrains caractérisés par des affleurements de roches meubles majoritairement tendres dans les catégories des argiles priaboniennes des nappes telliennes, des glacis anciens, des tufs hydrothermaux du quaternaire, des argiles et des marnes gypsifères du miopliocène et du calcaire pélitique du trias des nappes néritiques constantinoises.

Constantine est une ville réputée pour ses glissements de terrain. Depuis plus d'une trentaine d'années, la ville de Constantine, 3^{ème}

ville d'Algérie et située dans la région Nord-Est Algérien, a connu épisodiquement d'importants glissements de terrain causant d'importants dégâts humains et matériels. Les sites classés comme instables représentent une étendue d'environ 195 ha (soit 3.9% de la superficie totale de la ville) et exposent plus de 100 000 habitants (ONS), l'équivalent à environ de 15.38 % de la population totale de la ville.

L'instabilité de ces sites ne s'est nettement déclarée que durant les années 1970-1980.

L'étude de l'instabilité à l'échelle locale repose sur celle de trois (03) sites de Constantine : le Bardo, Ben Zekri (Cité du 05 Juillet) et Bellevue. Les observations sur terrain ont permis de mettre en évidence que la dynamique des terrains est plus importante en périodes humides qu'en périodes sèches. La présence et l'action de l'eau des pluies ne constituent que l'une des causes du déclenchement et de l'accélération des glissements de terrain.

La complexité des sols argileux, leur pouvoir de saturation, l'altération des roches et leur dégradation rapide par les eaux d'infiltration dans ces zones sont autant de facteurs favorables au déclenchement et à l'accélération des glissements de terrain.

L'action humaine constitue une autre cause de l'instabilité. En effet, durant les travaux de terrassements des grands projets (routes, institut islamique, lotissements, etc.), d'importants mouvements de terre ont été provoqué dans les secteurs de fortes pentes.

La ville de Constantine fait face à d'importants problèmes d'aménagement. La délimitation finale des terrains instables par glissements n'est pas encore finalisée. Cela signifie que la question de l'instabilité des terrains à Constantine mérite une attention toute particulière. Car la ville de Constantine, la métropole de l'Est, est d'une part, un lieu de très forte concentration démographique ; et d'autre part un creuset de culture et d'histoire. Aussi, elle représente un riche patrimoine historique, architecturale et culturel qu'il faut impérativement sauvegarder.

La question des glissements de terrain à Constantine a été développée en cinq (05) grandes parties. Les trois (03) premières parties sont consacrées à la présentation des cadres topographique, climatique, géologique et géotechnique. La quatrième partie est présente les études géodésiques des glissements. Quant à la cinquième partie, elle s'ouvre sur les perspectives sur la géodésie spatiale.

Aussi, la prise en charge de la question des glissements de terrain suppose au préalable l'établissement d'une cartographie précise des sites qu'il faille sans cesse actualisée et un suivi permanent et une surveillance par auscultation avec la détermination d'une dynamique périodique. Pour une délimitation plus précise des sites vulnérables, il y a lieu de mettre en place une équipe de techniciens de différentes spécialités qui aura pour tâche de délimiter les zones de glissements et la détection de nouveaux sites.

L'ampleur de ce risque géotechnique est amplifiée en zone urbanisée. Par conséquent, une stratégie visant la prévention du risque géotechnique lié aux glissements de terrain dans la région de Constantine s'impose. Sa mise en œuvre suppose la volonté politique d'agir et de mettre les moyens humains, matériels, techniques, et réglementaires nécessaires. Par exemple, une commission pourrait intervenir au niveau de la Direction de l'Urbanisme, de la Construction et de l'Habitat (DUCH) pour contrôler et interdire la délivrance des permis de construire sur des terrains jugés à risques. La composition de ladite commission serait pluridisciplinaire, à savoir géologue, géotechnicien, hydrogéologue, mécanicien de sol, ingénieur génie civil, ingénieur en voiries et réseaux divers etc.

PREMIERE PARTIE

PRESENTATION DU CADRE GENERAL DE L'AIRE D'ETUDE

En terme de position géographique, la ville de Constantine (Nord- Est de l'Algérie) au niveau de la cité El Koudiat est définie par les différents types de coordonnées suivants (Fig. 1) :

-les coordonnées géographiques :

6° 32' Est 36°22' Nord,

-correspondant aux coordonnées UTM fuseau 32

X = 285,600 km

Y = 4026,600 km,

-correspondant aux coordonnées UTM fuseau 31

X = 823,750 km

Y = 4030,000 km,

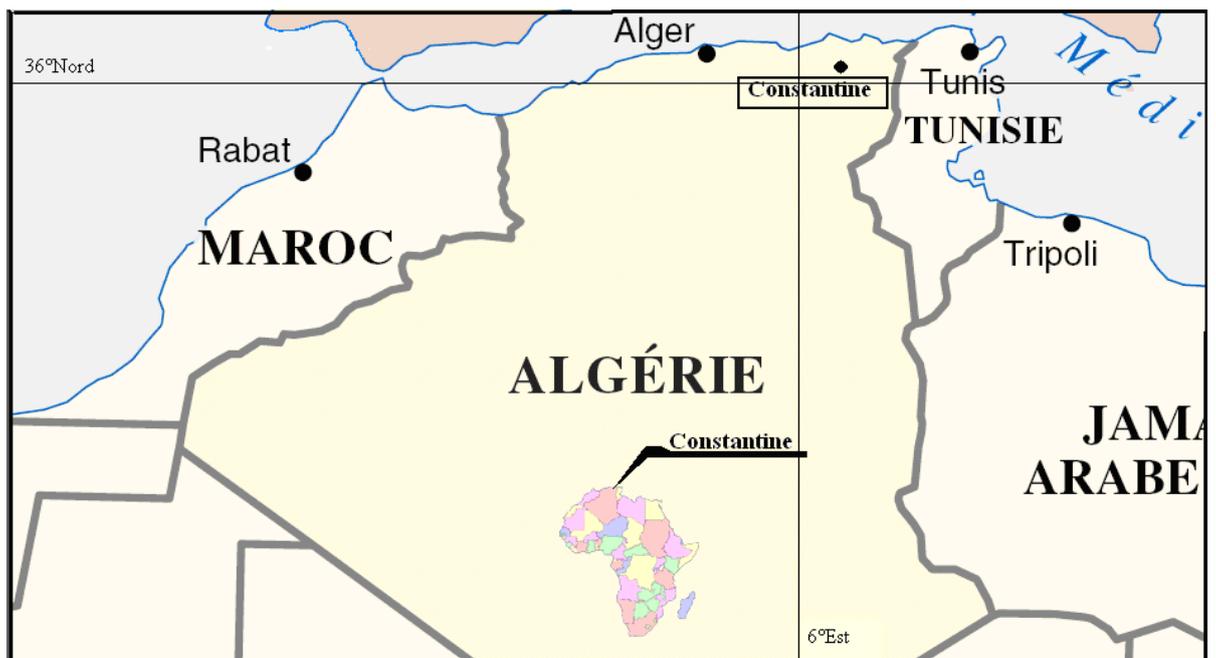
-correspondant aux coordonnées LAMBERT Nord Algérie

X = 851,050 km

Y = 348.100 km,

-avec une altitude atteignant le niveau de 630m.

Fig. 1 : Situation de la ville de Constantine



Elle est située sur des terrains instables, accidentés et néotectoniques. A l'échelle de la ville de Constantine, de nombreuses habitations ont été endommagées par les glissements de terrain. En effet, l'agglomération urbaine de Constantine s'étend sur 5000 ha dont environ 195 ha sont déclarés terrains instables. En terme de volume de population, la zone urbaine regroupe en 2005 selon l'ONS (Office National des Statistiques) approximativement 650 000 habitants dont plus de 100 000 sont exposés au risque de glissement de terrain.

Parmi les causes naturelles des glissements de terrain, il y a lieu de citer le climat et la topographie auxquels s'ajoutent les causes humaines (causes liées à la réalisation des grands chantiers industriels et des programmes de logements et d'équipements structurants). Des signes précurseurs de l'instabilité des terrains datent des années 1966-1970

LE CLIMAT

Le climat joue un rôle essentiel dans le déclenchement et l'accélération des glissements de terrain ; et notamment les grandes variations dans la quantité d'eau que reçoit le sol durant une saison et la durée de la période sans eau pour avoir un cycle périodique d'humidification et de sécheresse des sites en mouvement, tout en sachant que l'infiltration de l'eau dans le sol est la cause principale du glissement.

La région est soumise à un climat semi-aride, avec deux saisons bien distinctes. La première, froide et humide, débute au mois de Décembre

et va jusqu'au mois d'Avril. La seconde, une saison chaude et sèche, commence dès le mois de Mai et se prolonge jusqu'à la fin novembre.

La pluviométrie moyenne annuelle est de 530 mm pour les 35 dernières années. Mais à une sécheresse marquée durant la décennie 1983-1993, se sont succédées des années durant lesquelles les conditions météorologiques ont été particulières : pour la période 1993-2003, il a été enregistré des moyennes saisonnières de 733mm par an, une hauteur largement supérieure à celle de la décennie précédente (Tab.1a, 1b, 1c, et 1d).

Tab 1: Données climatiques , Station Ain el Bey, 1970-2004

1a : Précipitations moyennes mensuelles

mois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	jun	juil	aoû
mm	33.13	39.41	58.63	83.65	69.9	58.4	55.3	50.42	40.07	18.66	6.94	10.12

1b Précipitations moyennes saisonnières

Saisons	Hiver	Printemps	été	Automne
Pluviométrie mm	211.95	149.79	35.72	131.17

1c: Temperature moyenne mensuelle

mois	sep	oct	nov	dec	jan	fev	mar	avr	mai	jun	juil	aoû
t°	24.19	19.84	14.98	10.10	8.96	11.51	14.17	16.06	19.76	26.56	30.88	29.41

1d: Temperature moyenne saisonnière

Saisons	Hiver	Printemps	été	Automne
Température moyenne t°	10.19	16.66	28.95	19.67

Source ANRH Constantine, Agence Nationale des Ressources Hydriques .

L'ampleur des mouvements a augmenté après les périodes de retour des précipitations durant l'année 1993 à l'année 2005 (Benaissa A., 1998).

CONFIGURATION DU RELIEF

Les sites de glissement correspondent à des terrains à relief dont les valeurs de pentes sont comprises entre 25 % et 45%. On en conclut que la forme et surtout la vigueur du relief contribue à cette instabilité.

LES CAUSES HUMAINES

Aux causes naturelles s'ajoutent les causes liées aux actions d'aménagement et des actes humains. Par exemple, les fuites d'eau provenant de l'endommagement par vétusté et par dynamique du sol des réseaux enterrés de l'assainissement et de l'eau potable ont favorisé la saturation des surfaces inter-couches jusqu'à la perte de cohésion du sol, et ont accéléré la vitesse des glissements de terrain.

IDENTIFICATION DES SITES INSTABLES DANS ET EN DEHORS DE LA VILLE DE CONSTANTINE

A l'échelle de l'agglomération de Constantine, il est recensé neuf (09) sites de glissement de terrain actif dont la quasi-totalité est située du côté ouest de l'oued Rhumel (Spiga Y.2001 ; Fig. 2). A l'extérieur de l'agglomération, d'autres sites ont été repérés. Mais, notre étude ne portera que sur 3 (trois) des ces sites (Fig. 3).

Parmi les sites de glissement de terrain actifs intra-muros sont :

Cite Belouizded (Saint Jean)

Cite Belle Vue et l'institut islamique

Cité Djamel Abdenacer (Cilloc)

Le quartier de Bardo particulièrement les anciens abattoirs

Cité Benchergui

Cité Boudraa

Cité Zaouch

Une partie de la cité du 5 Juillet cité (Ben Zekri)

Cité Boussouf

Quant aux sites de glissement de terrain actifs extra-muros, ils s'observent au niveau du tronçon de l'autoroute MASSINISSA, de Ain Smara à Ain el Bey (Aéroport Mohamed Boudiaf). Cette instabilité du sol, témoignée par la formation de fissures d'ordre centimétrique, a été remarqué lors des travaux datant d'avant 2002. L'estimation de l'ampleur de ce risque a reposé sur les reconnaissances de terrain effectuées en Novembre 2004, en Janvier 2005 et en Mars 2005 (Fig. 4).

Fig. 2 : Sites de glissement de terrain actif de la ville de Constantine

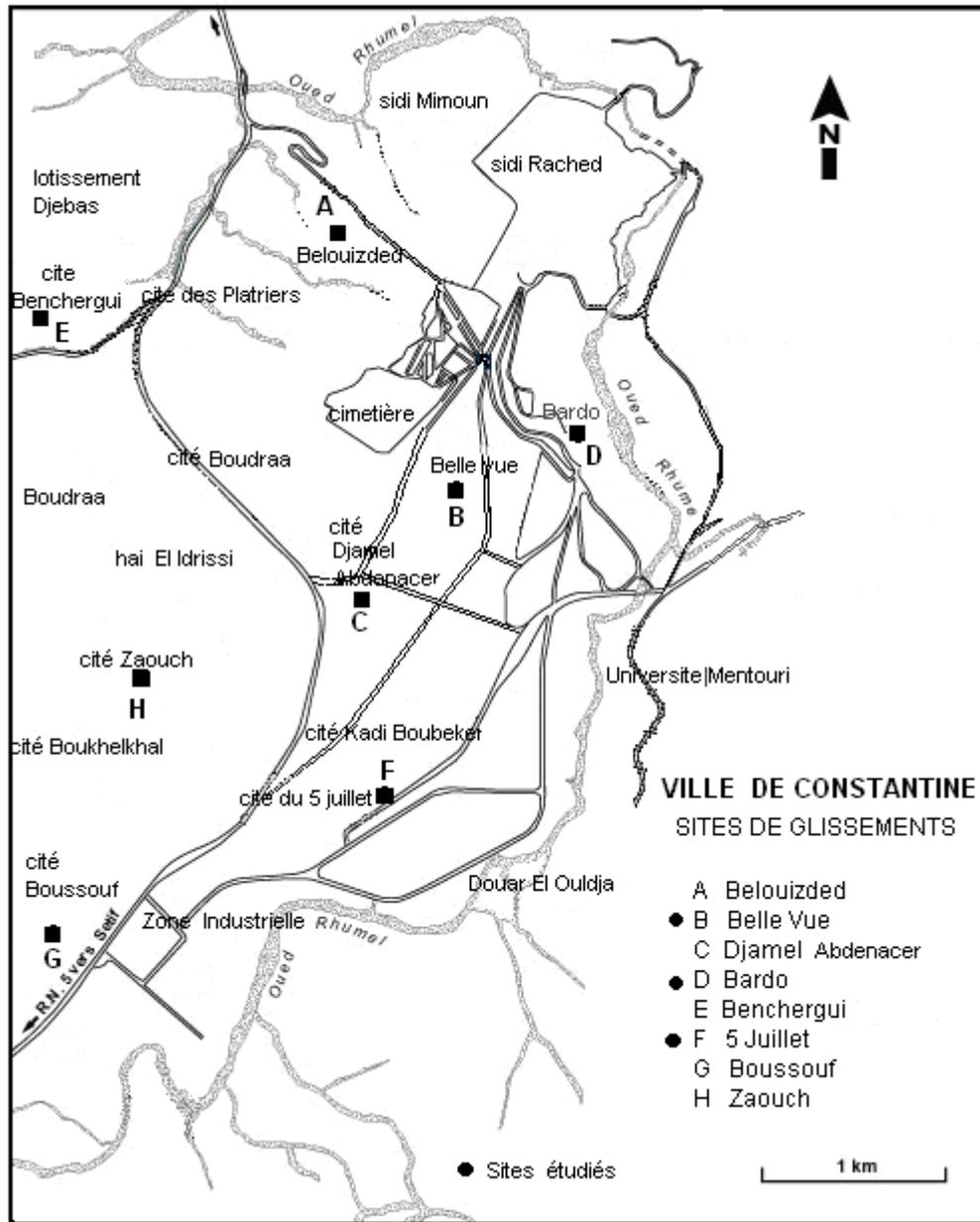
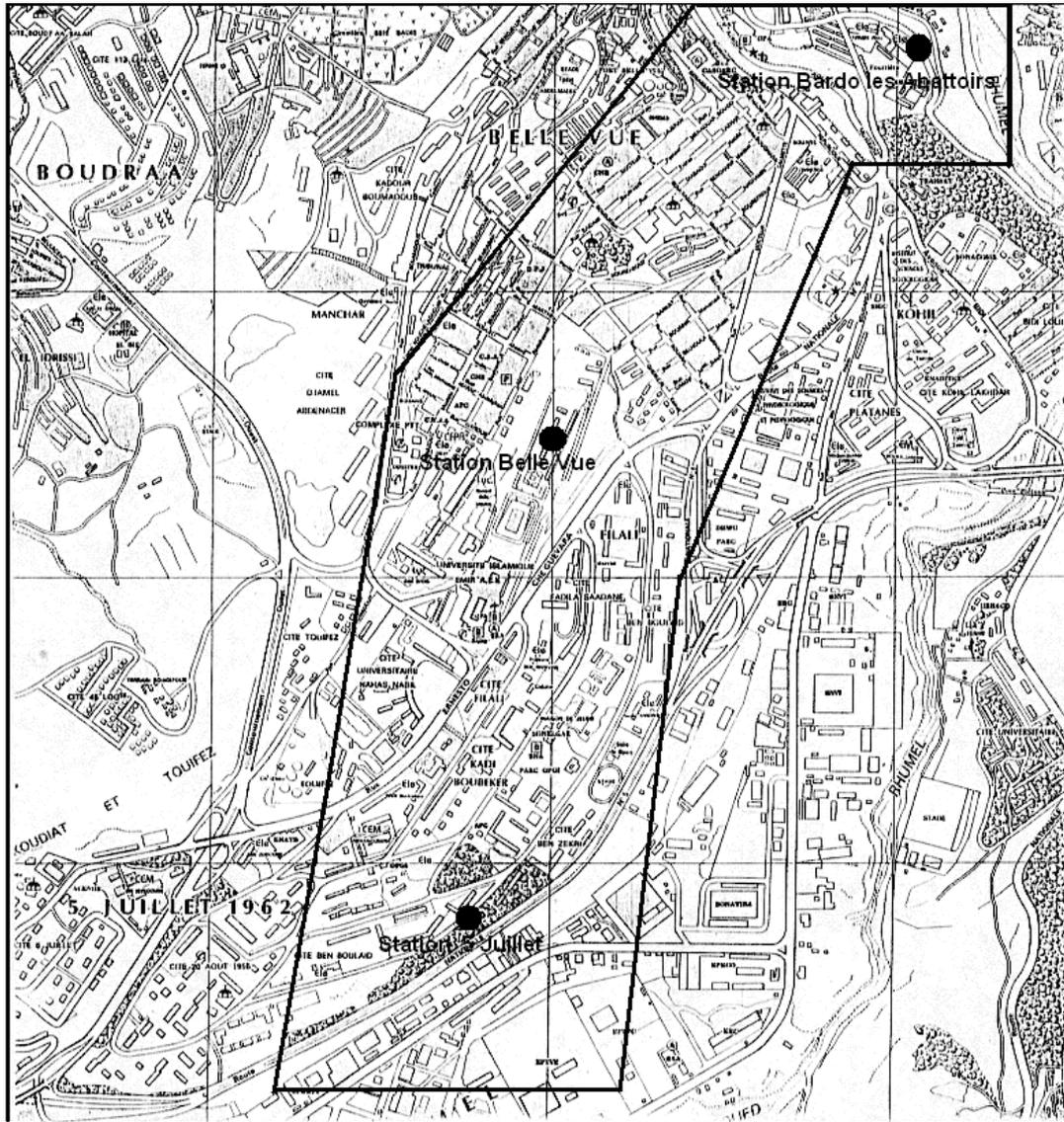


Fig. 3 : Localisation des sites de glissements étudiés



● Stations de mesures

Echelle : 1/7500

Source : Plan des rues Constantine, I.N.C.T., Alger 2002

Fig. 4 : Article sur le glissement de l'Autoroute Massinissa.



Source : Journal L'Est Républicain du 28/02/2005

Il a été constaté, en terme de dynamique de ce site, que la surface de décollement est profonde. Les fronts de détachement des différents glissements peuvent atteindre des dénivelées de plusieurs mètres et le volume de matériaux déplacé peut être estimé à plusieurs centaines ou

milliers de mètres cubes dans certains cas (LNTP Est 2004 ; Revue Construire n° 30, 1989).

Les dégâts sur quelques sections de cette route sont tels que la circulation a été fermée pour une longue période. Des travaux de confortement ont été entrepris pendant ce temps, tels que la pose de palplanches, construction de mur de soutènement, drainage et gabionnage. Malheureusement ces travaux de stabilisation n'ont pu remédier à ce problème.

Selon, les services de l'Urbanisme et des Travaux Publics ont déclaré que seuls les sites de l'Université de Constantine (la Tour) et le Pont du M'cid sont pour le moment inactifs, et ceci depuis 2000 malgré les pluies abondantes de 2003 - 2004. Ce constat est confirmé par le service topographique du Cadastre d'après lequel ces deux sites n'auraient pas bougé depuis 10 ans.

ETAPES DE L'EVOLUTION DU PHENOMENE DE GLISSEMENT DE TERRAIN

Avant 1966, les terrains étaient stables alors que les constructions dataient des années 1930-1940 (Fig. 5). C'est dire que la rupture d'équilibre date d'après 1966.

Aussi, il serait intéressant de s'interroger sur les facteurs déclencheurs.

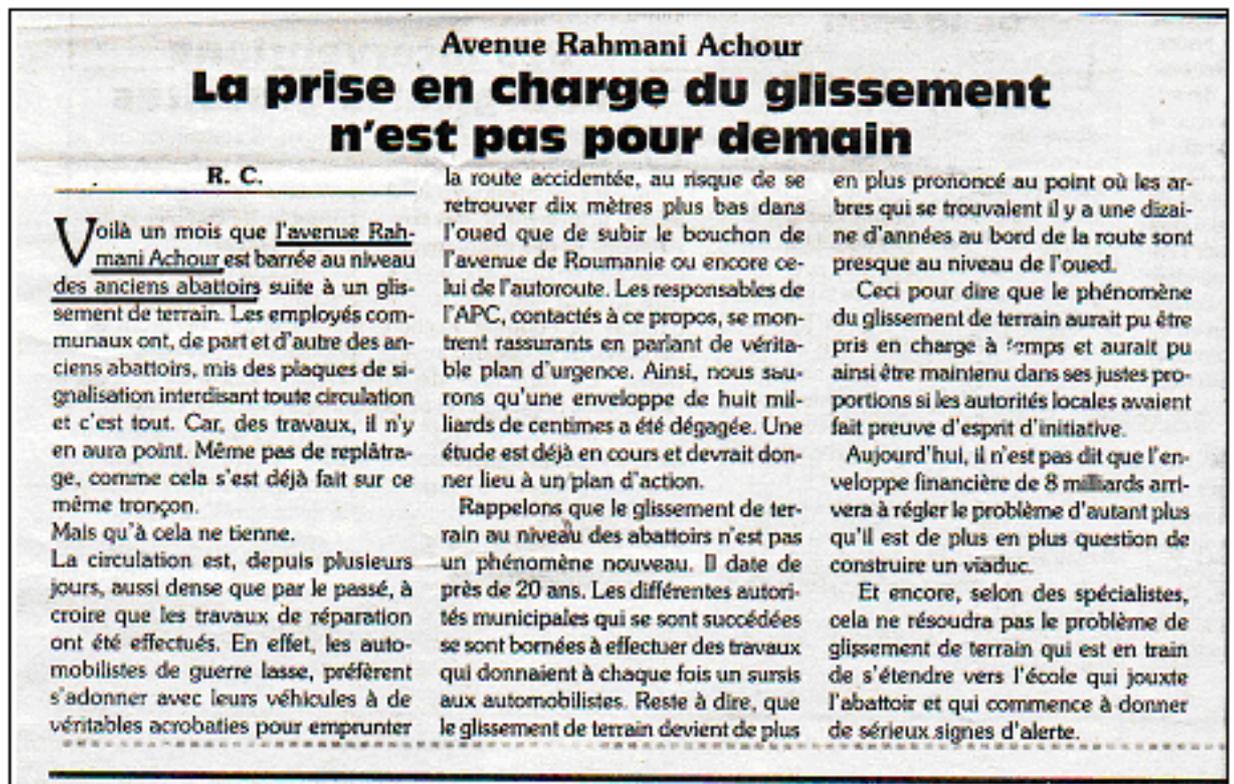
Les habitants ont commencé à se manifester auprès des autorités communales dans les années 1966 à 1970, suite à l'apparition de dégâts aux niveaux de leurs constructions et cela d'après les enquêtes

faites par les média ; les plus récents journaux et quotidiens (Fig. 3 , Fig. 6) :

- EL WATAN du 09/12/99 ;
- LIBERTE du 09/12/99 ;
- LE SOIR du 09/12/99 ;
- EL WATAN du 19/12/99 ;
- LA TRIBUNE du 15/06/00 ;
- EL WATAN du 31/07/00 ;
- LE MATIN du 12 /02/01 ;
- LE MATIN du 06 05/01 ; -
- LIBERTE du 05/09/02 et du 17/08/03 ;
- QUOTIDIEN du 25/08/03 ;
- L'EST REPUBLICAIN du 28/02/05 ;
- L'EST du 14 /09/06 ;
- L'EST du 11 /04/07...

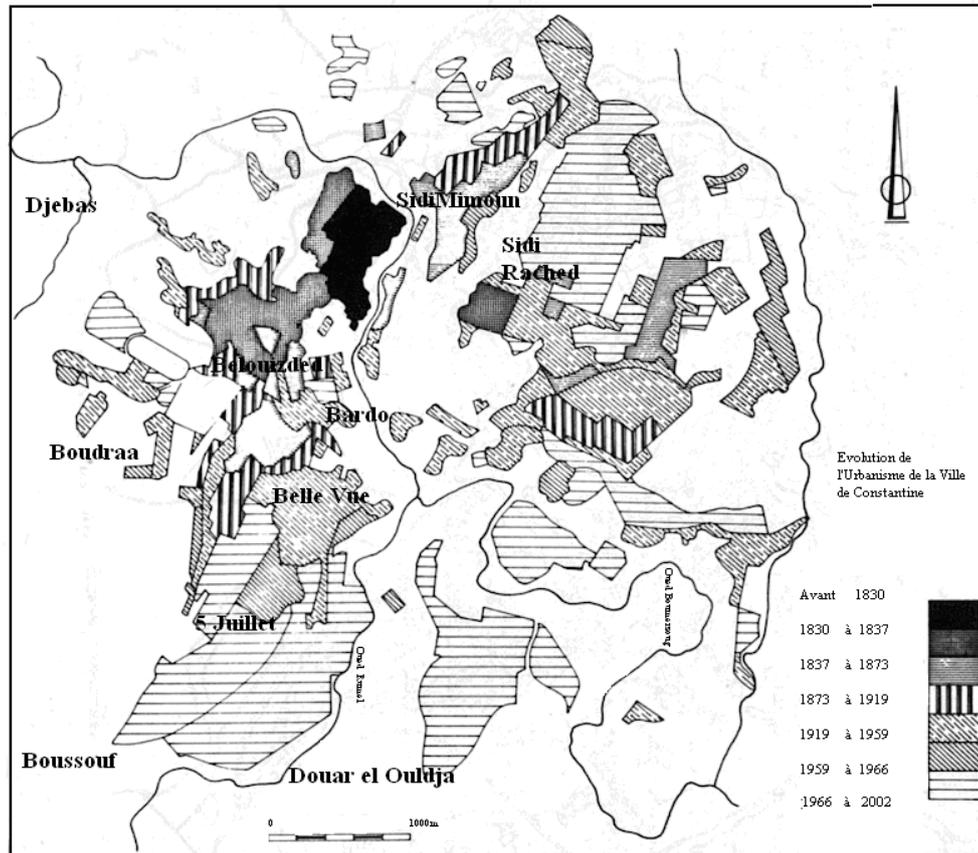
D'autres articles ont paru dans les mêmes journaux à des dates encore plus anciennes, d'autres aussi en langue nationale. Les réclamations sont reçues par les services de l'urbanisme de l'A.P.C. (Assemblée Populaire Communale). Toutefois, la question de la prise en charge effective par les services concernés reste posée (Fig. : 6)

Fig. 6 : Article sur le glissement de l'Avenue Rahmani Achour quartier des abattoirs



Source : Journal L'EST du 10/07/2004

Fig. 5 : Evolution du périmètre urbain de la ville de Constantine de 1830 à 2002



Source : Services d'urbanismes de la ville de Constantine

IDENTIFICATION DES PROCESSUS EN JEUX DANS LE DECLENCHEMENT ET L'ACCELERATION DES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Les principaux facteurs qui seraient à l'origine de ces mouvements de terrain sont : la lithologie, la microtectonique, l'eau, la pente du relief et l'action anthropique.

La complexité des sols argileux, leurs pouvoirs de saturation, les surcharges des constructions et le poids engendré par les eaux favorisent une instabilité périodique perceptible aux déchirures et aux tassements sur les terrains à relief en pente (Flageollet J.C.1989 ; Cartier G. 1981).

L'altération des roches et leur dégradation rapide par l'action des eaux souterraines provoquant une érosion interne en variant les propriétés mécaniques du terrain ; les infiltrations dans ces zones favorisent des glissements de sols de même nature et de différents endroits possédant des caractéristiques géomorphologiques semblables et de géologie commune (Bouteldja M. et Chekh Lounis G. 1996 ; Ralducci M. Custodi A.1989).

Les grands travaux de terrassement comme l'ouverture des tracés d'autoroute à l'intérieur de la ville de Constantine modifient l'équilibre de l'assise du terrain en pente (pied du versant, diminution de l'angle de cohésion des terres).

Par ailleurs, la ville de Constantine est située sur une série de failles néotectoniques actives dans la direction nord-est sud-ouest. Ces failles qui affectent des terrains meubles du Mio-pliocène et des terrains d'âge quaternaire formés de tufs hydrothermaux favorisent l'instabilité des sites.

DEUXIEME PARTIE

ETUDE DU CADRE GEOLOGIQUE

APERÇU GEOLOGIQUE

Mise à part le rocher, la constitution de la géologie de la ville de Constantine est caractérisée par des affleurements de roches meubles majoritairement tendres dans les catégories :

- des argiles priaboniennes des nappes telliennes,
- des glacis anciens de Constantine, des tufs hydrothermaux du quaternaire,
- des argiles et marnes gypsifères du miopliocene,
- du calcaire pélitique du trias des nappes néritiques constantinoises.

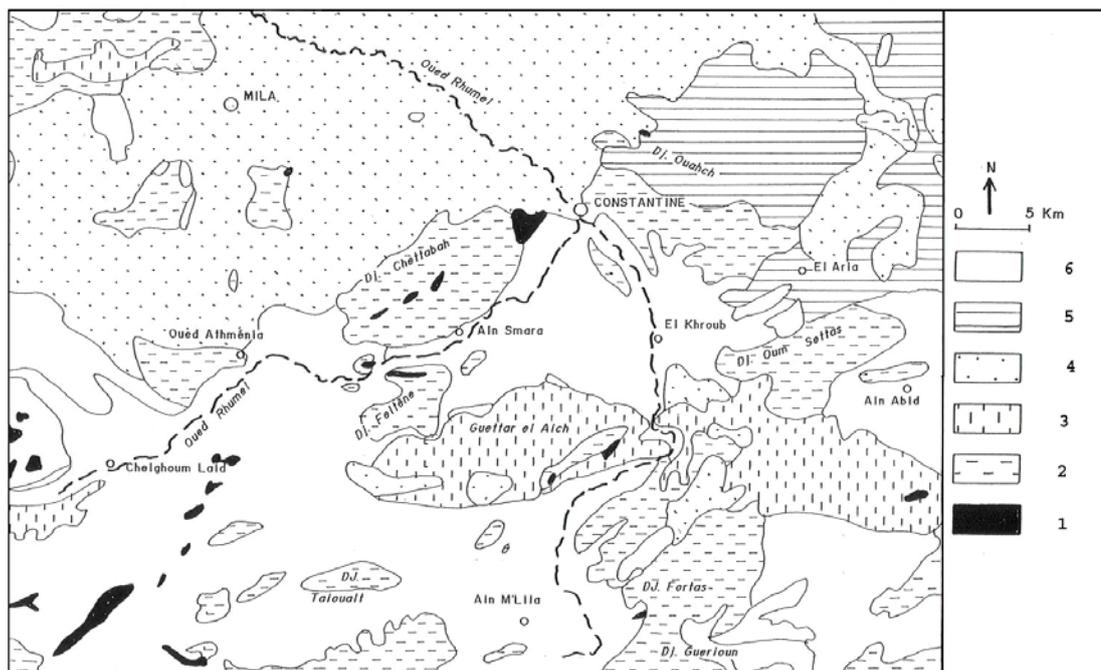
Ces roches sont très répandues et se rencontrent dans un rayon d'environ 60 km de Constantine (Paulsen S., Krauter E., Hanisch J. 1999). Elles présentent des caractéristiques géotechniques communes, celles relative à la capacité d'absorption d'eau en grande quantité jusqu'à 3 fois leur poids. La présence d'eau en grande quantité engendre le déclenchement et l'accélération du processus de dégradation des terrains jusque-là stables. L'altération des roches modifie leur structure cristalline et par conséquent leur cohésion et leur angle de frottement interne.

Les changements dans les propriétés de ces formations rendent les terrains très fragiles et vulnérables car l'instabilité prend naissance en profondeur des sols. Dans de tels contextes, les constructions comme la population sont exposés à un risque majeur.

CARTOGRAPHIE GEOLOGIQUE DES SITES INSTABLES

La série géologique commence avec les calcaires massifs du Rocher de Constantine (Cénomaniens à Turonien) sur lesquels les vieux quartiers de la ville ont été bâtis. Au-dessus de ces calcaires, se trouve une série de marnes noires à allure schisteuse d'âge Campanien. C'est dans ces marnes que le glissement de terrain s'est développé. Plus tard, après les mouvements orogéniques alpins, une puissante série de couches continentales s'est déposée ; il s'agit d'une alternance de conglomérats et d'argiles sableuses rouges du mio-pliocène (Fig. 7).

Fig. 7 : Carte géologique du Constantinois d'après Coiffait P.E (1992)



1- Trias, 2- Crétacé, 3- Eocène, 4- Oligocène, 5- Mio-Pliocène, 6- Plio-Quaternaire

Il est bien établi que c'est cette formation qui est la plus sensible aux glissements de terrain (Coiffait P.E, 1992).

Sur la base de la synthèse des informations récoltées par des recherches bibliographiques et des données techniques des institutions sur site, il a été dressé la cartographie faciologique du Néogène dans la région de Constantine dans le but de représenter la répartition spatiale des dépôts.

Le Néogène des environs de Constantine se compose de dépôts continentaux à dominante détritique dans sa partie inférieure et carbonatée dans sa partie supérieure. Cette sédimentation continentale couvre en discordance angulaire le bâti représentant le néritique Constantinois. Par endroits, la série néogène se manifeste par un changement latéral de faciès et par des discontinuités en relation avec une activité microtectonique. Parfois elle est mise en contact direct avec les calcaires néritiques par l'intermédiaire d'accidents néotectoniques.

Les dépôts néogènes sont subdivisés sur la base de critères sédimentologiques en trois cycles distincts :

- Un cycle de base, composé essentiellement de conglomérats rougeâtres, à éléments polygéniques et hétérométriques dont les dimensions peuvent atteindre plus de 50 cm et dont le faciès est carbonaté, gréseux ou siliceux. A l'affleurement s'observent de gros bancs de poudingues pouvant atteindre plusieurs mètres d'épaisseur. Cet ensemble inclut souvent, en alternance, des niveaux de marnes sableuses ou d'argiles silteuses toujours de même teinte.

- Un cycle médian, à dominante marneuse à limoneuse, renferme des gastéropodes, de minces niveaux discontinus de gypse et des dépôts grossiers de chenaux. Le gypse remplit souvent de fines fissures apparaissant dans les argiles sans orientation préférentielle.

- Un cycle supérieur, représenté par des calcaires rosâtres lacustres, inclut des couches de marnes de mêmes teintes. Certains bancs sont riches en gastéropodes et en restes végétaux. Ces derniers s'observent sur le plateau ouest (Sortie de Constantine vers Sétif) et au Dj. Hadj Baba, datés Pliocène inférieur moyen (Coiffait, 1992).

La série est couronnée par un terme quaternaire débutant généralement par des niveaux détritiques et surmontés par des bancs de calcaires.

COUPE GEOLOGIQUE

Pour visualiser le profil du terrain, il est proposé deux colonnes lithostratigraphiques qui mettent en évidence les résultats suivants (Fig. 8) :

a. Le Mio-pliocène

Cette coupe est levée sur le versant du Sud-ouest de Constantine, Cité 5 juillet. On distingue deux ensembles lithologiques successifs :

-Un ensemble inférieur marneux dépassant les 50m d'épaisseur qui, à son tour, peut être subdivisé en deux termes. Un terme basal composé de marnes grises, à niveaux très minces de gypse

(millimétriques à centimétrique). Dans ces marnes on trouve des Gastéropodes semblables à ceux trouvés dans les marnes, souvent remplis de gypse où parfois s'observe seulement le moule gypseux. Dans ces marnes apparaît, par endroits, des dépôts de chenaux constitués de conglomérats à éléments bien roulés, à granulométrie variable (centimétrique à décimétrique). Dans leur partie supérieure, apparaissent des structures sédimentaires représentées par des litages obliques particulièrement dans les sédiments gréseux grossiers. Ces dépôts de chenaux se terminent par des niveaux gréseux fins recouverts par un faciès silteux. Un second terme, toujours constitué de marnes, de teinte légèrement beige (60 à 70m) renferme aussi des dépôts de chenaux à éléments grossiers. Dans les niveaux fins on distingue une stratification entrecroisée, parfois légèrement courbe.

- Un ensemble supérieur, moins épais, comparativement à celui sous-jacent (~40 m). Il se compose de marnes silteuses rougeâtres, de couches de calcaires argileux à travertineux, toujours de même couleur et des niveaux marno-sableux très peu consolidés. Au sommet quelques bancs décimétriques de calcaires lacustres gris-rosâtres à petits vides (vacuolaires) tapissés de fins cristaux de calcites, comportant une fracturation à remplissage calcique. Souvent ces calcaires renferment des traces fossiles de végétaux et de gastéropodes (Hélicidés) rapportés au Quaternaire ancien.

b. Les dépôts récents quaternaires

Ils sont constitués surtout de colluvions anciennes en bordure des reliefs et des croûtes et tufs calcaires, des dépôts de pentes et des glacis

polygéniques. Les terrasses alluviales se disposent sur les rives de l'Oued Rhumel au-dessus du lit actuel. Elles sont constituées par des matériaux limoneux, des graviers et des galets roulés que l'on retrouve tout au long de la vallée du Rhumel et du Boumerzoug. Elles se localisent à différentes altitudes et s'observent localement en bordure des plaines.

Des travertins sont déposés par les grandes sources à des niveaux plus élevés et apparaissent au niveau de Békira, des plateaux du Mansourah et d'Aïn El Bey. Ils correspondent à des calcaires d'aspect concrétionné, plus ou moins vacuolaire de couleur grisâtre à jaunâtre.

Il faut noter que même la microtectonique a des effets sur la dynamique du terrain (Fig. 9). La présence de failles, à contact plat, induit des chevauchements à vergence sud et plus particulièrement celles injectées par du Trias.

Fig. 8 : Colonnes lithostratigraphiques, d'après Coffait P.E .(1992)

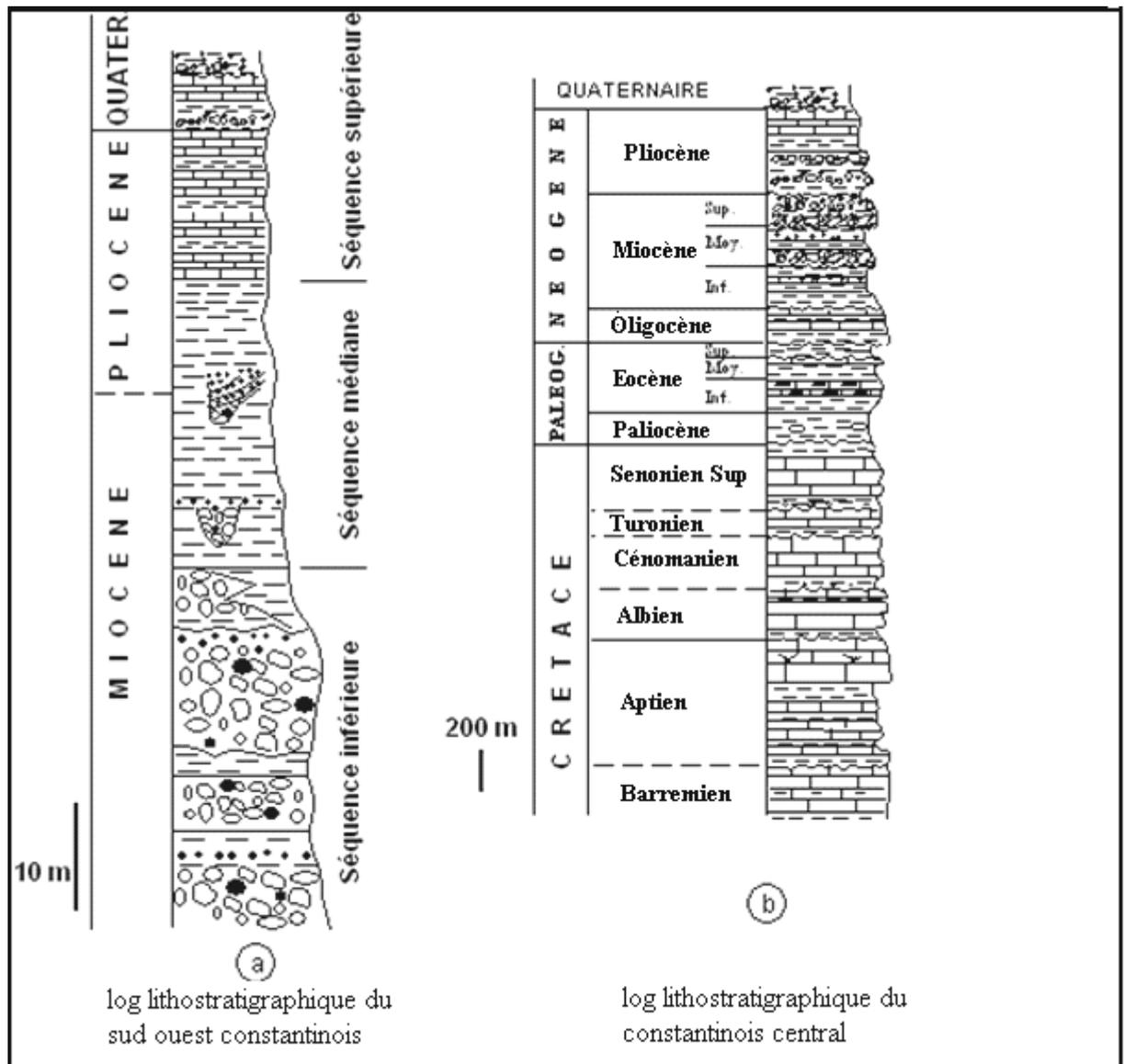
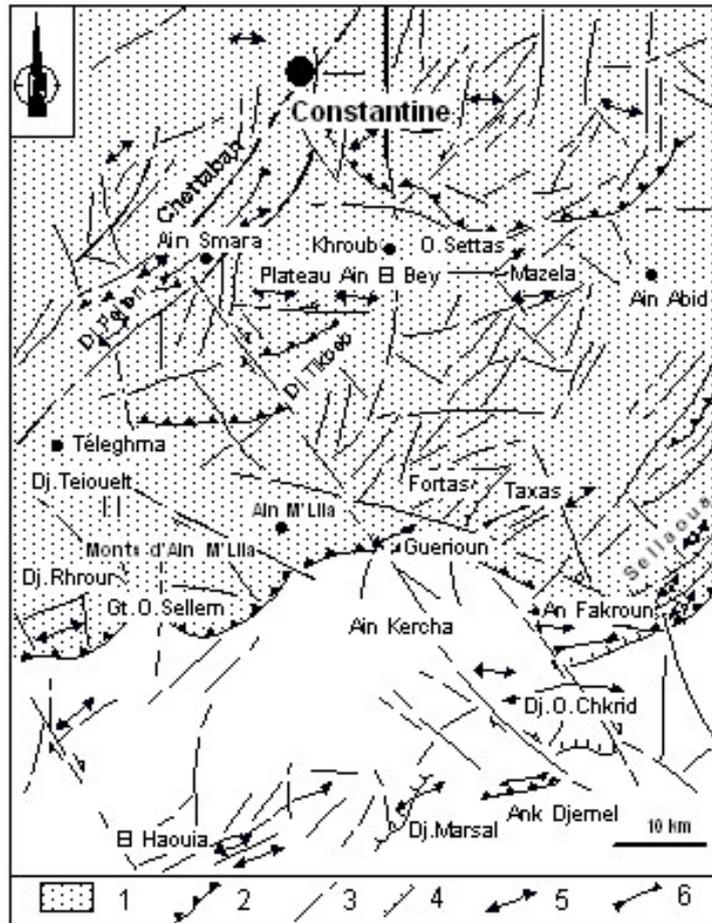


Fig 9- Schéma structurel de la région de Constantine,
d'après Vila J.M. (1980)



- 1- Constantinois Central,
- 2- Front de chevauchement,
- 3- Failles, décrochements,
- 4- Failles inverses,
- 5- Plis anticlinaux,
- 6- Plis synclinaux

TROISIEME PARTIE

ETUDE DES CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES SITES INSTABLES

INTRODUCTION A L'ETUDE GEOTECHNIQUE : VARIATION DES PROPRIETES MECANIQUES DU TERRAIN

Les essais de sol portent principalement sur les argiles et les marnes. Ce sont des roches métamorphiques qui absorbent énormément d'eau. Elles sont très poreuses, leurs grains sont microscopiques ; donc un coefficient de liquidité et de plasticité très important. Terzaghi (*in* Costet J. et Sanglerat G., 1981) a étudié minutieusement la complexité et la particularité des argiles.

Des études géotechniques ont révélé que lors desancements de projets, les essais de laboratoire ont porté sur la limite de liquidité WL et l'indice de plasticité IP. Les résultats du LTP Est (Laboratoire des Travaux Public de l'EST) donnent des valeurs pour les IP comprises entre 35% et 40% et pour les WL entre 55% et 60% à la fin mois d'octobre 2004. D'autres essais effectués fin février 2005 ont donné pour comme résultats entre 35% et 45% pour les IP et entre 60% et 75% pour les WL. De telles valeurs sont proches des valeurs limites qui sont de l'ordre de 80% dans les argiles et les marnes de Constantine d'après le répertoire des laboratoires algériens des sols.

Par ailleurs, des essais de cisaillement à l'appareil triaxial sur des argiles ont déterminé des angles de frottement interne compris entre 3° et 6° ; ce sont des valeurs proches de la rupture pour les terrains en pente.

Dans la courbe de Talbot, les argiles atteignent une porosité de 0.84 c'est à dire pour lesquelles les vides occupent plus de 5 fois le volume

de celui des grains. Des argiles volumiques ont un indice des vides qui dépassent 13 fois le volume des grains (Sanglérat G. et Costet J., 1975).

Si l'on observe les formes des grains, on remarque que plus le grain est petit plus la présence de vide est importante : plus sa composition en particules très fine augmente et plus le sol se gonfle d'eau. C'est le cas des argiles dont leur diamètre varie de 0.05 à 5 μ .

La propriété des fines particules explique la particularité et de la diversité du comportement des argiles par leur composition complexe et par leur forme de grains dite en paillette ou en feuillets d'où le phénomène d'absorption d'eau.

La complexité d'absorption d'eau a un rôle essentiel dans leur comportement et par conséquent dans le comportement du sol en surface et en profondeur. Dans un sol contenant des matériaux fins (argiles et limons), les variations de la teneur en eau ont des effets sur ses propriétés mécaniques : l'absorption entraîne une diminution de la résistance au cisaillement, la dessiccation entraîne au contraire une amélioration de ces propriétés à petite échelle et à grande échelle des fissures et crevasses plus ou moins profondes apparaissent (Mongereau N. et al 1985).

Bien que les manifestations soient très lentes et peu spectaculaires en regard de l'érosion par les eaux courantes, elles conduisent à une altération de la stabilité générale du terrain parfois sur de grandes surfaces. Notamment après une période sèche, les premières pluies

pénétrant dans les fissures béantes sont fréquemment responsables de la réactivation de masses de terre sur les pentes.

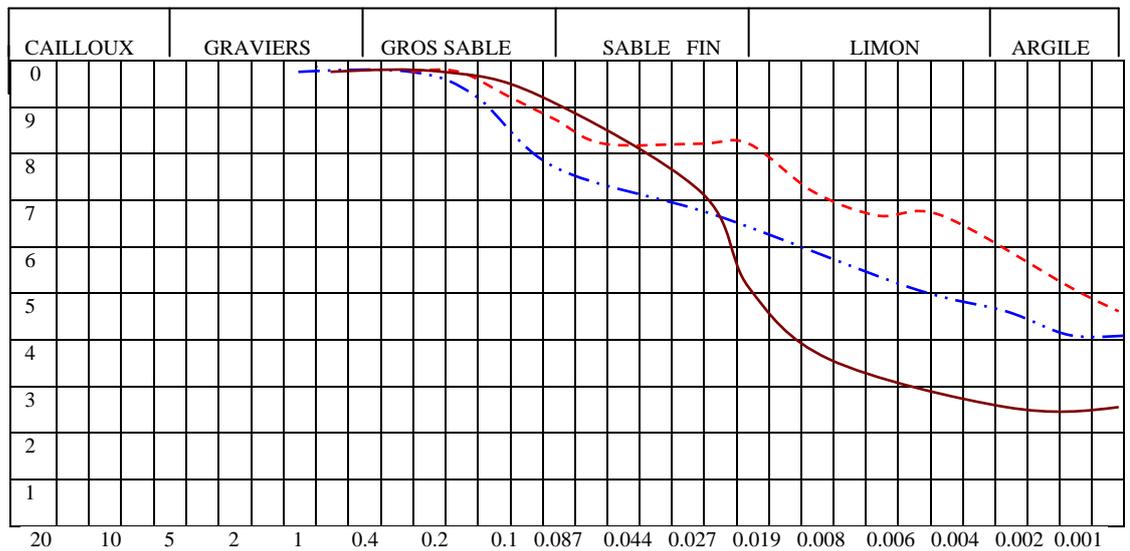
CARACTERISTIQUES GEOTECHNIQUES DES SITES INSTABLES.

Des échantillons ont été prélevés au niveau de différents secteurs de l'aire d'étude en vue d'une caractérisation d'un point de vue géotechnique des formations argileuses du moi-pliocène. Bellevue, la Cité du 5 Juillet et le Bardo (quartier de l'abattoir) sont les trois sites où prélèvements et d'essais ont été effectués. Pour certains sols, il a été entrepris plusieurs essais afin d'en tester la répétitivité. Les essais effectués sur ces formations l'ont été à partir d'échantillons naturels. Pour l'ensemble des sites étudiés, plusieurs sondages carottés ont été réalisés.

Analyse granulométrique

Chaque essai a fait l'objet d'une analyse granulométrique à part et cela pour chaque site afin de comparer les courbes. Pour s'assurer que ces dernières ont à peu près les mêmes allures, il a été pris en considération la courbe moyenne de chaque site (Fig. 10).

Fig. 10 : Courbes Granulométriques des Trois Sites : Bellevue, Cité du 05 Juillet et le Bardo



Source : LTP Est Constantine

- Cité du 05 Juillet
- · - · - · Le Bardo
- Bellevue

De l'analyse granulométrique, il ressort les résultats suivants :

Le site Bellevue :

- Une tranche de 30% de grains inférieurs à 0.017mm : ce sont les limons et les argiles,
- une tranche de 63% de grains compris entre 0.017 et 0.17mm : ce sont les sables fins,
- et une tranche de 7 % de grains compris entre 0.17 et 0.4 mm : ce sont les gros sables

Le site du Bardo (abattoirs) :

-Une tranche de 58% de grains inférieurs à 0.017mm :ce sont les limons et les argiles,

-une tranche de 32% de grains compris entre 0.017 et 0.17mm : ce sont les sables fins,

-et une tranche de 10% de grains compris entre 0.17et 0.4mm ce sont les gros sables.

Le site de la Cité du 05 Juillet :

-Une tranche de 80 % de grains inférieurs à 0.017mm ce sont les limons et les argiles,

-une tranche de 20% de grains compris entre 0.017 et 0.17mm ce sont les sables fins.

Analyse minéralogique

En ce qui concerne l'analyse minéralogique, la technique de diffraction des rayons X nous a permis d'identifier la nature de l'argile. La nature minéralogique a été, donc, déterminée à partir de la diffraction des rayons X sur les échantillons des trois sites. Les spectres de diffraction obtenus pour les trois sites en question montrent la présence de la Kaolinite. Les principaux minéraux sont la Kaolinite (qui est le seul minéral phyllosilicaté), le Quartz, la Lutcite, la Zéolite, la Schistovite et la Tredimite.

En se basant sur l'indice de plasticité et la fraction argileuse, on peut avoir différents comportements de l'argile. D'après Skempton, la valeur de A_c , qui par définition est le rapport de l'indice de plasticité I_p

(%) à la teneur en argile (particule de dimension inférieure à $2\mu\text{m}$), reflète directement le caractère minéralogique de l'argile. Donc, nous aurons:

$Ac < 0,75$ argile inactive

$0,75 < Ac < 1,25$ argile normale

$Ac > 1,25$ argile active

Malgré l'importance de la fraction argileuse, l'ensemble des valeurs de l'activité (Ac) des sites étudiés sont situées entre les droites de pentes comprises entre 0,5 et 1,12. Ces sols peuvent être considérés comme inactifs ou ayant une activité normale.

Malgré la grande diversité des sols argileux, les grands principes contrôlant leurs comportements mécaniques sont identiques, ce qui permettra de développer des approches générales pour les différents problèmes pratiques.

Par ailleurs, il existe des relations entre les différentes propriétés qui sont validées pour la plupart des argiles. C'est ainsi que la propriété caractérisant la consistance des argiles est représentée par la relation entre l'indice de liquidité et la résistance au cisaillement non drainée (Fig. 11). Une corrélation a été effectuée, entre l'angle de frottement interne et la fraction argileuse (Fig. 12). Cette corrélation montre bien l'influence de la fraction argileuse sur les propriétés physiques et mécaniques des argiles étudiées.

Limites d'Atterberg

De manière classique, l'indice de plasticité I_p représente la plage de teneur en eau pour laquelle le sol agit comme un matériau plastique ; les limites de liquidité et de plasticité étant les bornes supérieure et inférieure du comportement plastique.

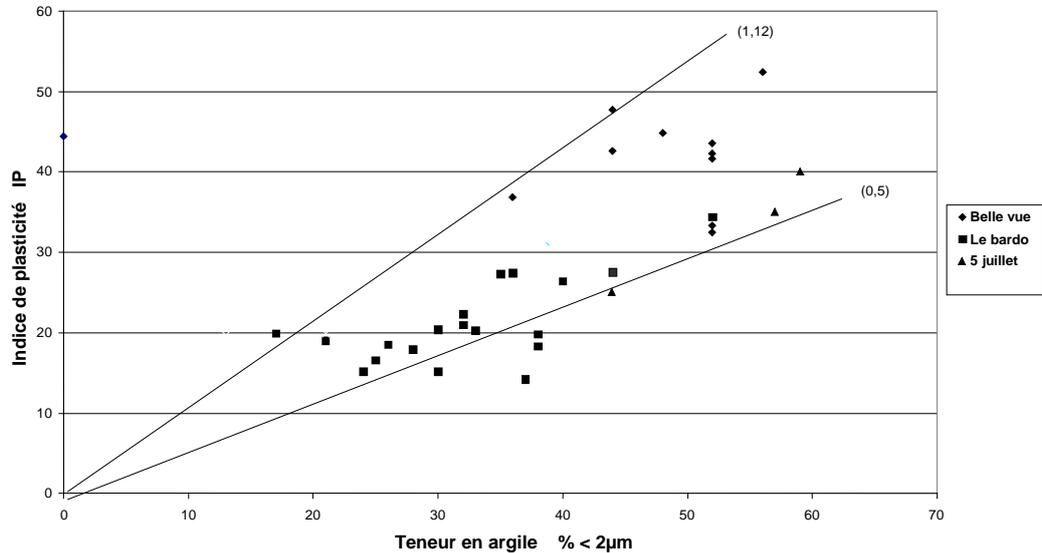
L'ensemble des résultats des essais des limites d'Atterberg effectués sur des échantillons sites se positionnent sur l'abaque de Casagrande dans une zone bien définie, parallèle à la ligne "A" et juste au-dessus de celle-ci, d'équation : $I_p = 0,73 (WL - 21)$, (Sanglerat G. et Costet J., 1975).

La plupart des échantillons étudiés, correspondant aux argiles des différents sites, sont de moyenne à forte plasticité (Fig. 13) avec des valeurs de I_p comprises entre 15 et 45%.

Malgré la grande diversité des sols argileux, les grands principes contrôlant leurs comportements mécaniques sont toujours identiques, ce qui permet de développer des approches générales pour les différents problèmes pratiques.

Les argiles sont des matériaux cohérents constituées d'éléments fins et se caractérisent par une perméabilité très faible par rapport aux matériaux granulaires (pulvérulents) et notamment les sables. Leur comportement mécanique est très influencé par l'histoire des contraintes de consolidation, notamment la teneur en eau qui est un paramètre fondamental. Lorsqu'ils sont saturés ce paramètre peut être remplacé par l'indice des vides.

Fig. 11 : Rapport entre indice de plasticité et fraction argileuse.



Source : LNTP Est , Constantine

Indices de glissement

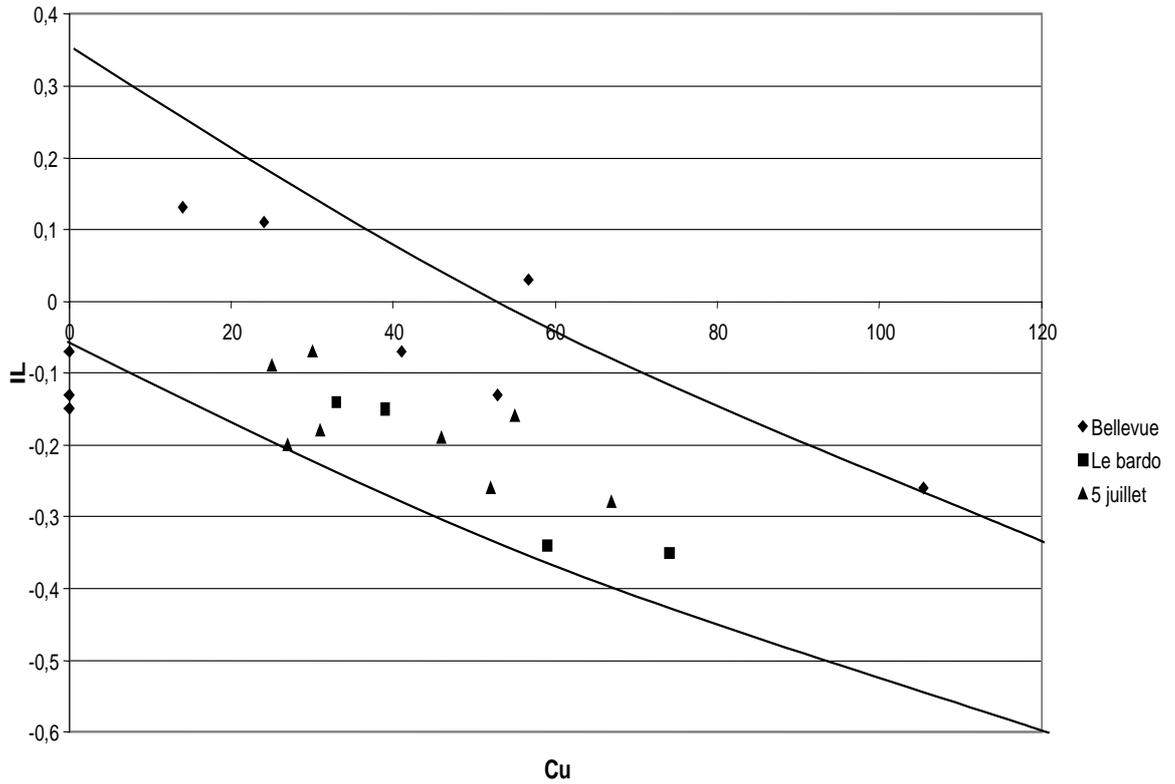
L'étude des caractéristiques rhéologiques du sol pour cette phase porte de manière générale sur la détermination des paramètres géotechniques, physiques et mécaniques à partir des échantillons naturels dans les conditions de non drainage.

L'objectif recherché est de pouvoir, dans un premier temps, apprécier le comportement du sol à court terme. Chaque sol prélevé a fait l'objet d'une identification visuelle.

Le site bellevue :

Le terrain est recouvert par une formation de remblais dont l'épaisseur varie entre 1 et 2 m. En dessous, on y trouve des formations argileuses compactes qui présentent des lentilles sableuses.

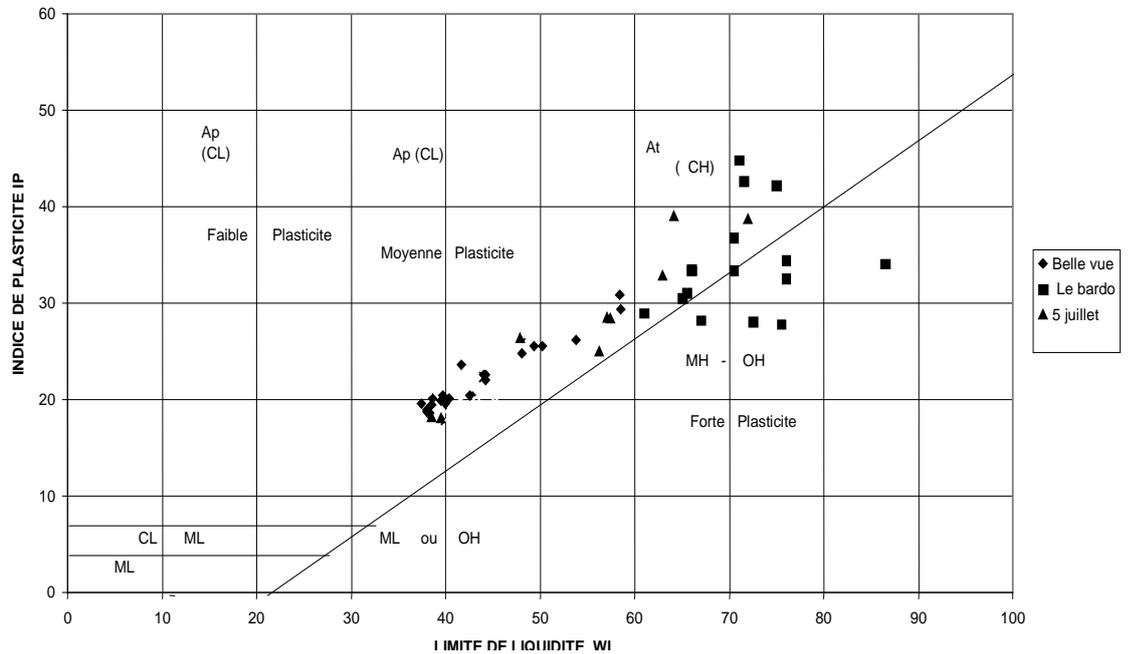
Fig.12 : CU en fonction des IL



IL : Indice de Liquidité, Cu : Résistance au Cisaillement

Source : LNTP Est Constantine

Fig. 13 : Plasticité des argiles de Constantine



Source : LNTP Est, Constantine

Le site du Bardo :

Le terrain est recouvert par une formation de remblais d'argile brune dont l'épaisseur varie entre 1 et 2 m. En dessous, on observe des formations argileuses gypseuses et limoneuses.

Le site de la Cité du 05 Juillet :

Ce terrain est constitué principalement d'argile avec des alternances de sable, de graviers, ou à matrice argilo-limoneuse.

L'analyse des valeurs des différents paramètres montre que tous les échantillons des différents sites ont des entités rhéologiques semblables.

L'analyse granulométrique montre que la formation du mio-pliocène présente une granularité du type argile limoneuse parfois sableuse, de fraction argileuse limoneuse ($\% > 1\mu\text{m}$) variant de 35 à 80%. Dans l'analyse granulométrique, on remarque que l'allure des courbes révèle que cette argile a une granulométrie uniforme à grains fins (Fig. 10).

L'état en place montre qu'il s'agit d'une argile dense : la densité sèche varie de 1.5- 2.02 t/m³.

Les teneurs en eau correspondantes sont très homogènes - W varie de (14.4 – 22%)- et nettement inférieur à W_p. Ces argiles sont partiellement saturées à saturées.

On remarque que les indices de plasticité sont légèrement homogènes, sauf pour le site de Bellevue, où les indices de plasticité sont nettement supérieurs, ce qui explique la tendance au gonflement du sol du site.

L'argile du mio-pliocène possède des coefficients de compressibilité variant de 0,188 à 0,287, et une cohésion non drainée moyenne variant entre 0,25 à 0,6 bars. On constate que les premières profondeurs indiquent des coefficients de compressibilité et des cohésions relativement faibles. Ces valeurs correspondent pour la plupart des

sondages aux formations de remblais; au delà de ces formations, ces valeurs deviennent moyennes.

Le rapport d_{60}/d_{10} appelé coefficient de Hazen ou coefficient d'uniformité ne peut pas être pris parce que le diamètre d_{10} ou diamètre efficace n'apparaît pas sur le graphe.

ESSAI INCLINOMETRIQUE

L'inclinométrie

L'inclinométrie est une technique de mesure de mouvements de terrain à l'aide d'un appareil appelé inclinomètre. Cette technique a pour but d'estimer l'ampleur des déplacements par l'évaluation de la géométrie intérieure du sol afin d'en remédier, de rechercher et d'appliquer les moyens de stabilité adéquats et de prévenir le phénomène-catastrophe.

Domaine d'application

L'inclinomètre est un appareil de mesure utilisé en géotechnique depuis près d'un demi siècle. Il s'applique à la détermination des mouvements en profondeur d'un massif de sol ou de roche à l'aide d'un tube de mesure non vrillé et s'écartant peu de la verticale, fixé sur une structure ou placé au sein d'un massif de sol ou de roche. Les mesures inclinométriques ont pour but, selon le cas, de connaître la position du tube par rapport à la verticale du lieu, ou d'évaluer les déplacements du tube dans le temps par rapport à une de ses extrémités supposée fixe ou dont la position est connue par ailleurs (Filliat G. Dubus J. 1984).

Principe de mesure

La méthode consiste à introduire dans un tube une sonde et à mesurer l'angle que fait, à une profondeur donnée, l'axe de l'élément du tube guide avec la verticale. L'inclinaison du tube est obtenue, en déplaçant la sonde avec un pas constant, égal à la longueur de la sonde (0,5m). Le déplacement horizontal du tube par rapport à une position de référence est déterminé par calcul. Les mesures sont répétées avec le même appareillage et selon la même procédure à différents intervalles de temps en vue de déterminer les mouvements du tube inclinométrique (Fig. 14 a et b). Elles sont effectuées dans deux directions perpendiculaires, dont une orientée parallèlement à la plus grande pente.

Les données géologiques ne montrent pas clairement la profondeur des glissements ainsi que la couche en question qui fait rupture. C'est pourquoi l'intervention de l'essai inclinométrique s'avère indispensable si l'on veut vraiment étudier le problème et avoir des résultats qui donneront un aperçu sur une préconisation de solutions.

Fig. 14 : Schémas de pose d'un inclinomètre

Fig.14a : Mesure inclinométrique dans un massif de sol en mouvement

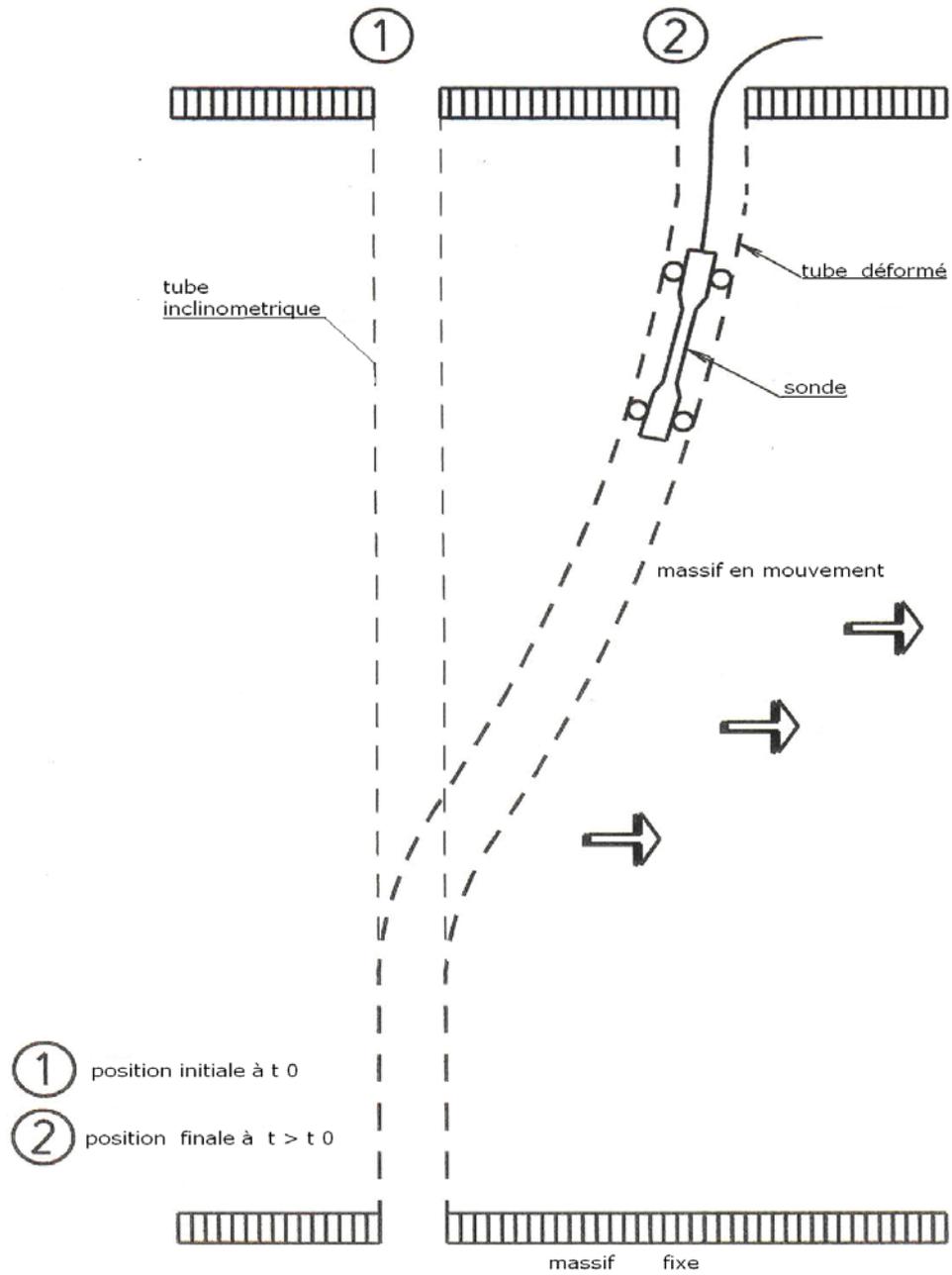
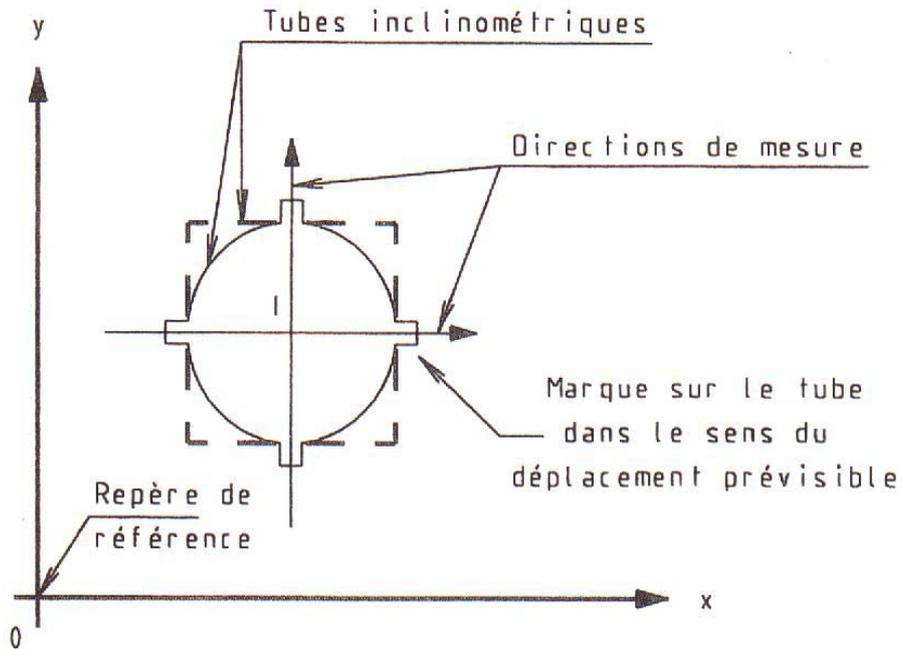


Fig. 14b : Marquage du tube de mesure



Source : Catalogue Glotzl Baumesstechnik, 1995

La mise en place d'un dispositif de surveillance au niveau des trois sites (Bellevue, Bardo et Cité du 05 Juillet) permet de déterminer la position de la surface de rupture, de cerner les contours du volume en mouvement, d'en suivre l'évolution et de juger du risque éventuel d'aggravation de la situation (Fig. 15 a, 15b et 15c). Le système de surveillance constitue un élément fondamental et indispensable pour le suivi des mouvements de terrains et la définition des confortements. C'est à ce titre que l'inclinométrie a été choisie en priorité pour le suivi et la mesure des glissements de terrain de la ville de Constantine.

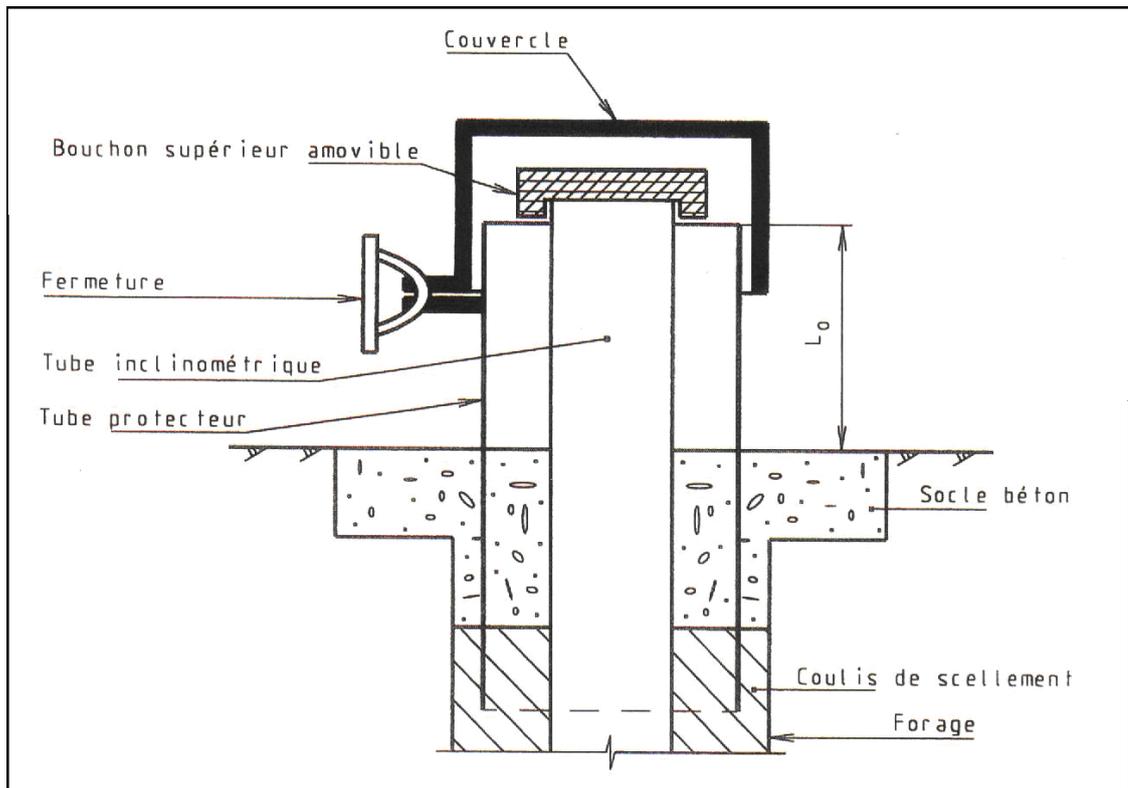
Fig. 15 : Exécution d'une sonde inclinométrique



a)-Regard du tube inclinométrique



b)-Tubes et trou de sonde inclinométriques



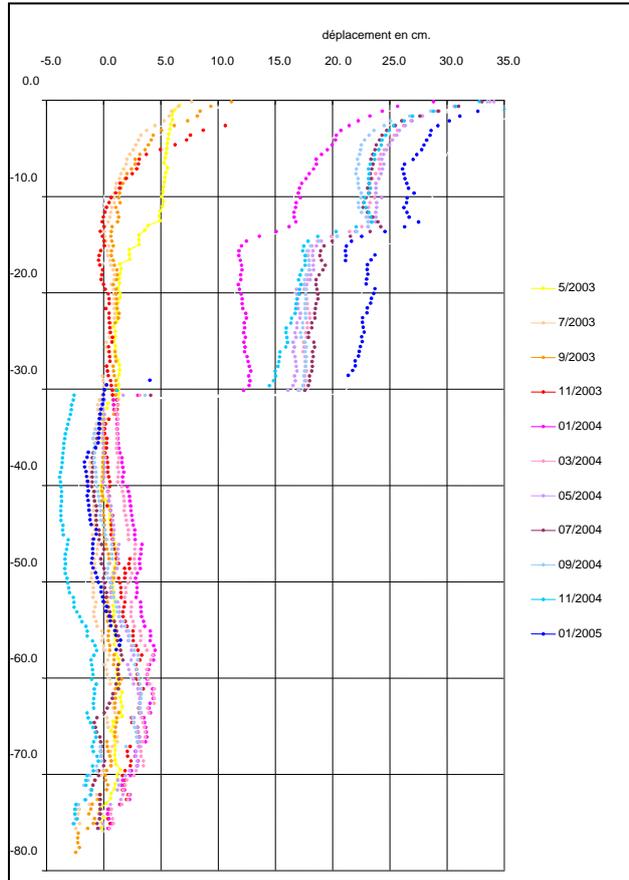
c)-dessin d'explication de protection de la sonde

Estimations périodiques

Ayant étudié les aspects géologique, minéralogique, géotechnique et physico-mécanique des différents sites, l'essai inclinométrique donnera les informations sur la couche instable de terrain et son épaisseur (Fig. 16), informations nécessaires pour en suivre l'évolution et juger du risque éventuel d'aggravation de la situation du site pour une durée déterminée. Cet instrument perd sa fiabilité si la dynamique du sol arrive aux limites de son utilisation (glissement de plus de 1m déplacement).

Cet instrument a été installé le 03.05. 2003 à la Cité du 05 Juillet parce que elle est proche de la Cité Bellevue mais aussi du fait de l'implantation de l'Institut des Sciences.

Fig. 16 : Essai avec graphe de la période de mesure inclinométrique à la Cité 5 Juillet du 05/2003 à 01/2005



Source : LTP Est Constantine

Les résultats enregistrés pour une durée de 20 mois ont donné (Tab.2) :

-36cm de déplacement à un niveau de -2 m par rapport à la surface du sol ;

-32cm de déplacement à un niveau de -14 m par rapport à la surface du sol ;

-et 27cm de déplacement à un niveau de -31m par rapport à la surface du sol.

Tableau 2 : Déplacement du terrain dans le temps et la profondeur

PERIODE	PROFONDEUR (mètres)			DEPLACEMENT (centimètres)			NATURE DU TEMPS	GEOLOGIE
	-2	-14	-31	10	4	3		
Mai 2003 à nov 2003	-2	-14	-31	10	4	3	sec	Pliocène
Nov 2003 à jan 2004	-2	-14	-31	17	15	10	humide	Miocène
Jan 2004 à mar 2004	-2	-14	-31	4	6	6	humide	Miocène
Mar 2004 à nov 2004	-2	-14	-31	5	3	3	sec	Miocène
Nov 2004 à jan 2005	-2	-14	-31		4	5	humide	Miocène
TOTAL DEPLACEMENT (cm)				36	32	27		

Conclusion

Les déplacements les plus importants ont été enregistrés durant les saisons les plus humides principalement durant l'hiver 2003-2004. L'eau avec une pente de plus de 25 % sont les principales causes des glissements de terrain.

QUATRIEME PARTIE

ESSAIS DE MESURE DE L'INSTABILITE DES TERRAINS PAR LA GEODESIE

MESURES DE L'INSTABILITE PAR LA GEODESIE

Depuis longtemps la géodésie et la topographie étaient les seuls moyens de surveillance et de mesure des glissements de terrains et d'auscultation des ouvrages d'art. Bien après sont apparus d'autres méthodes avec d'autres moyens (Maquaire M. et Levoy F. 1987).

Les mesures de la dynamique de terrain se font par auscultation géodésique de chaque lieu. Cela demande à faire une recherche de points stables dans la région. Ces points doivent répondre à certains paramètres de façon à ne pas entraîner des erreurs engendrées par différents phénomènes connues par la géodésie et par l'instabilité de la région (Matichard Y. et Pillard J., 1997).

Ces points géodésiques qui serviront de base pour l'auscultation doivent être situés sur un terrain parfaitement stable (voir en Annexe pour chaque station la situation du point visé) et généralement sur un rocher et nettement situé (sommet, les antennes, les minarets, rles clochers, les hautes cheminées, etc.). A chaque endroit ausculté une série de points lui concernant doivent être visibles et non entachés par une réfraction. Cela demande à choisir le temps et le moment de la mesure .Une visibilité assez nette afin d'avoir des visées assez claires et les repères géodésiques ne possèdent pas de doute sur leur encadrement de lecture (Grimault F., 1977).

METHODES DE CALCUL

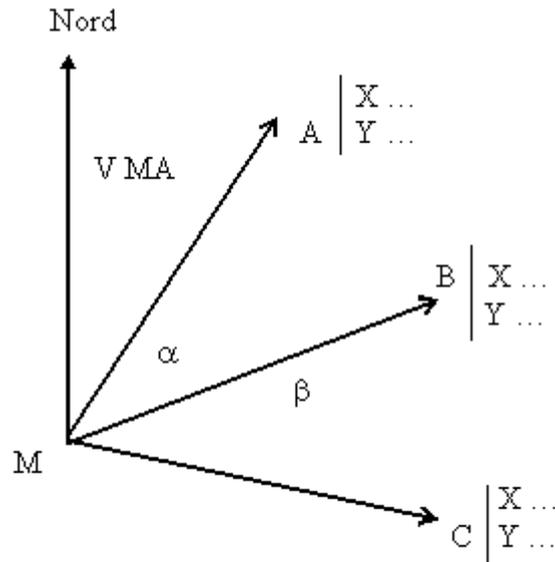
Pour vérifier la précision des résultats, on doit faire appel aux calculs avec une méthode d'ordre géodésique (triangulation). Le calcul doit se faire à l'aide de points géodésiques connus dans ce périmètre (Cf. en Annexe, le tableau de coordonnées délivrées par le service topographique du Cadastre Régionale de Constantine). Il existe trois méthodes de détermination des points par coordonnées : le Relèvement, l'Intersection, et le Recoupement (Fig. 18 et Fig. 19). La situation du point à connaître demande des conditions de visibilité et de stationnement. Le calcul d'un point par relèvement est la meilleure solution. Ils existent plusieurs méthodes de calcul d'un point par relèvement (Levallois J.J., 1978 ;Caillemer A. et Le Qoq C., 1983) :

- la méthode de Delambre
- le relèvement Italien
- la méthode de Gauss.

La plus pratique et la plus utilisée par les géodésiens est la méthode de Delambre.

Le calcul d'un point par relèvement par la méthode de Delambre.

Fig. 18 : Graphe des visées d'observations à partir d'un point M par Relèvement



M = Station du point à connaître

VAM = Gisement à calculer

VMB = Gisement MB

VMC = Gisement MC

α = angle fait avec les points A et B

β = angle fait avec les points A et C

A ,B , C = points connus en coordonnées

$$VMB = VMA + \alpha$$

$$VMC = VMA + \beta$$

$$\tan VAM = \frac{(XB - XA) \cdot \cotg \alpha - (XC - XA) \cdot \cotg \beta - (YB - YC)}{(YB - YA) \cdot \cotg \alpha - (YC - YA) \cdot \cotg \beta + (XB - XC)}$$

$$YM - YA = \frac{(XA - XB) - \tan VBM (YA - YB)}{\tan VBM - \tan VAM}$$

$$XM - XA = \tan VAM \cdot (YM - YA)$$

$$XM = XA \pm (XM - XA)$$

$$YM = YA \pm (YM - YA)$$

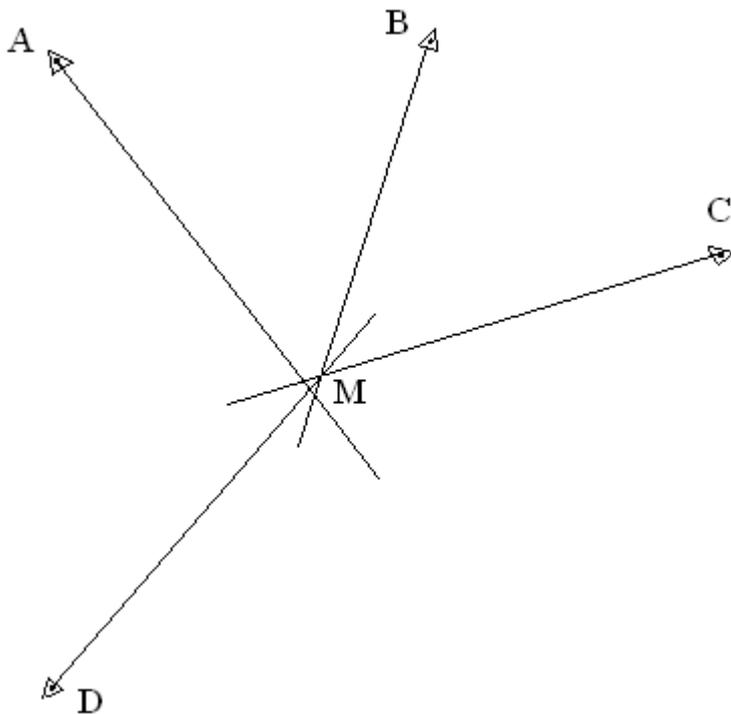
Principe de la méthode

Il consiste à stationner un point qu'on veut connaître en coordonnées et viser au minimum 03 (trois) points connus en coordonnées d'ordre géodésique (Fig. 18).

Les méthodes de calcul pour la détermination des coordonnées d'un point par intersection sont :

- méthode des triangles
- méthode des tangentes
- méthode des sinus et cosinus
- méthode par P et Q

Fig 19 Graphe des visées d'observation du point M par Intersection



A ,B,C,D, points connus en coordonnées ,
M, point à calculer par Intersection

Principe de la méthode

Il consiste à viser le point M à partir de points connus en coordonnées d'ordre géodésiques (minimum trois points) (Fig19). Le choix de la disposition de ces points est nécessaire quant à sa détermination.

D'autres conditions de mesures sont à respecter afin d'arriver à la précision demandée.

Dans notre travail aucun point n'a été calculé par Intersection ou par Recoupement par manque de visibilité. En général le calcul des points

situés en zone urbaine trouve souvent des difficultés d'emploi de méthodes autre que le Relèvement.

Des logiciels (dont STRADA, TOPOGIS, TOPOCAD, TOPOCOM, COVADIS) de topographie et de géodésie donnent les résultats de calculs de coordonnées de points définitifs soit par intersection, soit par relèvement ou par recoupement sans passer par le calcul de point approché.

Les avantages de la méthode géodésique de surveillance par rapport aux autres méthodes c'est que (Cf. Cours E.N.S.G 1979):

- pour les autres périodes de mesures nous utilisons la même base et le même réseau installé dans la première mesure réseau géodésique de l'INCT et des services topographiques du Cadastre ;
- les mêmes instruments avec le même personnel et la même procédure d'observation ;
- la méthode rendue facile et rapide grâce aux préparations de l'échantillon statistique et programme informatique de calcul de toutes les étapes ;
- les moyens utilisés ne sont pas onéreux et ne demandent pas l'intervention ou la sous-traitance d'aucune autre administration. Ils peuvent être remplacés par d'autres moyens de la même précision et plus perfectionnés avec le temps ;

- elle peut être généralisée pour tous les ouvrages de génie civil et pour les cas des pentes de terrain assujetti à un glissement, avec une amélioration de la méthode employée ;
- de la géométrie de réseau géodésique qui s'adaptera à la forme de l'ouvrage pour sa surveillance.

Le seul inconvénient, c'est le besoin de l'assistance de personnels compétents en matière de topographie pour l'appréciation des observations et de l'aptitude du terrain aux moments des mesures.

Un minimum de trois (03) points encadrants les repères d'auscultation constituent des repères qui doivent être placés de manière à avoir une nette intersection des visées, cela pour éviter la création de chapeaux (zone d'erreurs) .Des répétitions d'observations dans la même journée sont indispensables et obligatoires. Ces répétitions de mesures seront déterminées scientifiquement par calculs statistiques donnant le nombre minimum à ne pas dépasser afin d'atteindre à une précision voulue.

L'instabilité de l'endroit donne aux constructions une dynamique particulière qui dépend de leur poids, de leur base d'assise et de leur hauteur (nombre d'étages). Il y a ceux qui se tassent, ceux qui perdent leur verticalité, ceux qui pivotent autour d'un axe et aussi ceux qui subissent deux moments ou encore les trois moments. Cela explique la nécessité des observations spécifiques pour déceler la moindre sensibilité d'un ouvrage ou d'un lieu géométrique. D'autres données de sensibilité sont montrées par des différences d'écart angulaire sur le

même point visé et de différences d'écart altimétrique ; ce sont des mesures suite à une référence d'origine.

LES OBSERVATIONS DE TERRAIN

Détermination du nombre de lectures

Le nombre de points à prendre sur le terrain, la précision demandée les différentes types d'erreurs existantes en mesures topographiques ont fait qu'une technique d'observation est mise en place pour les travaux de ce genre appelé : « triangulation pour travaux géodésiques ». On procède par observation de tour d'horizon.

La technique de mesure d'une lecture est liée avec la précision demandée qui dépend :

- de l'instrument utilisé (précision de l'instrument donné par le constructeur),

- des conditions atmosphériques (température, visibilité, moment de la mesure),

- du lieu de la mesure,

- de l'observateur,

- de la distance de l'objet à viser,

- de la netteté de l'objet à viser (forme, clarté).

En tenant compte de tous ces facteurs, on détermine le nombre de lectures qui donnera le nombre de tours d'horizon. La tolérance admissible entre deux lectures consécutives du même point appelé pointé est de 12 dmG (décimiligrade) = 0.0012 grade ; à la fermeture de chaque tour d'horizon, la tolérance est de 30 dmG = 0.0030 grade.

Détermination de l'échantillonnage

Pour la mesure d'un échantillon il faut moins de 10 lectures par point. Pour une population il faut plus de 30 lectures par point (Kazmier L.J., 1982).

Une série de tours d'horizon comporte 4 tours ; pour chaque tour les conditions d'observations doivent être respectées ; pour chaque point visé 4 pointés sont à exécuter ; et donc au total la série aura 16 lectures. Deux séries feront 32 lectures, la taille d'une population demande 33 prises, pour plus de sécurité on fera 01 tour en plus, donc on aura 09 tours d'horizon qui donneront 36 lectures pour chaque point de mesure (Cf. Annexe). On est au-delà de la taille d'une population.

Choix de l'instrument de mesure

Puisque la précision demandée oblige à avoir le dmG (0.0001grade).

En cascade d'erreur :

0.01gr (grade)	à 100 m	donne	15,7 mm
0.001gr	à 100 m	donne	1,57 mm
0.0001gr	à 1 km	donne	1,57 mm

La transmission d'erreur dans les séries de calculs augmente rapidement (propagation de l'erreur) (Bougeatre P., 1977), puisque l'on prend comme donnée un résultat entaché d'erreurs qu'on ne peut pas éliminer. On sait simplement que l'erreur est dans la tolérance. Pour que l'erreur soit minimum au niveau de la mesure on prendra l'instrument le plus précis et le plus adaptable.

Le théodolite universel T 2 de Wild (Fig. 20) convient parfaitement aux mesures géodésiques ; l'erreur moyenne quadratique (emq) donnée par le constructeur pour cet instrument est de 7 dm_g (000.0007gr).

En augmentant le nombre d'observations, on constate une meilleure précision de l'instrument.

Fig. 20 : Instrument topographique T2 Universel WILD avec lecture
angulaire micrométrique à (0.0001 grade).



CALCULS STATISTIQUES

Prise de l'échantillon topographique

Un nombre important de mesures a été fait avant de procéder aux observations géodésiques de chaque site. Sur une station quelconque des sites, avec l'instrument topographique T 2, cent (100) observations ont été faites pour la détermination de l'échantillon statistique de travail (Tab. 4) (Kazmier L.J., 1982) .

Ces mesures sont de l'ordre de 6 séries de tour d'horizon plus un tour. Elles ont été faites suivant la réglementation des observations géodésiques.

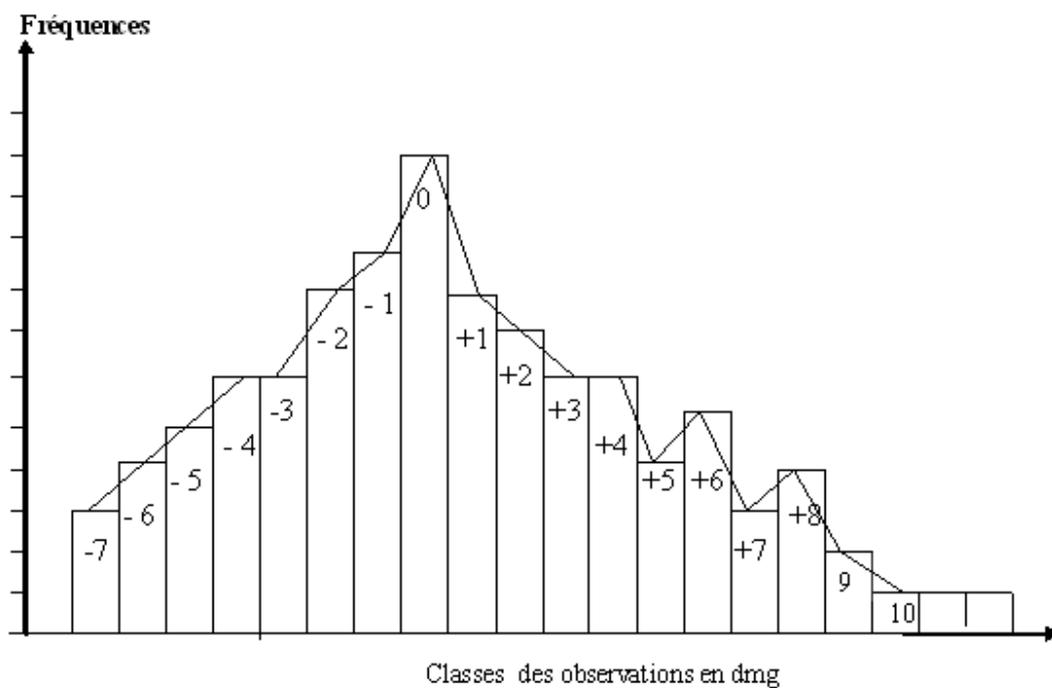
Tab : 4 Observations de terrain de l'échantillon

399.9993	399.9997	399.9999	000.0002	000.0005
.9993	.9997	000.0000	.0002	.0005
<u>.9993</u>	.9997	.0000	.0002	<u>.0005</u>
.9994	<u>.9997</u>	.0000	.0002	.0006
.9994	.9998	.0000	.0002	.0006
.9994	.9998	.0000	.0002	.0006
<u>.9994</u>	.9998	.0000	<u>.0002</u>	.0006
.9995	.9998	.0000	.0003	.0006
.9995	.9998	.0000	.0003	<u>.0007</u>
.9995	.9998	.0000	.0003	.0007
.9995	.9998	.0000	.0003	<u>.0007</u>
<u>.9995</u>	.9998	.0000	.0003	.0008
.9996	<u>.9999</u>	<u>.0001</u>	<u>.0003</u>	.0008
.9996	.9999	.0001	.0004	.0008
.9996	.9999	.0001	.0004	.0008
.9996	.9999	.0001	.0004	<u>.0009</u>
.9996	.9999	.0001	.0004	<u>.0009</u>
<u>.9996</u>	.9999	.0001	.0004	.0010
.9997	.9999	.0001	.0004	<u>.0011</u>
.9997	.9999	.0001	<u>.0005</u>	<u>.0012</u>

Représentation des observations : Construction de l'histogramme

La distribution des observations est représentée sous formes de barres ou de polygones (Fig. 21).

Fig. 21 : Histogramme de distribution en classes et fréquences



3	4	5	6	6	8	9	11	8	7	6	6	4	5	3	4	2	1	1
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Tableau de calcul

L'analyse des observations qui servira à calculer les éléments statistiques est représenté dans le tableau suivant (Tab. 5).

Tab. 5 : Présentation des calculs préparatoires des éléments statistiques

lectures x_i	nombres f	$f x_i$	$(x_i - \bar{x})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$f(x_i - \bar{x})^2$
-7	3	-21	-8	64	192
-6	4	-24	-7	49	196
-5	5	-25	-6	36	180
-4	6	-24	-5	25	150
-3	6	-18	-4	16	96
-2	8	-16	-3	9	72
-1	9	-9	-2	4	36
0	11	0	-1	1	11
1	8	8	0	0	0
2	7	14	1	1	7
3	6	18	2	4	24
4	6	24	3	9	54
5	4	20	4	16	64
6	5	30	5	25	125
7	3	21	6	36	108
8	4	32	7	49	196
9	2	18	8	64	128
10	1	10	9	81	81
11	1	11	10	100	100
12	1	12	11	121	121
	$\Sigma = 100$	$\Sigma = 81$			$\Sigma = 1941$

Calcul des éléments statistiques

*Moyenne arithmétique de l'échantillon

$$\xi = \frac{\sum Xi}{n} = \frac{81}{100} = + 0.81 = + 1 \text{ dmg} = 000.0001 \text{ grade}$$

Avec : ξ = moyenne arithmétique

X = observation de terrain

i = 1...n

n = nombre d'échantillons

* Variance de l'échantillon

$$\text{Var} = S^2 = \frac{\sum fi(Xi - \bar{X})^2}{n-1} = \frac{1941}{99} = 19.606$$

* Ecart type

$$S = \sqrt{S^2} = \sqrt{19.606} = 4.42 \text{ dmg} \\ = 000.0004 \text{ grade}$$

* Loi normale avec un taux de confiance tc = 95 % , 99 % , 99.5

% .

Les tables de Gauss donnent les valeurs pour :

$$95 \% = 1.96$$

$$99 \% = 2.58$$

$$99.5 \% = 2.81$$

La probabilité avec un niveau de confiance :

$$K = \frac{tc.Cv}{\sqrt{n}}, \text{ avec } Cv = \frac{S}{\xi}$$

Avec : tc = niveau de confiance

Cv = coefficient de variation

S = écart type

ξ = moyenne arithmétique

n = nombre d'échantillons

$$\text{- de 95 \% : } K = \frac{1.96(4.42/0.81)}{10} = 1.06 = 000.0002 \text{ grade}$$

$$\text{- de 99 \% : } K = \frac{2.58(4.42/0.81)}{10} = 1.41 = 000.0002 \text{ grade}$$

$$\text{- de 99.5 \% : } K = \frac{2.81(4.42/0.81)}{10} = 1.53 = 000.0002 \text{ grade}$$

*** Intervalle de confiance à une distribution normale centrée**

réduite

$$IC = \xi \pm K = 1 \pm 2dmg$$

$$= -1 \text{ à } +3 \text{ dmg}$$

$$= 399.9999 \text{ à } 000.0003 \text{ grades}$$

*** Détermination de la taille de l'échantillon n avec $\xi = 0.4$**

$$\text{d'ou } E = 0.4$$

$$(n) = \left[\frac{tc.S}{E} \right]^2 = \left[\frac{(2.81)(0.81)}{0.4} \right]^2 = 32.4 = 33 \text{ obs}$$

Les statistiques montrent que plus le nombre de lectures est élevé, plus on se rapproche de la mesure vraie (Boutabia M., 1999). La taille d'une population est atteinte puisque les calculs statistiques ont donné 33 observations pour chaque point.

Application de l'erreur moyenne quadratique

En topographie, la notion de l'erreur moyenne quadratique (emq) est très pratique parce qu'elle donne l'avantage de mieux tenir compte des fortes erreurs.

L'emq est la racine carrée de la moyenne des carrés des erreurs commises sur le nombre de mesures :

$$l'emq = \pm \sqrt{\frac{\sum e^2}{n}}$$

e = erreur sur la lecture de l'observation

n = nombre de lectures : 100 lectures (échantillons)

$$l'emq = \pm \sqrt{\frac{1941}{n}} = \pm 4.4 \text{ dmg}$$

dmg = décimilligrade = 000.0001 grade

Si la valeur mesurée n'est pas connue, la formule de l'emq devient

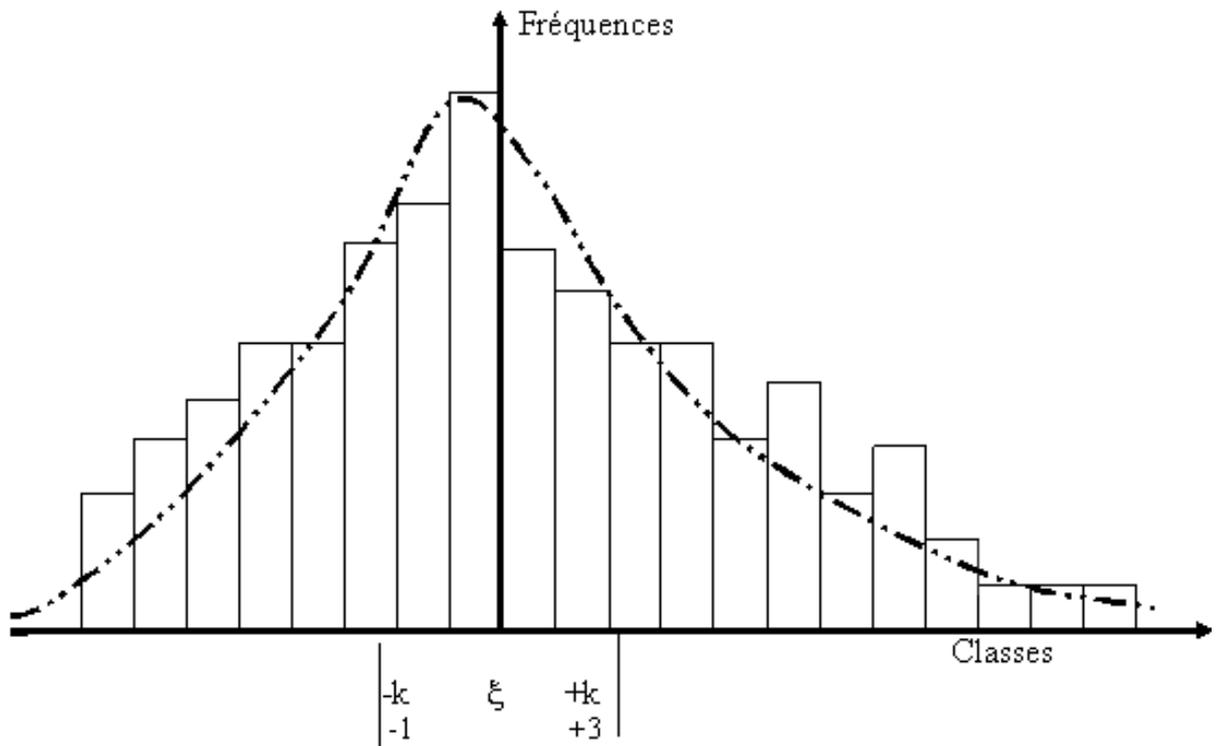
$$l'emq = \pm \sqrt{\frac{\sum e^2}{n-1}} = \pm 4.42$$

On remarque que l'emq a la même valeur que l'écart type.

Construction de la courbe de Gauss (courbe des fréquences)

La courbe des fréquences est représentée par un lissage du polygone de fréquences, si elle se présente sous la forme d'une courbe de distribution normale de probabilité, on dira qu'elle obéit à une loi normale. C'est une distribution normale centrée réduite, appelée courbe de Gauss (Fig. 22).

Fig. 22 : Représentation de la courbe de Gauss



Valeurs angulaires horizontales

L'analyse statistique a donné l'intervalle de confiance afin de cerner la tranche d'observation à prendre en considération ; les observations de tour d'horizon sont jointes en Annexe. Chaque station a fait l'objet

d'un traitement statistique. Les tableaux (**Tab 6, Tab 8, Tab 10**) des 3 sites donnent les récapitulatifs des valeurs angulaires horizontales pour chaque station et ses points visés.

Les calculs statistiques montrent que plus le nombre de lectures est élevé, plus on se rapproche de la mesure vraie ; la valeur 0 possède le nombre de lectures le plus élevé.

ETUDES GEODESIQUES DES GLISSEMENTS

Chaque site a fait l'objet d'une attention particulière ; et sur la base d'une série de documents dont ceux de localisation de la station de lecture, de la période de l'observation, d'observations de terrain, de la prise de photographies et de calculs, il a été dressé une fiche signalétique pour chacun des sites (Azimi C. Desvareux P., 1986).

Présentation de la fiche signalétique de chacun des trois sites

1-Le site du Bardo :

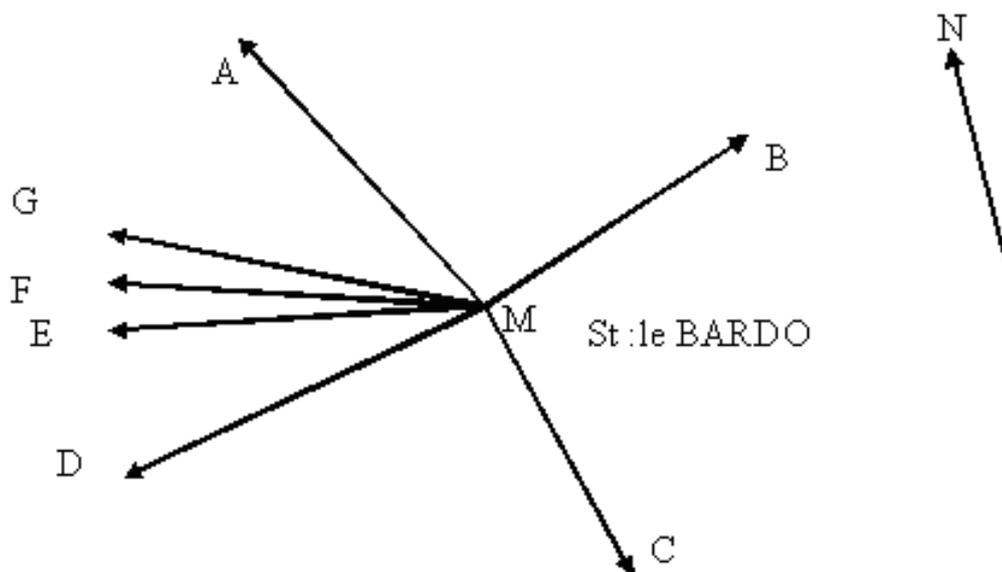
Le site de l'abattoir est situé sur l'avenue Rahmani Achour parallèle à l'oued Rhumel, un endroit très glissant. Cette avenue est de temps en temps remblayée par du tout venant pour rattraper le niveau de la route très fréquentée par les passants. Elle permet de désengorger le centre ville qui est tout proche.

De cette station en tour d'horizon (Cf. Annexe), j'ai pu viser les points suivants (Fig. 23):

1) Observations de terrain

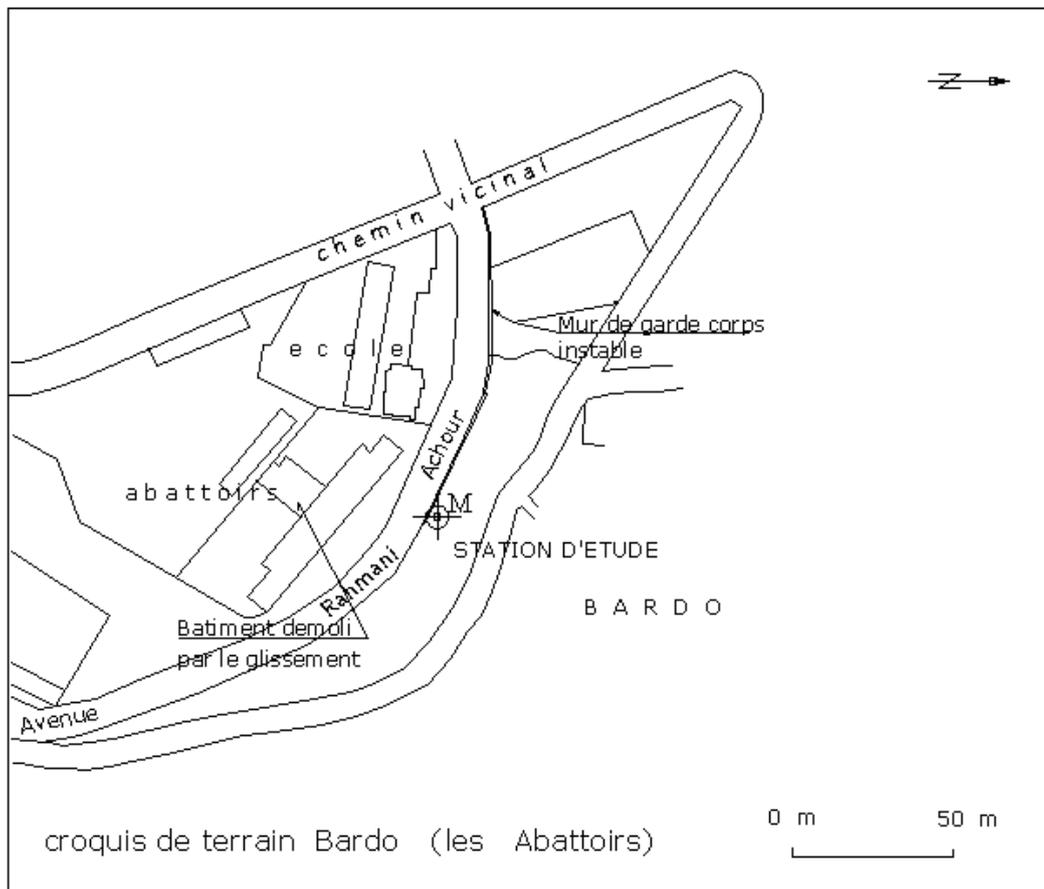
- Sainte Marie tripode point géodésique du 3^{ème} ordre
- El M'ridj : point géodésique du 3^{ème} ordre
- Angle bâtiment abattoir
- Angle clôture CEM
- Minaret du BARDO point géodésique du 5^{ème} ordre
- Minaret du M'cid point géodésique du 5^{ème} ordre
- Angle caserne point géodésique du 5^{ème} ordre

Fig. 23 : Points visées de la station BARDO



2) Situation de la station d'observation (Fig. 24)

Fig. 24 : Croquis de terrain du site BARDO (Les Abattoirs)



3) Récapitulatif des observations angulaires azimutales

Après le traitement des lectures d'observations angulaires horizontales des tours d'horizon (Cf. Annexe), par la réduction à zéro, le calcul de la moyenne des lectures de chaque point visé et le respect de la tolérance entre chaque lecture et chaque pointé du même point les lectures finales angulaires sont portées sur la tableau récapitulatif suivant (Tab. 6).

Tab. 6 : Station le Bardo : Tableau des observations angulaires azimutales

Station : Le Bardo			
Points visés ↓	Lectures 20.05.04	Lectures 29.09.04	Lectures 15.10.05
A : Sainte Marie (tripode)	000.0000	000.0000	000.0000
B : El Mridj	127.5528	127.5419	127.5381
C : Angle Abattoir	208.7792	208.7728	208.7765
D : Angle Clôture CEM	331.7950	331.7870	331.7839
E : Minaret du Bardo	347.2502	347.2411	347.2383
F : Minaret du Mcid	351.8370	351.8284	351.8263
G : Angle Caserne	353.8320	353.8263	353.8234

4) Récapitulatif des calculs de coordonnées

Le calcul des coordonnées a été fait par deux logiciels, Topocad et Caltop, en prenant à chaque fois qu'il est possible une lecture différente donc au minimum deux fois. Les résultats des logiciels est le même au millimètre près, le récapitulatif des résultats des coordonnées est porté sur le tableau suivant (Tab 7).

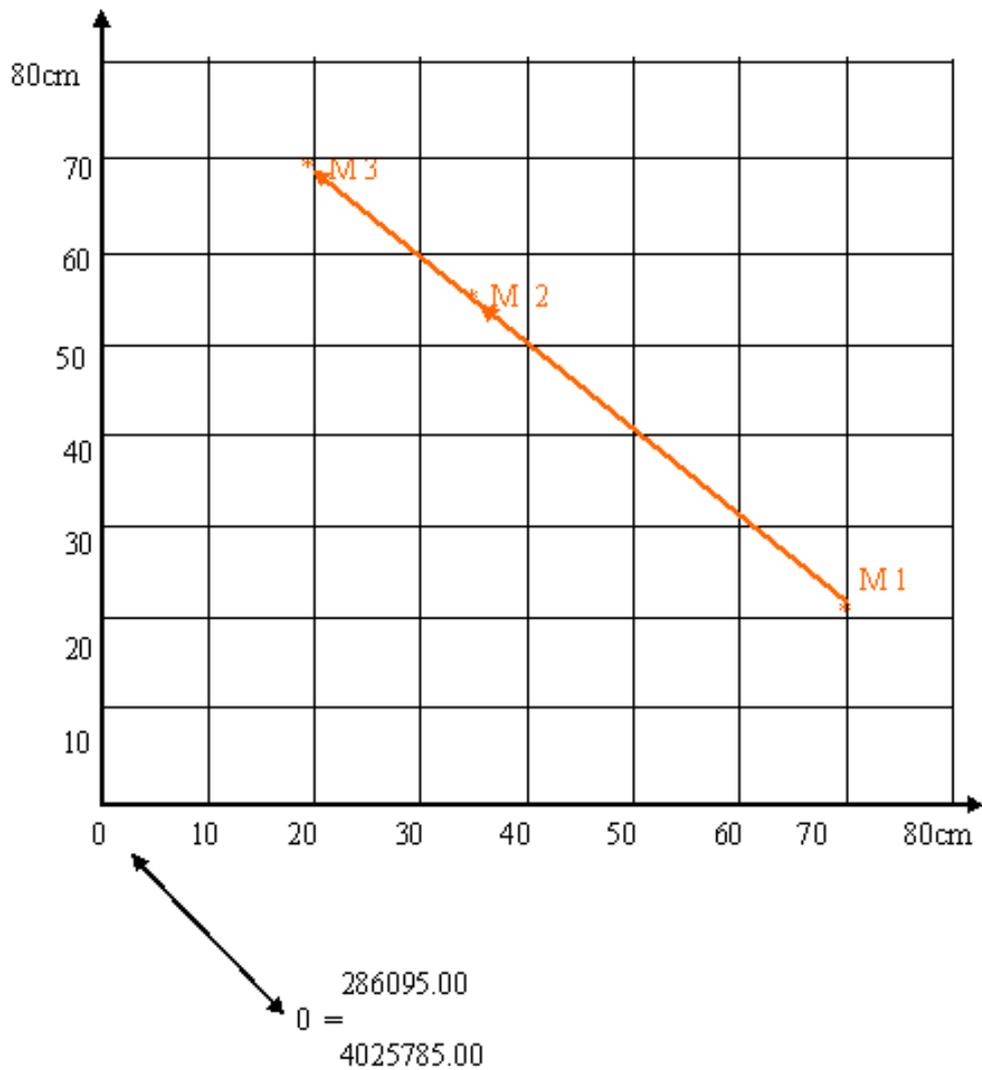
Tab. 7 : Tableau des différentes coordonnées de la station du Bardo

Station : le Bardo		
Périodes	X	Y
20.05.04	286095.792	4025785.204
29.09.04	286095.349	4025785.560
15.10.05	286095.190	4025785.699

5) Graphe de déplacement du point de station

Les résultats de calcul des coordonnées du point M des différentes périodes ont été représentés sur un graphe afin de bien apprécier le déplacement et d'en tirer des conclusions (Fig. 25).

Fig. 25 : Graphe de déplacement du point M sur le site du BARDO



- M 1, M 2, M 3 : sens du déplacement de la station sur sol instable en ligne droite
- Ce site a enregistré 78,5cm de déplacement en 18 mois

6) photographies du site instable

Fig. 26 a : Avenue Rahmani Achour avec garde corps affaissé

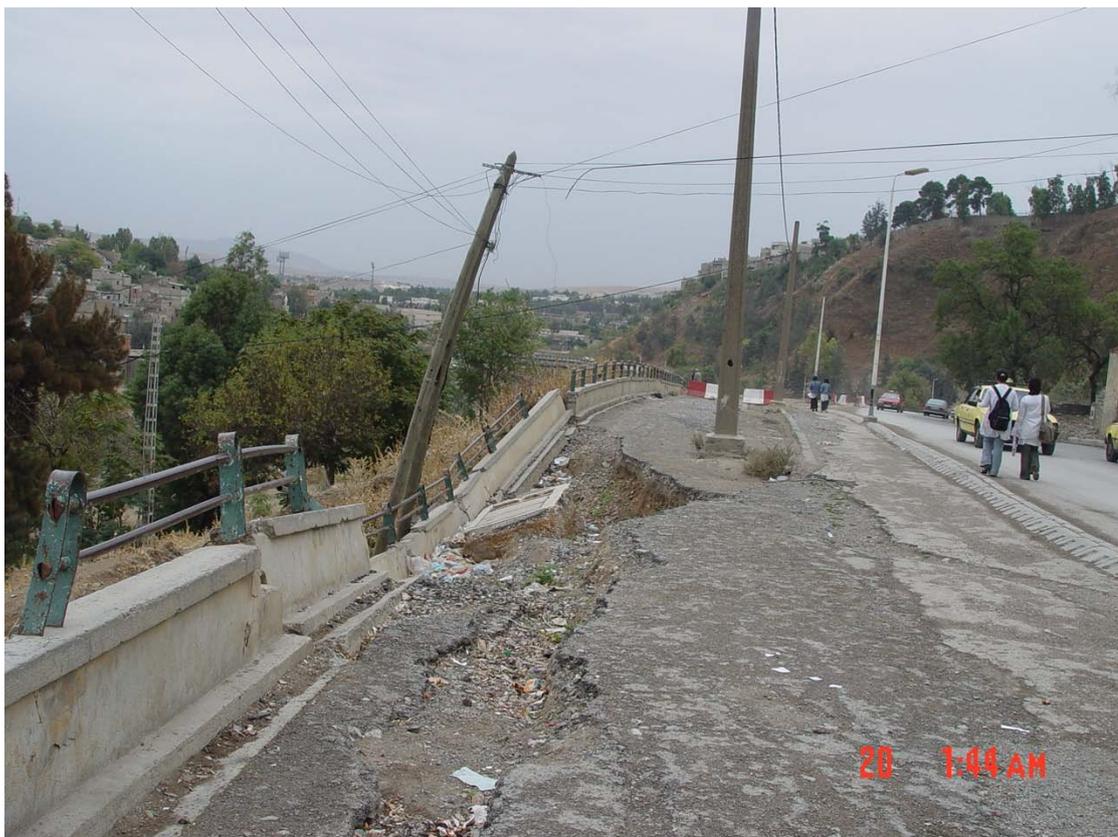


Fig. 6 b : Avenue Rahmani Achour avec l' Abattoir en ruine



Fig. 26 c : Avenue Rahmani Achour avec le remblai de remise à niveau



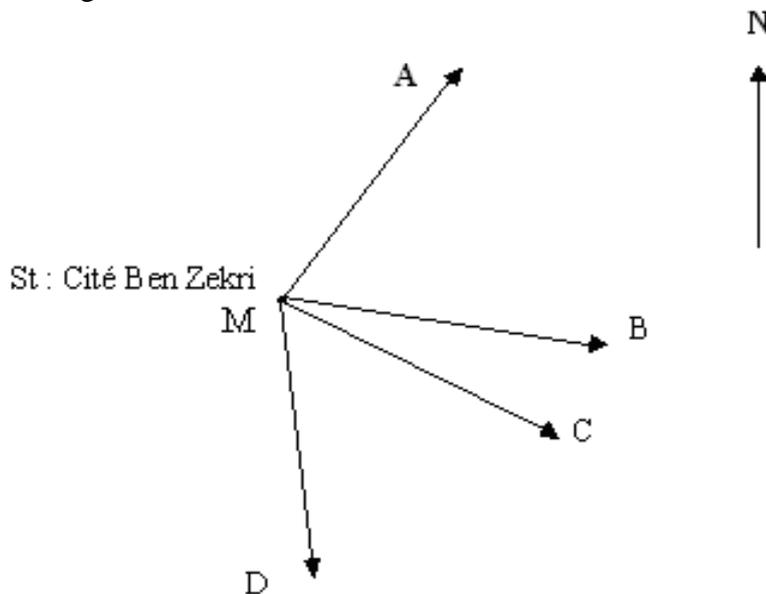
2-Le site de la Cité du 05 Juillet (Ben Zekri)

La station de la Cité du 05 Juillet (Ben Zekri) est située sur le trottoir d'une rue de ce quartier (Fig. 28) sur le haut du talus de la Route Nationale 5. De cette station en tour d'horizon (Cf. Annexe), j'ai pu viser les points suivants (Fig. 27) :

1) Observations de terrain :

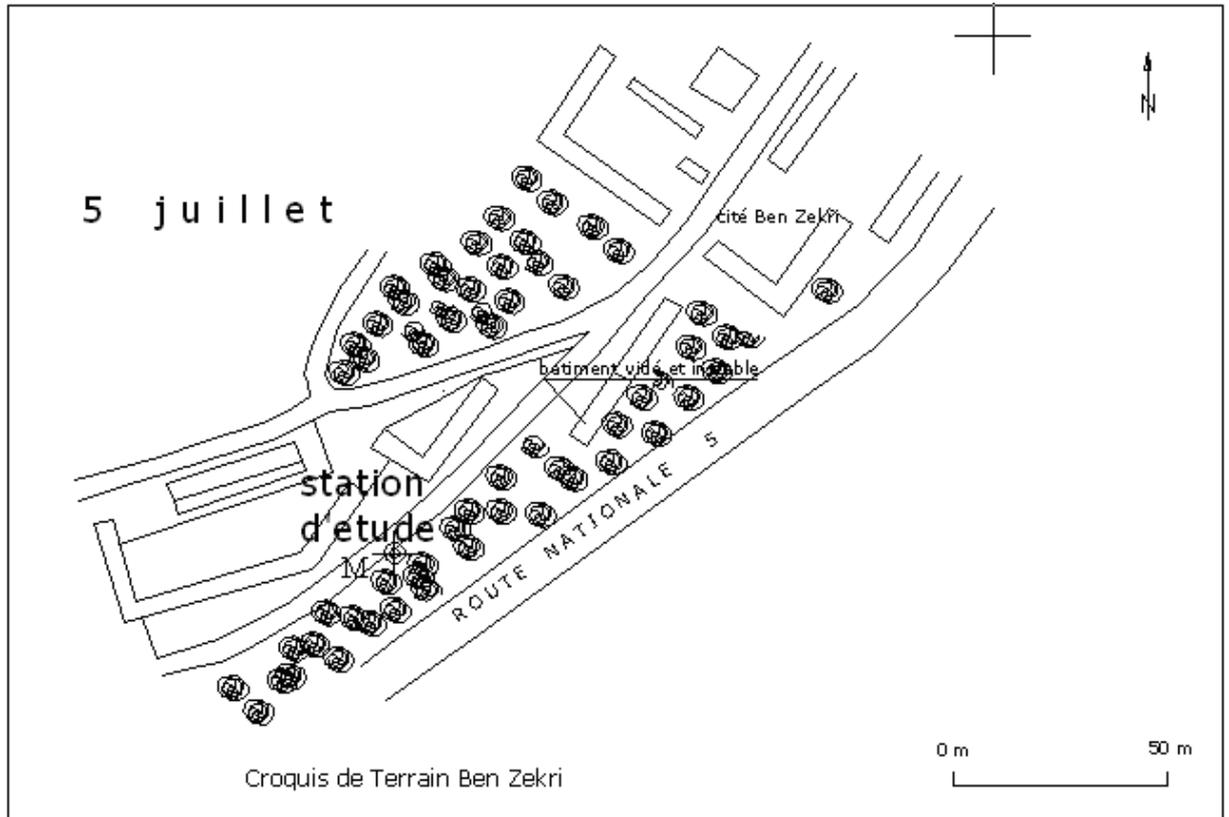
- le minaret sud de l'Institut Islamique point géodésique du 5^{ème} ordre,
- l'angle du bâtiment instable,
- la tour université point géodésique du 5^{ème} ordre
- l'Institut d'Architecture point géodésique du 5^{ème} ordre.

Fig 27 Points visés de station Ben Zekri



2) Situation de la station d'observation (Fig.28) :

Fig. 28 : Croquis de terrain de la station de Ben Zekri (Cité du 05 Juillet)



3) Récapitulatif des observations angulaires azimutales

Après le traitement des lectures d'observations angulaires horizontales des tours d'horizon (Cf. Annexe), par la réduction à zéro, le calcul de la moyenne des lectures de chaque point visé et le respect de la tolérance entre chaque lecture et chaque pointé du même point, les lectures finales angulaires sont portées sur la tableau récapitulatif suivant (Tab. 8).

Tab. 8 : Tableau des observations angulaires azimutales : site de Ben Zekri
(Cité du 05 Juillet).

Station : cité benzekri ↓ Points visés	Lectures Date: 15/10/04	Lectures Date: 05/01/05	Lectures Date: 20/03/06
A : Minaret Sud	000.0000	000.0000	0.0000
B : Angle Et instable	074.2133	074.2050	074.2225
C : Tour Université	095.2010	095.1915	095.2129
D : Institut d'Architecture	153.4622	153.4573	153.4745

4) Récapitulatif des calculs de coordonnées

Le calcul des coordonnées a été fait par deux logiciels, Topocad et Caltop, en prenant à chaque fois qu'il est possible une lecture différente donc au minimum deux fois, les résultats des logiciels est le même au millimètre près. Le récapitulatif des résultats des coordonnées est porté sur le tableau suivant (Tab. 9).

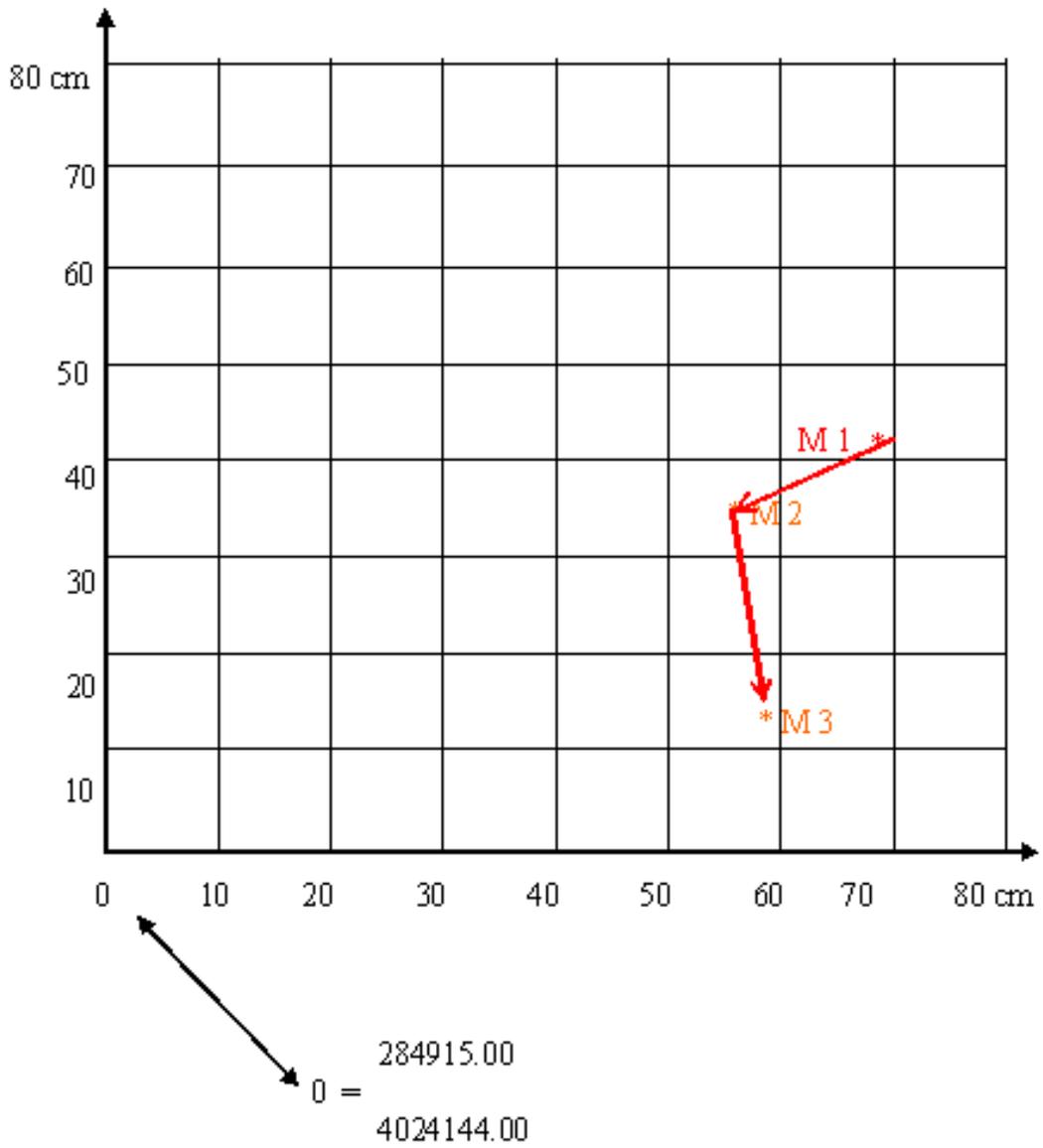
Tab. 9 : Tableau des différentes coordonnées de la station du site Ben Zekri (Cité du 05 Juillet)

Station : Cite Ben Zekri		
Périodes	X	Y
15. 10. 04	284915.696	4024144.415
05. 01. 05	284915.565	4024144.344
20. 03. 06	284915.589	4024144.142

5) Graphe de déplacement du point de station

Les résultats de calcul des coordonnées du point M des différentes périodes ont été représentés sur un graphe afin de bien apprécier le déplacement et d'en tirer des conclusions (Fig. 29).

Fig. 29 : Graphe de déplacement du point M du site de Ben Zekri
(Cité du 05 Juillet)



M 1, M 2, M 3 sens du déplacement du sol instable en ligne droite
-Ce site a enregistré plus de 30 cm de déplacement en 18 mois

6) Prise de photographies du site instable (Fig. 30a et 30b)

Fig. 30 a : une partie du bâtiment se détache, le joint sec s'élargit avec le temps (11 cm)



Fig. 30 b : Le joint sec de la bâtisse qui s'élargit encore plus (15 cm),
soit un élargissement de 4cm en plus en 18 mois



3) Le site de Belle Vue

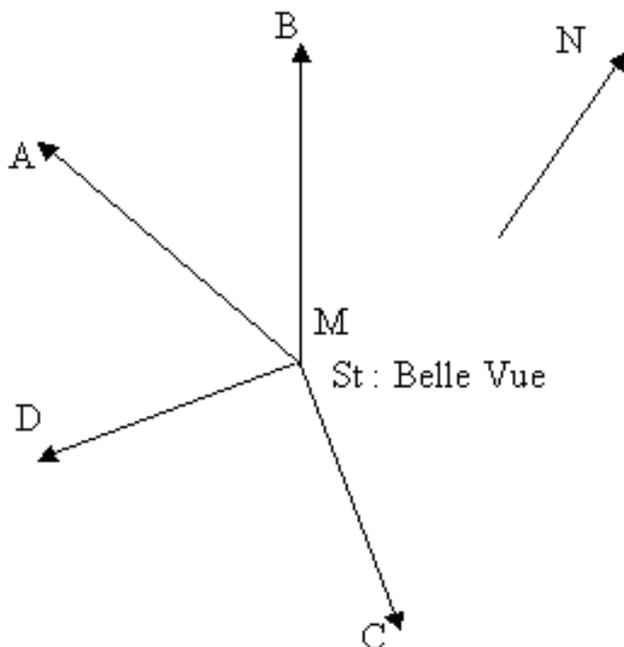
La station de Belle Vue est située dans le parc de l'Institut Islamique en bas du talus du côté sud du quartier Bellevue.

1) Observations de terrain (Fig. 31)

De cette station en tour d'horizon (Cf. Annexe), j'ai pu viser les points suivants :

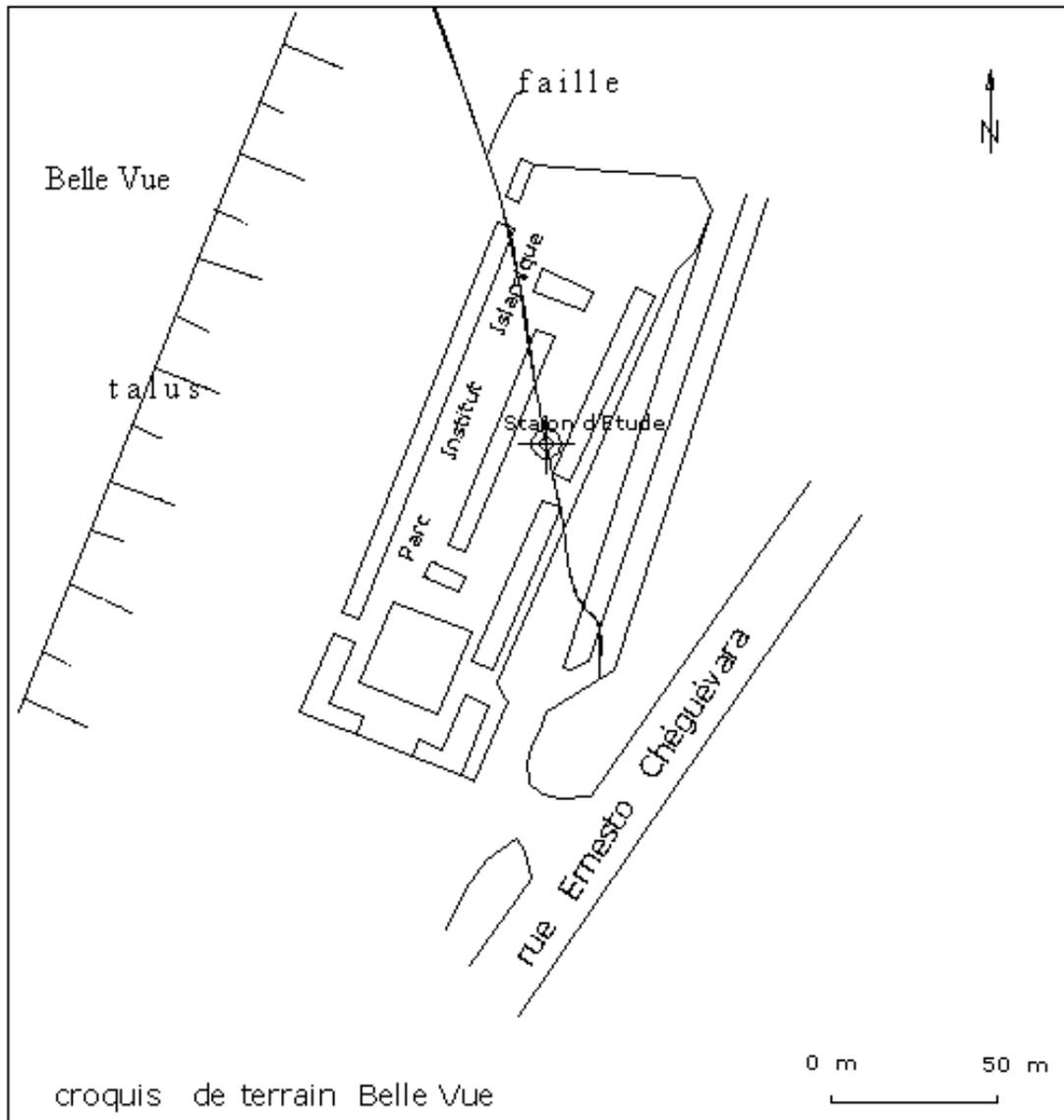
- Tour Université point géodésique du 5^{ème} ordre
- Minaret sud de l'Institut Islamique point géodésique du 5^{ème} ordre
- Minaret Bellevue point géodésique du 5^{ème} ordre
- Antenne radio point géodésique du 3^{ème} ordre

Fig. 31 : Points visés de la station Belle Vue



2) *Situation de la station d'observation (Fig.32)*

Fig. 32 : Croquis de terrain de la station de Belle Vue



3) *Récapitulatif des observations angulaires azimutales*

Après le traitement des lectures d'observations angulaires horizontales des tours d'horizon (Cf. Annexe), par la réduction à zéro, le calcul de la moyenne des lectures de chaque point visé et le respect de la tolérance entre chaque lecture et chaque pointé du même point, les lectures finales angulaires sont portées sur la tableau récapitulatif suivant (Tab. 10).

Tab. 10 : Tableau des observations angulaires azimutales de la station Belle Vue

Station : Belle Vue			
Points visés ↓	Lectures	Lectures	Lectures
	Date:21/05/04	Date: 30/09/04	Date: 05/10/05
A :Tour Université	000.0000	000.0000	000.0000
B :Minaret Sud	74.0898	74.0937	74.0925
C :Minaret Belle Vue	248.3874	248.3923	248.3987
D :Antenne Radio	319.7155	319.7195	319.7222

4) *Récapitulatif des calculs de coordonnées*

Le calcul des coordonnées a été fait par deux logiciels, Topocad et Caltop, en prenant à chaque fois qu'il est possible une lecture différente donc au minimum deux fois, les résultats des logiciels est le même au millimètre près. Le récapitulatif des résultats des coordonnées est porté sur le tableau suivant (Tab 11).

Tab. 11 : Tableau des différentes coordonnées de la station de Belle Vue

Station : Belle Vue		
Périodes	X	Y
21.05.04	285639.881	4023900.830
30.09.04	285639.922	4023900.788
05.10.05	285640.035	4023900.774

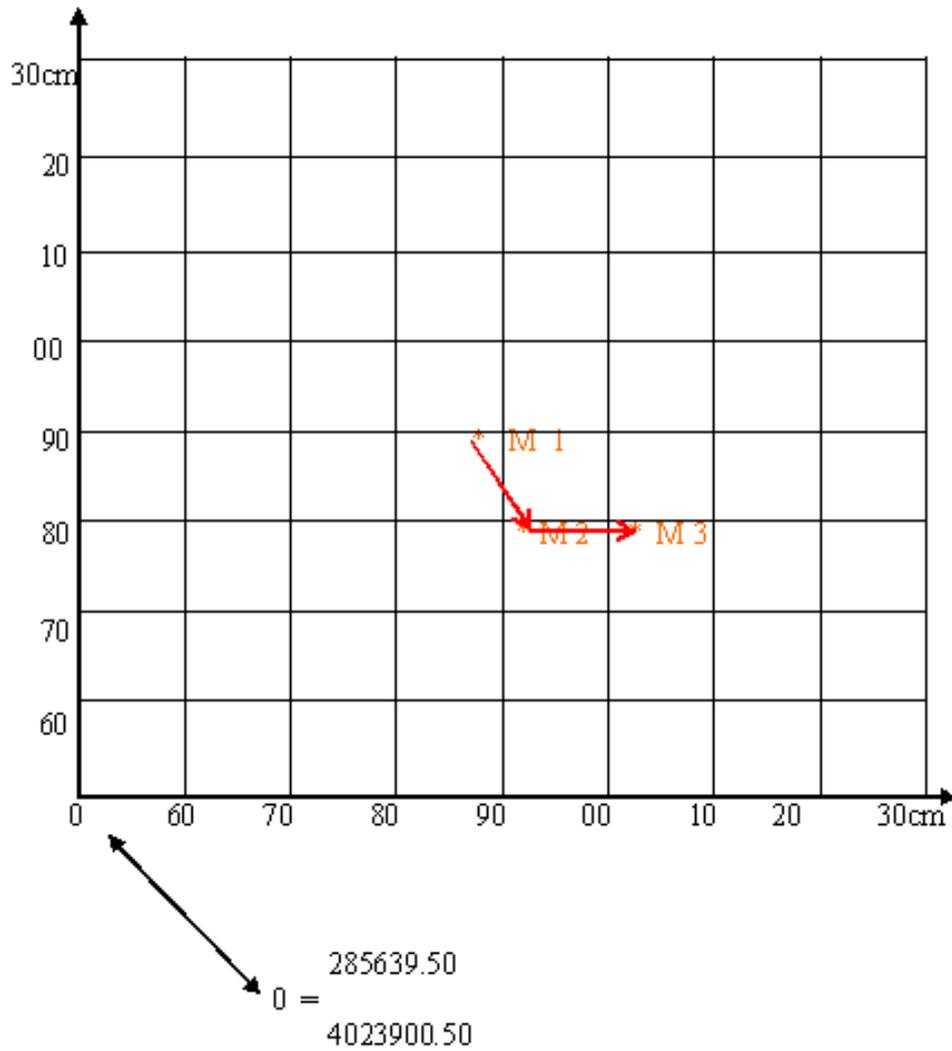
5) Graphe de déplacement du point de station

Les résultats de calcul des coordonnées du point M des différentes périodes ont été représentés sur un graphe afin de bien apprécier le déplacement et d'en tirer des conclusions (Fig. 33).

6) photographies du site instable (Fig.34a, 34b, 34c)

Le glissement de ce site est plutôt vertical sur les photographies et horizontale par les calculs géodésiques. Ce terrain est couvert par un revêtement en bitume et la cicatrice causée par le glissement ne peut reprendre une autre forme. Le terrain est très favorable à l'appréciation du glissement.

Fig. 33 : Graphe de déplacement du point M du site de Belle Vue



- M 1, M 2, M 3 sens du déplacement du sol instable en ligne brisée
- Ce site a enregistré 15,5cm de déplacement horizontale et 6.5cm en affaissement vertical en 18 mois.

Fig. 34 a : Le déplacement est vertical de 10cm comme le montre le mètre à ruban ; la faille est colmatée par du mortier.



Fig. 34 b : Le déplacement est vertical de 15. cm ; la faille a été caché par une autre couche de mortier au ciment.



Fig. 34c : Le déplacement est verticale de 16.5 cm, la faille ne s'arrête pas et le glissement s'enfonce encore plus.



Fig. 34 d : En premier plan, le prolongement du glissement d'où l'on remarque le remplissage des failles qui ne cessent de s'arrêter ; en second plan le minaret de cité Belle Vue



CONCLUSION

Les résultats ont montré que durant les périodes humides, la dynamique des terrains est plus importante que durant les périodes sèches. Cela signifie que c'est l'eau des pluies qui en est la cause. Les méthodes utilisées pour les mesures le prouvent.

Comparons les valeurs trouvées par les trois méthodes utilisées et tirons les rapprochements aux mêmes endroits de mesure.

Le glissement du 5 juillet :

-le déplacement mesuré par l'inclinométrie est de **36 cm** en 20 mois ;

-le déplacement apporté par les mesures géodésiques est de **plus de 30 cm** en 18 mois ;

-le déplacement pris par photographies sur le bâtiment instable est de **5 cm** en 18 mois (Fig. 29).

On remarque que les déplacements inclinométriques et géodésiques ont à peu près les mêmes valeurs. Alors que le déplacement pris par photographie a une valeur nettement inférieure ; ici il faut préciser que les prises de vue ont été faites sur un élément ancré dans le sol qui est la bâtisse et que cet élément a une charge très importante, ce qui ralentit la dynamique du terrain mais n'empêche que le glissement a eu et il très inquiétant.

Le sens des glissements de terrain est, pour chacune des stations, dirigé vers l'oued Rhumel (Fig. 36). Tous les points sont situés sur la plateforme d'un talus. Pour la station Bardo c'est le talus de l'oued Rumel ; pour la station Ben Zekri c'est le talus de la Route Nationale 5 ; et pour la station Belle Vue c'est le talus de la rue Ernesto Che Guevara. Il faut préciser que tous les terrains sont situés sur des pentes de plus de 25% ; toutes les pentes sont dirigées vers l'oued Rhumel (Matichard Y. et Pillard J .1997 ; Millies-Lacroix A., 1981).

Le glissement de Bardo

C'est le secteur qui a connu le plus fort déplacement avec plus de 78cm (Fig 25) pour la même période. Il est un site de glissement d'ampleur considérable ; de temps à autre les services des voiries remblaient et compensent le niveau de la route (Avenue Rahmani Achour) (Fig. 6). Actuellement la voie est devenue impraticable car un important tronçon s'est détaché de la plateforme de la route.

Fig. 35 : Avenue Rahmani Achour : un glissement sur la voie remblayé par du tout venant.



Le glissement de Belle Vue

Il correspond à un déplacement beaucoup plus en vertical. Il est le plus faible des glissements étudiés, avec 15.5cm en horizontal (calcul géodésique) (Fig. 33) et environ 6.5cm en vertical (Fig. 34).

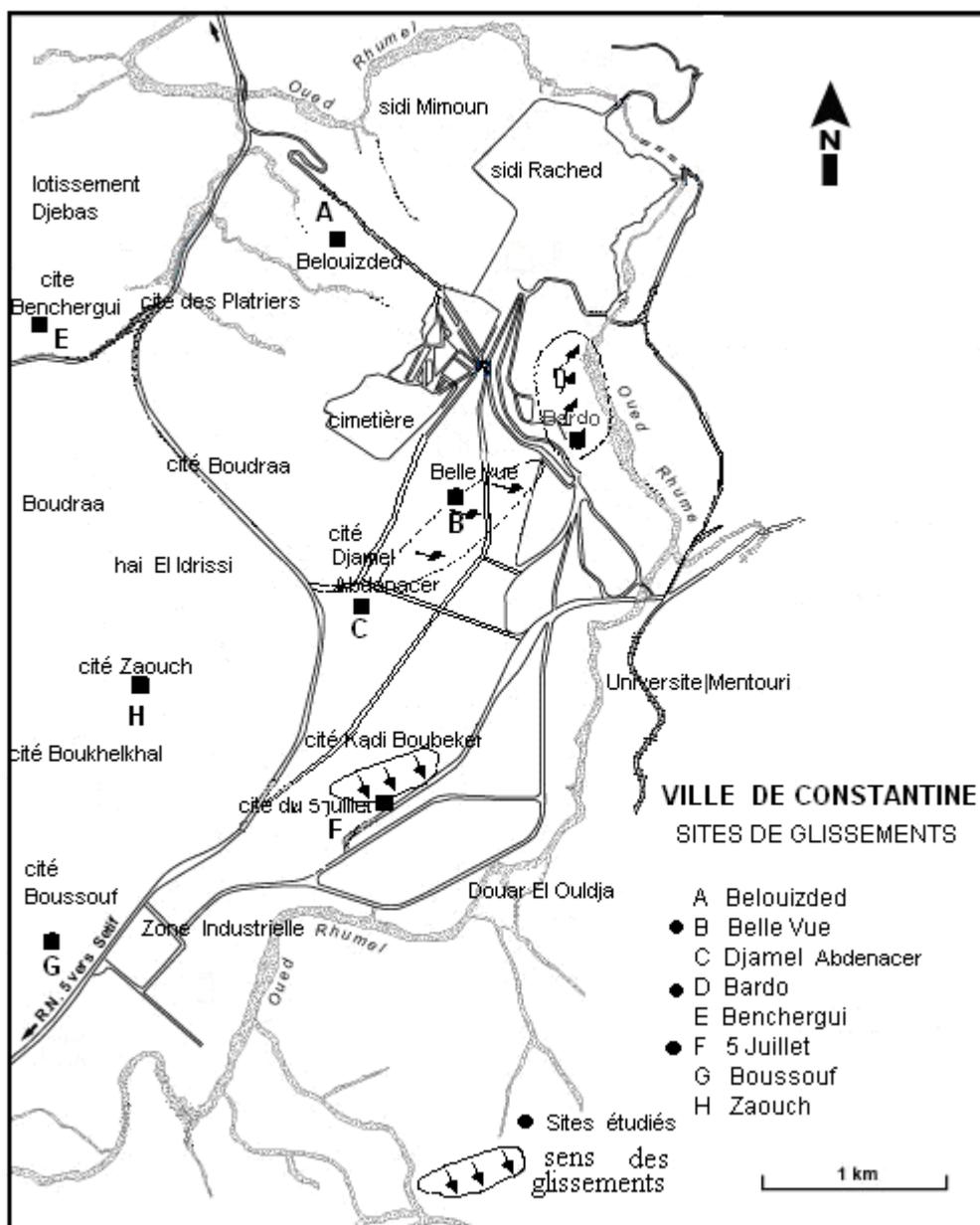
RECOMMANDATIONS

Ces cas d'études sont évocateurs des problèmes auxquels la ville est confrontée. L'ampleur du phénomène de glissement constitue un obstacle de taille pour l'extension de son périmètre urbain.

Surtout que Le PUD (Plan d'Urbanisme Directeur) et les PDAU (Plan Directeur d'Aménagement et d'Urbanisme) de la ville n'ont jamais tenu compte des premiers signes de glissements apparus en 1966. D'importants ouvrages ont été réalisés durant l'industrialisation et l'extension de la ville, tels que des programmes d'habitat urbain et le développement du réseau routier.

Si les terrains les plus stables correspondent à des sites déjà urbanisés et notamment ceux de la Casbah (vieille ville), du Souk (le vieux marché) et de la cité coloniale, l'opération de délimitation des terrains glissants n'est pas encore finalisée. Aussi, il est impératif de créer une équipe de techniciens de différentes spécialités qui aura pour tâche de délimiter les zones concernées par les glissements et d'identifier les nouveaux sites tout en tenant compte que la ville de Constantine est située sur une ligne sismique de degré 5 à 6 sur l'échelle de Richter (zone 2). Une cartographie précise de ces sites doit être tenue à jour avec un suivi permanent et une surveillance par auscultation avec la détermination d'une dynamique périodique donnant des mesures chiffrées afin de pouvoir faire des analyses et éventuellement d'en tirer des conclusions . Par l'installation d'une ou plusieurs techniques modernes de surveillance on assurerait non seulement la protection de la population et la sauvegarde du bâti historique et des anciens édifices architecturaux.

Fig. 36 Sites de glissement étudiés avec leurs sens de déplacement



Le contexte de gestion des risques naturels surtout les glissements de terrain à Constantine doit être partagé entre l'état, les communes et les citoyens.

Il serait souhaitable que la municipalité crée une commission d'experts qui gère les problèmes de l'état des logements, des infrastructures et de l'accueil des familles et qui analyse et prévoit les accidents liés au sol et au sous-sol. Cette commission doit réaliser les cartographies des zones à risques géotechniques, elle contrôlera techniquement les opérations de constructions dans ces zones et devra intervenir sur les divers sinistres.

La présentation d'une stratégie et d'une prévention du risque géotechnique lié aux glissements de terrain dans la région de Constantine s'articule essentiellement sur une réglementation et une volonté politique qui pourrait s'instaurer dans ce contexte.

L'ampleur de ce risque géotechnique en zone urbanisée difficilement décelable devrait mettre en relief l'importance de ces risques potentiels et de créer une commission au sein des collectivités locales pour le suivi et l'évolution de ces sites instables afin d'éviter de grosses dépenses sur le budget des services de la ville.

Cette commission devra réunir ou grouper des individualités scientifiques et techniques spécialisées dans le domaine des géosciences associé au génie civil. Elle devra être présidée par le maire de la ville.

La commission doit intervenir surtout au niveau de la Direction de l'Urbanisme la Construction et l'Habitat (DUCH) pour contrôler et éviter la délivrance des permis de construire spécialement sur des terrains jugés à risques.

Il est impératif de savoir délimiter les études aux périmètres géotechniques de protection c'est à dire aux zones à l'intérieur de laquelle s'exerce une interaction du projet et de l'environnement.

Après étude du dossier complet et délibération, la commission émet un avis précis et objectif soumis à la signature de la commission. Cet avis peut comporter la demande d'un suivi géotechnique d'exécution de la dite commission par un de ces membres et qui n'exclut en rien le suivi par les services techniques de l'assemblée populaire et communale (APC) de la ville.

De part la complexité de la situation en zone urbaine, l'intervention de la dite commission sera pluridisciplinaire à savoir géologue, géotechnicien, hydrogéologue, mécanicien de sol, ingénieur génie civil, ingénieur en voiries et réseaux divers etc.....

Cette commission composée d'au moins une quinzaine de spécialistes experts doit émettre des avis techniques en direction des APC et des DUCH.

Son rôle est de conseiller les décideurs à l'occasion de la délivrance des autorisations réglementaires d'urbanisme de permis de construire, de permis de démolir, lotissements ou d'aménagements dans les zones sensibles. La commission géotechnique doit leur permettre d'exercer leurs responsabilités en matière de prévention des risques, au travers de l'utilisation de l'outil cartographique, mais aussi de bénéficier de conseils de la part de professionnels avertis.

Pour exemple, on peut citer les effets désastreux liés à la réalisation du tronçon d'autoroute Ain Smara à l'aéroport de Constantine où le glissement de terrain a démolé toute la protection faite de palplanches battus à une profondeur de plus de 15 m renforcée d'un mur de soutènement en béton armé au vu de la profondeur de la rupture de terrain avec un glissement tangentiel comme le montre les résultats de l'inclinomètre (à -32m de la surface du sol). On ne peut engager des dépenses sur des travaux de confortement pour retenir des millions de tonnes de terre parce que n'importe quel ouvrage ne peut supporter cette charge

Il est question de délimiter les zones à risques pour la construction, et surtout d'attirer l'attention des responsables de la direction d'urbanisme sur la nécessité de bien établir un dossier technique des zones en question. L'intérêt de disposer, sur le terrain d'une cartographie de susceptibilités basée sur des paramètres objectifs et fiables permet un gain de temps extrêmement appréciable et un budget conséquent.

Une ville nouvelle (Ali Mendjli) a été construite à une vingtaine de km de la métropole pour pallier aux problèmes de logements sinistrés, une autre (Massinissa) est en cour de construction sur des terrains stables; seulement les habitués de la grande ville ne veulent s'éloigner de la métropole au vu de son importance économique et de l'éventail de ses services.

Suite à de gros problèmes sur la stabilité des constructions, un suivi administratif d'inquiétude sans étude a débuté lors des mouvements de terrains déclarés de 1987, 1994 et 1998 causés essentiellement par les pluies diluviennes qui se sont abattus sur la ville ayant réactivé ces mouvements. A la suite de ces mouvements, les autorités de la ville ont lancé une campagne d'étude (2001) sur l'ensemble du territoire de la ville afin de recueillir le maximum d'informations concernant le bâti sur ces terrains pour qu'ils puissent prendre des précautions nécessaires auprès des propriétaires concernant leur propriété allant jusqu'à une mise en demeure d'effectuer certains travaux.

Actuellement sont effectuées des études assez poussées par Simecsol (bureau d'étude étranger) avec les autorités de la ville pour solutionner les problèmes définitivement très ciblés sur chaque site afin de stabiliser, quand cela est possible, les mouvements du sol et sur l'ensemble des sites ayant fait l'objet de conclusions recommandant d'instrumenter des études sur chaque zone à des fins de prévention uniquement.

Cette étude de détermination de la dynamique des terrains (Simecsol) a coûté très chère à la ville ; elle a pris une période très longue (plus de 2 ans) pour ne donner que des résultats déjà connus par les autorités et les personnes spécialistes intéressées par ce problème. Cette étude a pris en compte une période donnée et de ce fait ses résultats sont ponctuels et ne peuvent donner un suivi permanent. Ils ne servent que de référence pour cette période et donne un résultat de recherche ponctuel pour l'avenir. Entre autre les résultats de l'instabilité du sol ne sont pas constants suivant les années, ils sont très variables et aléatoires.

Chaque site instable est affecté par des mouvements de terrain très variés suite à des paramètres qui ne sont pas tous réellement identifiés. Il faut mettre un système de suivi qui donne des résultats immédiats afin de suivre l'évolution de la dynamique des terrains en temps réel et pour une très longue période ; il faut installer un dispositif permanent et en faire une cartographie de suivie capable de répondre et de donner des résultats d'appuis. De cette façon, on peut tirer des conclusions exploitables et en dégager des solutions dans des temps courts.

CINQUIEME PARTIE

PERSPECTIVE : GEODESIE SPATIALE

GENERALITES

La ville de Constantine représente un des plus grands pôles urbains, de démographie, de culture et d'histoire d'Algérie. Il est impératif de veiller à la sauvegarde de ce patrimoine. L'installation d'une ou plusieurs techniques de surveillance pour veiller sur l'avenir du développement de ce centre urbain, de la protection du bâti historique et des anciens édifices architecturaux de l'aire coloniale s'avère impérative.

Actuellement il existe des méthodes de suivi de la dynamique des terrains très modernes, rapides et moins coûteuses : ce sont les mesures par la Géodésie Spatiale.

« La géodésie spatiale est une science qui regroupe l'ensemble des techniques utilisant des objets n'appartenant pas au voisinage immédiat de la surface de la terre et capable de fournir des informations d'ordre géodésique, la détermination de la forme et des dimensions de la terre et particulièrement la localisation et le mouvement précis d'un objet dans l'espace et sur la terre »

Le **GPS** à mesures de précision, l'Interférométrie Différentielle appelée aussi **IRSP** (Interférométrie Radar Satellitaire de Précision) et le **SLR** (Satellite Laser Ranging), sont des méthodes qui peuvent couvrir de très grandes surfaces allant de quelques hectares à des milliers d'hectares ; cela dépend de l'intérêt de la mesure.

Une périodicité de mesures trimestrielles suffit pour suivre l'évolution des glissements de terrain des zones en question, que ce soit pour le GPS ou pour l'Interférométrie pour les prises d'image de toute la région ou des zones.

Cette opération s'effectue durant le temps en se dotant d'une station de GPS de précision, ou avoir un abonnement pour l'acquisition d'images radar de la zone d'étude associé à une station d'analyse d'image. L'ORGM dispose de 3 stations GPS et fait des campagnes de mesures de la dynamique de la tectonique des plaques euro-africaine.

Pour cela, il faut passer un marché avec l'ORGM et mettre en place un contrat sur une durée déterminée ou indéterminée ou disposer d'une équipe ayant ces capacités scientifiques et l'acquisition de la logistique nécessaire avec un abonnement pour l'obtention d'image radar.

PRESENTATION DES METHODES DE SURVEILLANCE

L'étude des déformations et des mouvements des terrains constitue un élément déterminant dans la compréhension des phénomènes géodynamiques, qu'ils soient catastrophiques comme les séismes, les secousses volcaniques provoquant des instabilités de terrains, l'évolution des chaînes de montagnes, le rapprochement des plaques euro-africaine de la tectonique des plaques ou qu'ils soient mouvements de terrains dus à l'infiltration des eaux de pluies dans le sol.

L'apparition de la géodésie spatiale a largement contribué à l'essor des mesures de déformations.

La technique la plus utilisée actuellement pour mesurer ces déformations crustales est sans doute le GPS (Global Positioning System). Ce système à une extrême précision pouvant aller 10^{-8} , soit typiquement de 1mm pour 100km. Il a permis une avancée considérable dans l'étude des déformations de la croûte de l'écorce terrestre dans différents contextes géodynamiques. Ces mesures sont ponctuelles avec établissement d'une cartographie des lieux (Fig. 38).

Les autres techniques spatiales notamment l'interférométrie radar à très grande base (Very Long Basing Interferometry) et la télémétrie laser de satellite (Satellite Laser Ranging) permettent d'atteindre une précision encore meilleure en positionnement par l'image radar, qui est de l'ordre de 1mm par an pour les mesures d'instabilité des sols pour une durée d'une année (Fruneau, B. 2001).

Ces techniques ont permis en particulier de mesurer directement les vitesses relatives des plaques. Mais avec ce système les balises sont fixes, espacées, et leur nombre est forcément limité. Le système GPS, le plus maniable des trois, permet la mise en place de réseaux locaux couvrant quelques dizaines de kilomètres de côte, bien adaptés pour la surveillance locale. Cependant, ses réseaux ne peuvent guère excéder la centaine de points, et demandent l'organisation de campagnes régulières qui nécessitent une logistique lourde et coûteuse, et sont bien sûr limitées par les conditions d'accès sur le terrain.

Le système GPS est adapté à un suivi permanent à très long terme. Aujourd'hui, le nombre des balises GPS que l'on peut installer sur une région constitue une limite dans la résolution des mesures des champs de déformation. Il y a aussi la protection de ces balises (Fig. 37) qui doivent être installées dans des établissements surveillés et les prélèvements des lectures ou le positionnement lors des opérations d'observations se fera dans ces endroits surveillés.

Le système GPS ne peut être guidé à distance ou être robotisé du moins actuellement ; l'équipe doit se déplacer sur le terrain et en faire des mesures et de juger du nombre de mesures qu'il faut pour atteindre une précision voulue, c'est ce qui réduit le champ d'opération de ce matériel.

L'imagerie satellitaire est un moyen de s'affranchir des difficultés ci-dessus puisqu'elle permet d'accéder partout, en montagne comme en zone militairement fermée. Le radar avec sa visée « tous temps », c'est-à-dire à travers les nuages et de nuit comme de jour, renforce encore davantage cette accessibilité.

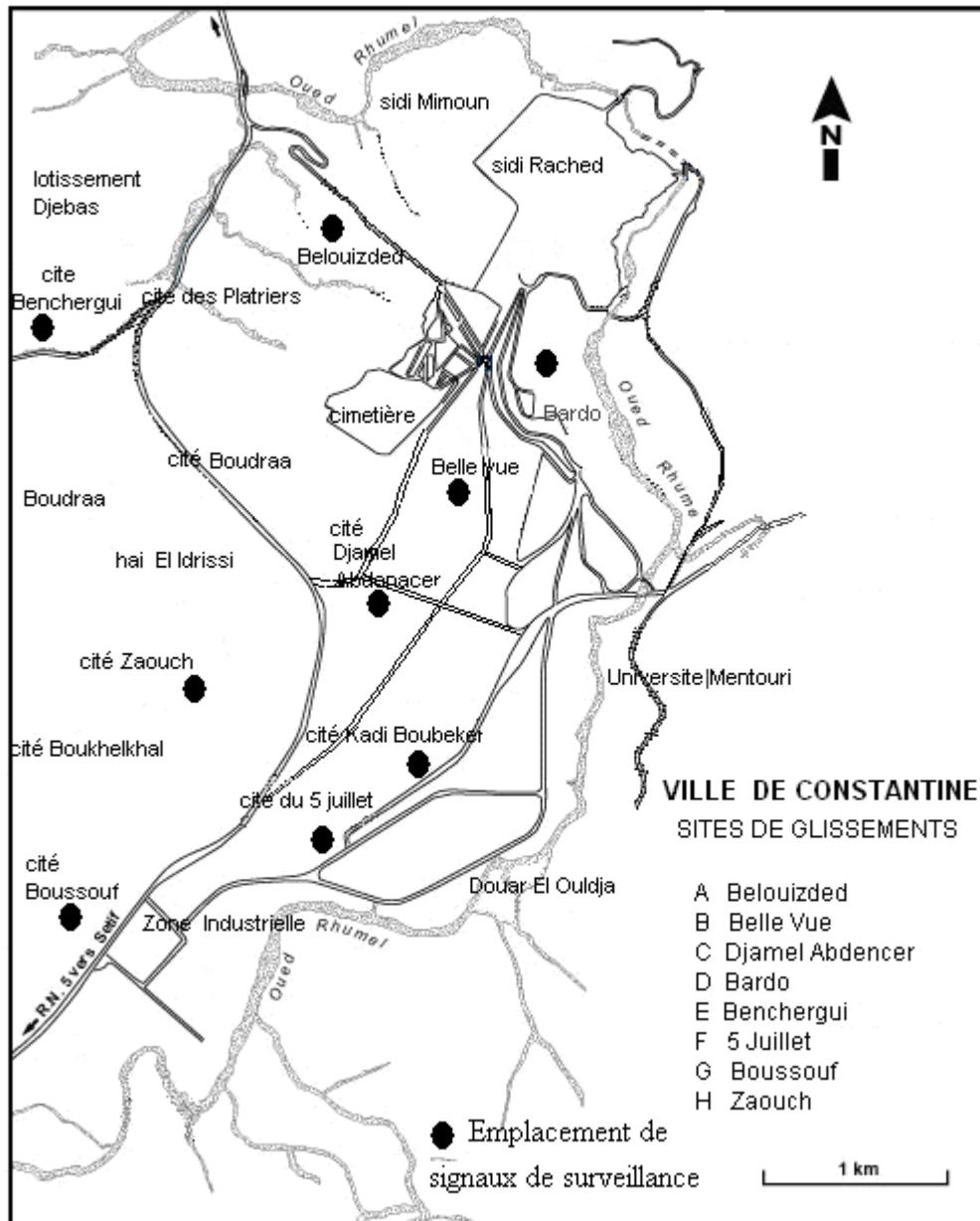
Avec l'apparition de l'interférométrie différentielle, on est aujourd'hui en mesure d'accéder à une représentation dense et homogène du champ de déformation.

Fig. 37 : Balises de surveillance



L'interférométrie différentielle est une nouvelle méthode qui permet de mesurer un champ de déplacement de surface avec une résolution spatiale de l'ordre de 100m, avec une précision centimétrique, et ce sur de très larges zones.

Fig. 38 Emplacement des signaux permanents de surveillance ou d'observation



Elle se révèle aujourd'hui être un outil complémentaire indispensable pour de nombreuses applications, notamment l'étude des cycles sismiques, les déplacements de glaciers, les déformations de volcans actifs, les glissements de terrain, les subsidences....

L'utilisation de l'interférométrie simple pour le calcul de modèle numérique de terrain donne des résultats moins spectaculaires que ceux escomptés au début, mais reste néanmoins intéressante, notamment dans les régions où la nébulosité est importante.

L'INTERFEROMETRIE RADAR

L'Interférométrie

Ce principe est baptisé interférométrie puisque le calcul de déphasage est équivalent à une création d'interférence entre les deux images, c'est à dire entre les échos reçus dans les deux situations.

Pour calculer le déphasage entre les deux prises, il est essentiel d'établir une relation entre les pixels des deux images. Celles-ci doivent donc être non seulement recalées l'une par rapport à l'autre, mais pour qu'elles soient parfaitement superposables, une correction géométrique est requise. Nous nous trouvons face aux problèmes rencontrés en radargrammétrie, dus à la stéréovision, toutefois la déformation à appliquer est dans notre cas beaucoup plus faible. Une simple corrélation automatique peut convenir, celle-ci peut en outre être optimisée en maximisant le rapport signal sur bruit de l'interférogramme. L'image qui sert de référence est qualifiée d'image maître et la seconde d'image esclave.

L'interférogramme résulte de la technique appelée «interférométrie holographique à double exposition». On enregistre, en effet, deux images holographiques consécutives sur le même support photosensible, à partir d'un objet, d'une surface ou d'une matière qui se

sont très légèrement modifiés ou déplacés entre chacune des expositions. Quelques artistes exploitent esthétiquement cet effet particulier, qui peut être produit avec un laser pulsé ou avec un laser continu. L'image est reconstruite avec des rayures zébrées à sa surface, faisant un effet de moiré.

La capacité de l'interférométrie différentielle à détecter les faibles mouvements n'est plus à démontrer, depuis que de nombreuses images de champs continus de déformations cohérents à partir d'images SAR ont été obtenues avec succès

Chaque frange de cet interférogramme correspondant à un déplacement selon la ligne de visée de $\lambda/2$, soit 2.8 cm pour les images acquises avec le satellite ERS-1.

La précision théorique que l'on peut escompter dans la détermination des mouvements par interférométrie différentielle correspond à une fraction de frange d'interférence : c'est donc une fraction de longueur d'onde. On considère souvent que cette précision vaut $\lambda/16$, soit environ 3mm avec ERS.

La continuité des satellites ERS-1 et ERS-2 permet de constituer une mémoire de la terre sur une décennie. Le lancement du prochain satellite européen, GALLILEO, permettra également de continuer à enrichir cette base de données.

Le Radar

C'est un capteur actif ; il émet un signal, dans le domaine des hyperfréquences, et enregistre la réponse renvoyée par les surfaces et les objets observés .Ce capteur permet d'émettre et de recevoir un signal quelque soient les conditions atmosphériques et les conditions d'éclairement.

Les capteurs radar possèdent 3 atouts majeurs

-Ils peuvent acquérir des images à travers, les nuages, la brume, le brouillard ou la fumée.

-Ils peuvent acquérir des images de jour comme de nuit

-Ils mesurent les caractéristiques des objets observés

L'imagerie radar constitue donc, en pratique, le seul moyen efficace d'effectuer des couvertures globales dans les régions où la nébulosité est fréquente (Carnec C.et Villain J.-P ,2000).

Radar à Synthèse d'Ouverture ou (S.A.R.)

Les premiers Radars à Synthèse d'Ouverture (RSO) ou Synthetic Aperture Radar (SAR), embarqués sur des avions, ont été élaborés aux USA en 1953. C'est au cours des années 1970 que la télédétection spatiale hyperfréquence a débuté, avec le satellite SEASAT (fonctionnement de juillet à septembre 1978, en bande L) (Tab. 11).

Tab. 11 : Bandes, fréquences et longueur d'ondes utilisées en télédétection radar.

Bande	Fréquence	Longueur d'onde
P	0,3 - 1 GHz	30 - 100 cm
L	1 - 2 GHz	15 - 30 cm
S	2 - 4 GHz	7,5 - 15 cm
C	4 - 8 GHz	3,75 - 7,5 cm
X	8 - 12,5 GHz	2,4 - 3,75 cm

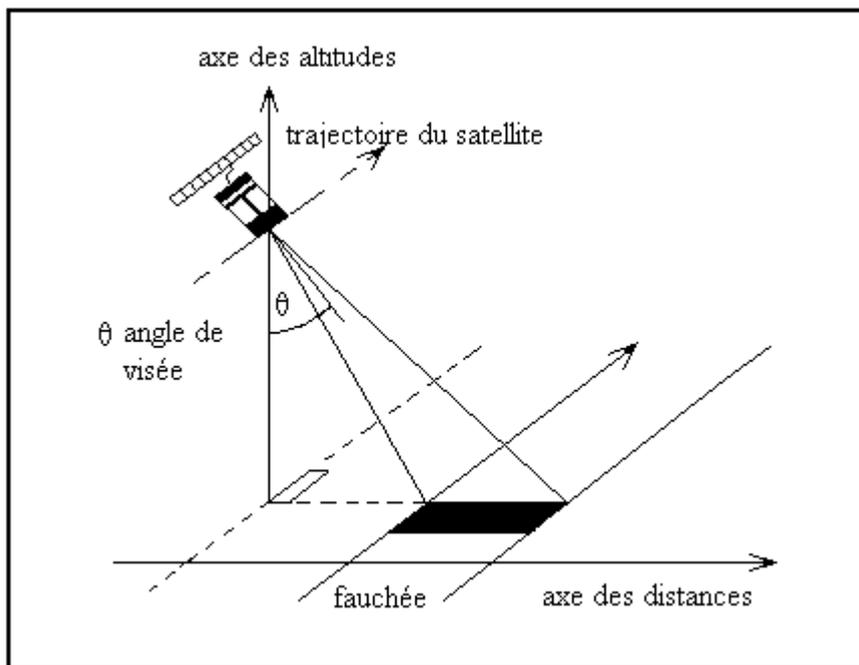
Techniques utilisées

La technique InSAR fait appel à la cohérence du signal radar et au fait que la phase du signal équivaut à deux fois la distance du trajet entre le capteur et la surface imagée. La différence de phase entre les mesures provenant de deux images RSO (en connaissant avec précision la position du capteur lors des deux acquisitions) permet de mesurer la différence de distance-temps avec une précision d'une fraction de la longueur d'onde. La différence de distance-temps peut être reliée géométriquement à la hauteur des terrains observés (Vachon P.W. et al 1995).

RADARSAT met un délai de 24 jours (1 cycle orbital) pour acquérir les deux images. Embarqué sur satellite, il permet de créer des images de la surface terrestre en émettant, au moyen d'une antenne, des impulsions de micro-ondes perpendiculairement à la trajectoire du porteur (axe des distances). Après réflexion sur le terrain, l'écho d'une impulsion est recueilli par la même antenne, permettant d'engendrer une ligne de leur éloignement (temps de propagation aller-retour). La

répétition des impulsions le long de la trajectoire assure la deuxième dimension. Les impulsions sont émises à une cadence de l'ordre de kilohertz. La géométrie de prise de vue est représentée de la forme suivante (Fig. 39).

Fig. 39 : Géométrie de prise de vue du radar



L'image ainsi constituée est donc un tableau temps - distance, où le temps est représenté par le cadencement des impulsions et la distance par la position de l'écho sur la ligne. La dimension temps est généralement appelée azimuth, tandis que l'autre dimension est appelée distance radiale. Une colonne de l'image sera composée de l'ensemble des réponses des réflecteurs à une même distance de l'antenne ou objets au sol. Le pixel est défini comme l'entité élémentaire de cette matrice bidimensionnelle, cela définit la nature de la définition de l'objet sur l'image.

La qualité des images est liée à la résolution spatiale du radar, c'est à dire la capacité de distinguer deux distincts du sol, la résolution est définie comme étant la plus petite distance séparant deux cibles voisines en deçà de laquelle il n'est plus possible de distinguer ces cibles dans le signal rétrodiffusé.

La résolution en azimuth de l'image brute vaut : $r_a = \lambda \rho / L$, ou

- r_a la résolution en azimuth
- ρ est la distance du satellite au point,
- L la longueur de l'antenne
- λ la longueur d'onde .

La résolution en distance vaut dire : $r_d = c \tau / 2$, ou

- r_d la résolution en distance
- C est la vitesse de la lumière
- τ la durée d'émission d'une impulsion radar .

Propriétés de l'amplitude de l'image radar :

Contrairement aux images optiques, où les mesures de réflectance sont liées au pouvoir émissif du sol, la radiométrie en radar est liée aux propriétés physiques et électromagnétiques des objets (rugosité de la surface, teneur en eau et comportement diélectrique de l'objet illuminé). L'image radar sera celle des amplitudes des coefficients de rétrodiffusion des différents points du sol, et conventionnellement, les valeurs les plus fortes seront représentées par les tonalités les plus claires.

L'amplitude de l'image radar est déterminée par la capacité du terrain à renvoyer l'énergie incidente. Le principe de visée latérale est un élément important de l'aspect des images radar. Ainsi une surface d'eau calme ne renverra aucun signal car elle agira comme un miroir renvoyant l'onde à l'opposé. Dans le cas d'une mer légèrement agitée par la houle, l'apparition d'une rugosité de surface favorise la rétrodiffusion d'une partie de l'énergie de l'onde vers le satellite. Cela se traduit sur l'image par une teinte plus claire. Les zones urbaines contiennent une grande quantité de réflecteur artificiels qui peuvent organiser une double réflexion (trottoirs, fenêtres, toits..), et permettent d'obtenir un signal retour intense. Sur les zones de végétation et de cultures, le pouvoir de pénétration de l'onde, qui dépend de la longueur d'onde du signal (les grandes longueurs d'onde pénètrent mieux les couverts végétaux que les courtes longueurs d'onde) et de l'indice d'absorption du milieu, est un des paramètres les plus remarquables du phénomène de rétrodiffusion.

Comme nous l'avons vu précédemment, le SAR a un fonctionnement tout temps, ce qui représente un avantage par rapport aux images de télédétection dans le visible, et l'infrarouge. Cependant, le caractère monochromatique et cohérent du signal radar est à l'origine d'un bruit de granulation, communément appelé speckle, caractéristiques des images radar. La longueur d'onde étant en effet toujours plus petite que la résolution, les pixels contiennent de nombreuses cibles élémentaires.

La perception visuelle des informations demeure très nettement moins bonne sur les images radar qu'en optique. Ceci est dû à la présence du speckle. Pour supprimer cet effet, on peut réaliser une image dite

"multi-vues" par regroupement de pixels contigus pour diminuer l'influence du speckle, ce qui évidemment se traduit par une perte de résolution. Il est également possible de réduire le speckle à l'aide de filtres spécialisés, ou en combinant plusieurs images de la même zone.

Du fait de sa visée latérale, le SAR acquiert des images avec une géométrie très spécifique, qui dépend de la topographie de la scène étudiée.

Mesure des déplacements : Interférogramme

C'est l'enregistrement d'une figure d'interférence produite par la superposition de deux ondes.

L'interférogramme met en évidence des déplacements centimétriques, voire millimétriques du sol.

L'interférogramme ou différence de phases entre deux prises de vue, met en évidence des déplacements du sol jusqu'à l'ordre de quelques millimètres, intervenus entre les deux prises de vues. Les cartes des déformations du sol ainsi obtenues sont utilisées dans de nombreuses applications : étude et surveillance des volcans, des tremblements de terre et des glissements de terrain.

Le but est de mesurer les déplacements d'une surface entre deux prises par vision différentielle. Idéalement, il suffit de disposer de deux acquisitions prises dans des conditions d'observation strictement identiques, afin de ne mesurer que les déplacements de surface et non

le relief ; mais comme cela est rarement envisageable, le recours à une troisième acquisition, est indispensable pour s'affranchir du déphasage introduit par le relief.

Détection des déplacements :

Le meilleur moyen pour s'affranchir des effets atmosphériques semble être l'addition d'interférogrammes. Grâce à la somme de plusieurs interférogrammes.

La technique d'interférométrie Radar Satellitaire de Précision (IRSP) permet de générer des cartes de déplacements de points éclairés par le Radar des satellites.

Domaine d'application

- Gestion du territoire : subsidence d'origine hydraulique ou industrielles, ou naturelles
- Génie civil : barrages, viaducs, digues, têtes de tunnels.
- Bâtiments : industriels ou non.

Avantages :

- Précision millimétrique suivant la verticale
- Direction des déplacements en quasi 3 dimensions
- Couverture globale des secteurs entiers d'un territoire
- Pérennité assurée

- Outil de détection et d'instrumentation combinés :

Sans instrument autre que le satellite

Sans visite du site

Sans devoir connaître précisément les points à instrumenter.

CONCLUSION

L'étude radar va donc permettre de détecter de faibles déformations de surface à l'échelle de la ville de Constantine et de suivre leur évolution spatio-temporelle. Cependant la difficulté liée à la perte de cohérence, occasionnée par des modifications de surface secondaires (végétation, humidité, perturbation atmosphérique, ...), limitent les observations sur certains terrains.

L'interférométrie différentielle pourrait donc être envisagée comme un outil complémentaire au dispositif in situ de suivi des affaissements / rehaussements susceptible d'offrir une perception globale des mouvements de faible amplitude et devrait ainsi conduire à une meilleure compréhension, lors des poussées de terrains dynamiques sur des terrain parfaitement stables avec des rehaussements centimétriques à grand rayon de courbure. Elle devrait aussi permettre l'approche d'une méthode de prévision des déformations de surface dont l'objectif est l'identification de critères d'alertes.

Ces campagnes seront validées par l'interférométrie radar qui détecteront des mouvements de surface très localisés et permettront

ainsi le suivi de mouvement et l'amélioration de la compréhension des phénomènes dynamiques.

Dans le domaine du Radar, le problème est assez différent. Les images à haute résolution qui nous seront proposées n'ont d'équivalent que dans le secteur réservé de la défense et il convient de créer de toutes pièces une culture et un savoir-faire civils du traitement de ces données de façon à garantir qu'elles feront l'objet d'un usage régulier, diversifié et ample dès leur capture. Il est important de prendre conscience à ce point des efforts qu'il faudra consacrer aux études fondamentales sur la formation de l'image (interaction matière/radar) en particulier dans la perspective des applications envisagées qui se démarquent des applications militaires qui ont reçu à ce jour une attention quasi-exclusive. Il faudra également mener des études en amont sur la formation du signal et ses conséquences sur l'image et son contenu (dynamique, contenu fréquentiel, rôle de la phase, etc.) car l'impact de la formation du signal est très important dans les résolutions sub-métriques, et en particulier dans les milieux artificiels (agglomérations, sites industriels) où les échos forts sont dominants. Enfin des systèmes de simulation puissants et ouverts devront probablement être mis en place pour suppléer aux limitations des développements théoriques dans les scènes complexes.

La technique d'interférométrie est sans équivalent pour détecter et mesurer de très faibles mouvements de terrain, même si elle a été développée à partir de données de satellites qui n'ont nullement été conçus à cette fin. Elle est devenue une technique géodésique spatiale de référence, applicable aussi à de nombreux problèmes géophysiques.

Ses capacités inégalées d'échantillonnage spatial lui permettent en effet d'étudier une large gamme de déformations de surface, de quelques centaines de mètres à plusieurs milliers de kilomètres d'extension, avec une précision centimétrique, voire millimétrique.

La mesure de la cohérence entre deux images est également un indicateur très subtil et très riche de détection de changement d'état de surface, et constitue donc un nouvel outil de classification. En ce qui concerne les modèles numériques de terrain, l'interférométrie peut atteindre de très bonnes précisions, mais souffre habituellement de sa trop grande sensibilité (effet des pentes, variations atmosphériques, croissance de la végétation...). On lui préfère aujourd'hui la technique radargrammétrique (stéréo radar, moins précise, mais plus robuste). Celle-ci est néanmoins confrontée à la présence du chatoiement.

LE G.P.S (GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

Définition

Le GPS est un système de positionnement par satellites, capable de donner n'importe où sur le globe une position de quelques mètres à quelques centimètres, de jour comme de nuit, qui, quels que soient l'heure et le lieu, indique avec rapidité et précision:

- l'endroit exact,
- l'altitude,
- la vitesse,
- l'heure.

Le Système de positionnement global (GPS Global Positioning System) a été développé par le département de la défense américaine en 1978. Il a été rendu accessible au public en 1985 :

- un service de grande précision avec des informations cryptées, réservé au militaire c'est le mode PPS (Précise Positioning System).

- un second service, sans décodage, aux possibilités dégradées auquel aurait accès toute personne munie d'un récepteur, c'est le mode SPS (Standard Positioning System).

Le mode PPS exploitant pleinement le système pour une précision de moins de 10m et le mode SPS qui utilise une électronique simplifiée est en plus soumis à une dégradation volontaire des signaux satellitaires pour une précision de moins de 100m (Botton S. et Duquenne F., 1997).

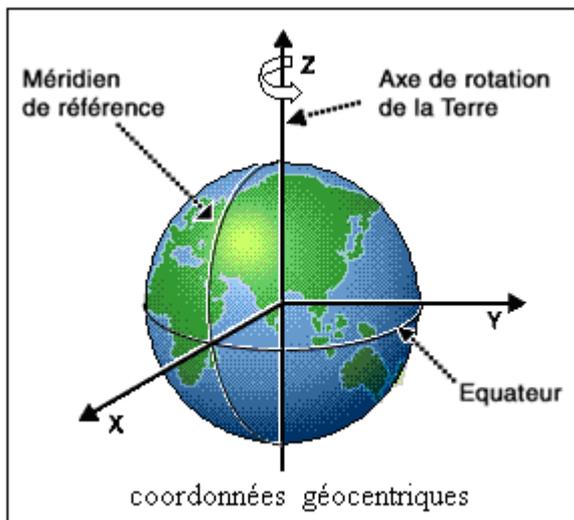
Principe

Le système GPS a été conçu pour obtenir des coordonnées cartésiennes géocentriques (X, Y, Z) ou géographiques, dans le système de référence mondial appelé WGS84. Ces coordonnées sont purement géométriques (Fig. 40).

Le principe du positionnement GPS est très proche du principe de triangulation. La vitesse de transmission des signaux émis par les satellites est égale à celle de la lumière. Chaque signal intègre une éphéméride avec son heure de départ (Freycon V., 1999). On mesure donc la distance entre l'utilisateur et un certain nombre de satellites de positions connues grâce au temps qu'a mis chaque signal à parvenir jusqu'à votre GPS. On définit ainsi des sphères centrées sur des

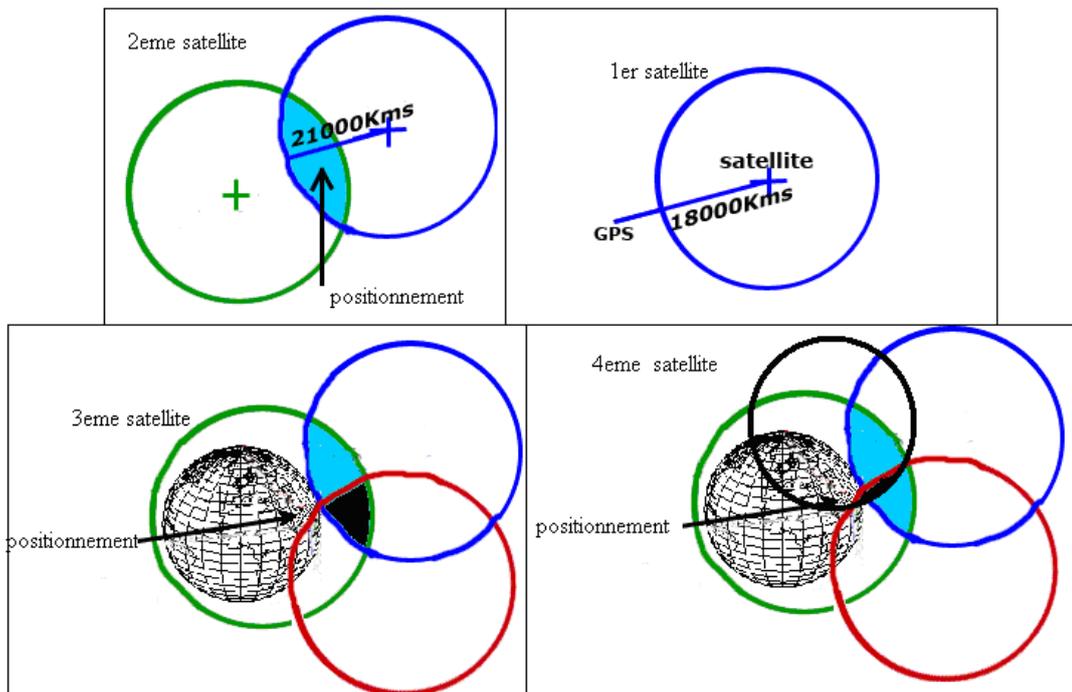
satellites et dont l'intersection donne la position (Fig. 41). Le récepteur GPS est capable d'identifier le satellite qu'il utilise à l'aide du signal pseudo aléatoire émis par chaque satellite. Il charge, à l'aide de ce signal, les informations sur l'orbite et la position du satellite. Pour mesurer la distance qui sépare le satellite du GPS, on mesure le temps T mis par le signal pour aller de l'un vers l'autre.

Fig. 40 : Principe de détermination de coordonnées par la géométrie



Les coordonnées cartésiennes s'expriment en fonction de X, Y, Z
L'origine est le centre de masse de la terre .La surface X - Y est le plan équatorial moyen et l'axe Z est l'axe de rotation de la terre .

Fig. : 41 Positionnement par GPS



Le GPS consiste en un segment de contrôle qui surveille les satellites, un segment spatial, qui comprend la constellation des satellites NAVSTAR, et un segment utilisateurs. Ces trois composantes permettent le calcul d'une position GPS en coordonnées géographiques (latitude, longitude et hauteur) et coordonnées UTM (X, Y) + Hauteur n'importe où dans le monde en tout temps et quelles que soient les conditions météorologiques par la détermination de la distance entre un récepteur et au moins quatre satellites (Fig. 42 et 43) et en connaissant la position de ces satellites dans l'espace.

Fig. 42 : Choix d'un meilleur positionnement

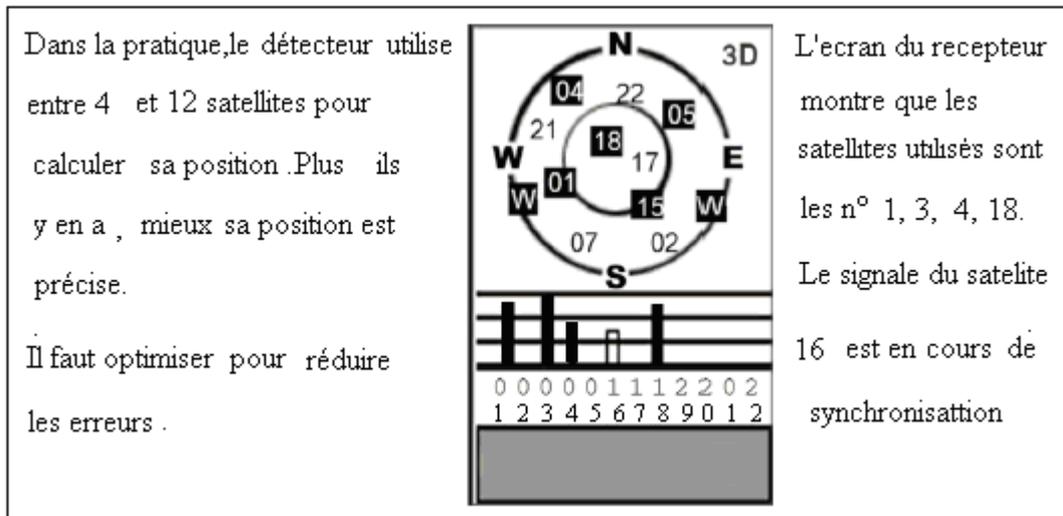
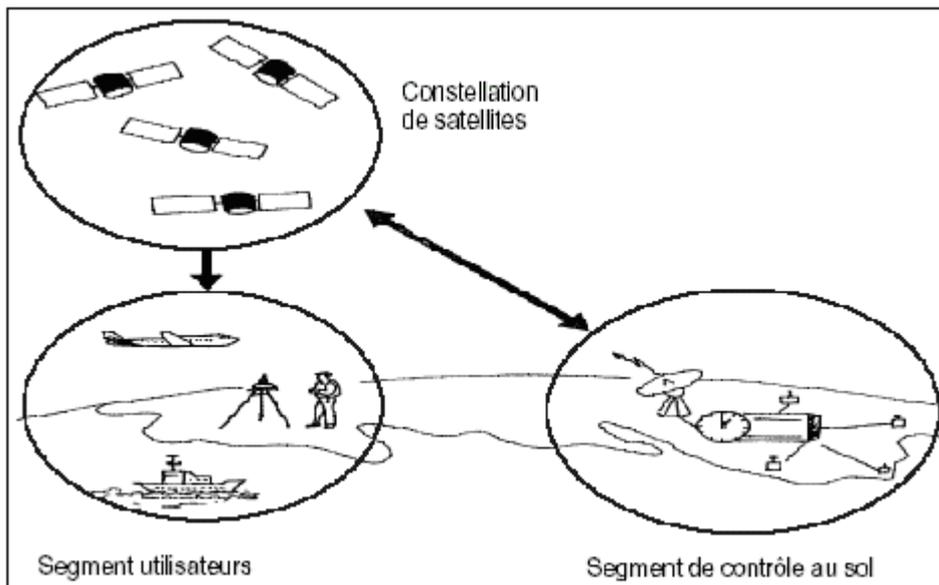


Fig. 43 : Trois segments d'utilité GPS



Les différents récepteurs GPS et mode de mesure

Ils se distinguent essentiellement par leur précision (et leur coût), pour positionner un point. Cela est dû en grande partie du fait que certains

n'utilisent comme informations que la mesure de pseudo distance, tandis que d'autres intègrent la mesure de la phase.

Les premiers, appelés récepteurs de navigation, donnent un positionnement dont la précision est moins de 100m selon le mode d'utilisation.

Les seconds utilisés en topographie, ce sont les récepteurs bifréquences associés à des balises (Fig. 44) mesurant sur deux ondes (L1, L2) le positionnement est alors déterminé de l'ordre du cm (Fig. 45a et 45 b).

Fig. 44 : Balises récepteur de mesure GPS



Un autre facteur qui a une grande influence sur la précision c'est le positionnement d'un point en utilisant deux récepteurs en mode relatif ou différentiel.

Fig. 45 : Récepteurs GPS



Fig. 45a : Types de GPS (sans balise) utilisant le mode SPS



Fig. 45b : Combiné GPS de précision

Les avantages sont les suivants :

- Mise en œuvre plus simple sur le terrain que les méthodes terrestres. Réalisation de réseaux mondiaux avec une précision, en absolu, meilleure que le centimètre et de détermination de mouvements de points de l'ordre du millimètre par an.

- L'obtention de coordonnées géométriques tridimensionnelles. Aujourd'hui, l'ensemble des réseaux géodésiques nationaux, continentaux et mondiaux sont réalisés par ces méthodes de géodésie spatiale. La précision obtenue permet de connaître pour des réseaux scientifiques leur évolution temporelle. Les résultats, ainsi obtenus, sont ensuite exploités en sciences de la Terre.

- Les géophysiciens l'utilisent pour valider les modèles de déplacements des plaques tectoniques, les volcanologues pour la surveillance de volcans, les océanographes pour tenter d'obtenir une estimation du niveau moyen des mers. En physique théorique, certaines expériences de géodésie spatiale ont permis de vérifier certains résultats de relativité générale.

- Des erreurs entachent chacune des positions calculées. L'exactitude estimée des positions est de l'ordre de 10 m. L'exactitude peut être améliorée et portée à l'ordre du mètre ou même du centimètre en utilisant différentes combinaisons de méthodes, de récepteurs en mode différentiel (Tab. 12), en fréquences et de logiciels.

La précision pourra être améliorée en répétant la mesure sur le même point de manière judicieuse, non pas par un grand nombre de mesures trop rapprochées en temps mais en laissant une attente d'au moins 5 minutes entre les mesures, c'est à dire avoir un grand nombre de temps avec un grand nombre de mesure sur un même point.

En suivant ces conseils d'utilisation, la précision du GPS en mode absolu, utilisant la mesure de pseudo-distances.

Si cette précision ne suffit pas, il faut passer au mode différentiel.

Tab. 12 : Eléments à sources d'erreurs

Sources d'erreurs	Erreurs typiques
Ionosphère perturbée	4 m
Troposphère	0.7 m
Réflexions parasites	1.4 m
Horloges de précision des satellites	3 m
Bruit du récepteur	0.5 m

L'INTERET DU GPS

L'intérêt du GPS vient du fait qu'il apporte une solution à presque tous les besoins de positionnement et de navigation ; sa technologie militaire le rend simple d'emploi, robuste et fiable.

Le GPS a apporté une révolution en géodésie ; aujourd'hui l'ensemble des réseaux est réalisé par techniques spatiales et plus particulièrement par GPS. L'avenir est aux réseaux permanents dont les bornes sont

remplacées par des récepteurs GPS qui enregistrent des observations 24h/24 et les retransmettent via des lignes de télécommunications à haut débit vers des centres de données. Ceux-ci les mettent à disposition des utilisateurs potentiels le plus rapidement possible.

Dans le domaine de la topométrie, le GPS a aussi apporté une évolution conséquente. Les méthodes rapides de levées telles que le rapide statique ou le cinématique temps réel s'imposent de plus en plus.

LES SATELLITES

Ces satellites sont équipés de façon à pouvoir activer des dégradations volontaires du signal émis. Ils ont une durée de vie nominale de 7,5 ans. Leurs orbites sont quasi circulaires :

- de rayon 26 500 km (soit à une altitude d'environ 20 200 km),
- de période égale à environ 11h 58 min.

Un satellite passe, au maximum, 6 heures au-dessus de l'horizon local, entre son lever et son coucher. Au minimum, 4 satellites (parfois même 12) sont toujours disponibles en tous points du globe, 24 heures par jour, indépendamment des conditions météorologiques.

Le système GPS comprend 3 composantes principales :

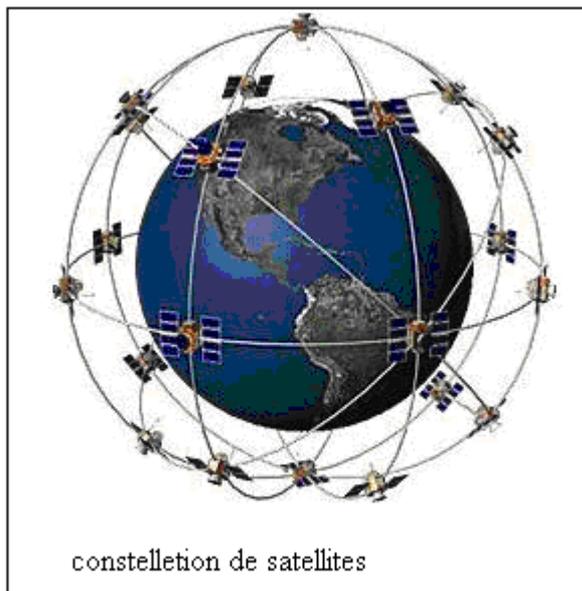
- la composante spatiale constituée (nominalement) de 24 satellites en orbite autour de la Terre (Fig. 46),
- la composante de contrôle formée de stations de poursuite au sol,
- la composante utilisateur qui comprend les récepteurs.

Les satellites sont répartis dans six plans inclinés de 55° sur l'équateur. Cette inclinaison a été choisie afin d'optimiser la qualité de la

constellation au-dessus des États-Unis. Par contre dans les zones polaires les satellites sont très bas sur l'horizon, ce qui rend le positionnement plus difficile.

Chaque satellite reçoit et stocke des données en provenance du segment de contrôle, maintient une échelle du temps avec grande précision grâce à ses horloges atomiques embarquées, et transmet des signaux à la Terre.

Fig. 46 : Constellation de satellites



Chaque satellite GPS émet un message de navigation qui contient toutes les données nécessaires au récepteur pour effectuer tous les calculs de navigation. Ces données comprennent :

- une information de l'état de santé du satellite,
- les informations nécessaires à l'acquisition du code du message,
- les informations de précision du satellite,
- une information concernant le retard de propagation dû à la ionosphère
- les éphémérides du satellite.

Méthode différentielle:

Les erreurs du système GPS sont de 2 ordres :

- Le premier type d'erreurs est d'ordre volontaire, en effet afin d'empêcher le déploiement opérationnel de récepteur GPS militaire ou civil non agréé par les États-Unis, ces derniers procèdent à une

dégradation volontaire des signaux de façon à amener l'erreur RMS (Ranging Measurement System) en SPS (Standard Positioning System) à près de 100m (Tab. 13).

-Le second type d'erreurs est dû aux incertitudes intrinsèques du système GPS, elles sont dues principalement aux délais de transmission (couches atmosphériques), aux précisions des horloges embarquées, à la position du satellite ainsi qu'au codage.

Une erreur de 1/1000 de seconde représente une erreur de distance de 300 km. Pour ces raisons, cette mesure de distance est appelée pseudodistance (synchronisation des horloges).

Notons que, de règle générale, la précision de l'altitude est environ 2 fois moins grande que la précision des coordonnées horizontales.

Tab.13 : Précision d'un positionnement entre différents usages

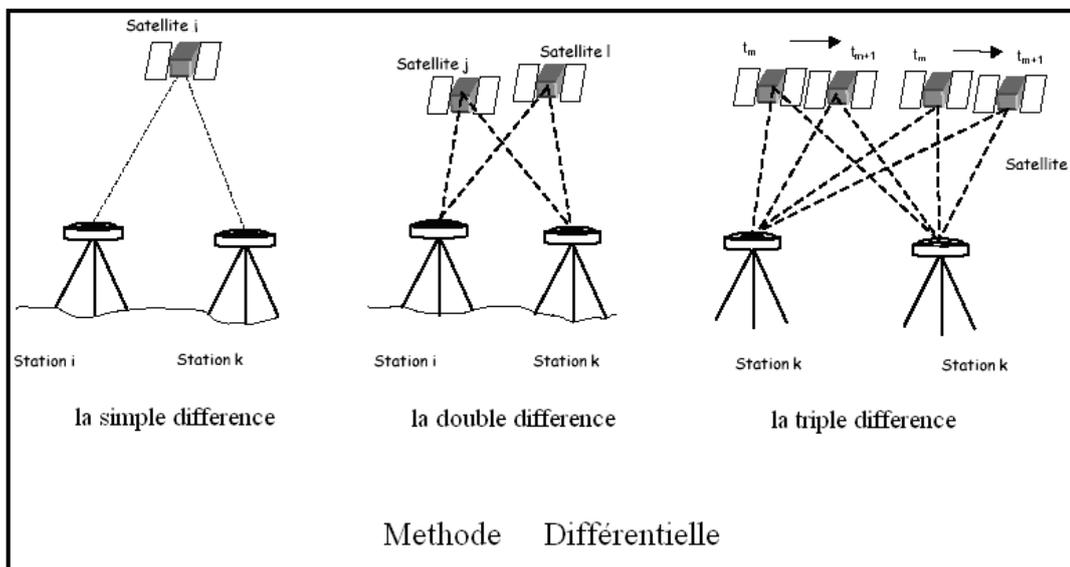
Type de mesure	Précision moyenne
GPS usage courant	> 30 m
GPS usage militaire	1 - 3 m
GPS différentiel	< 1m
GPS différentiel avec post-traitement	cm

Les calculs plus précis, avec des logiciels scientifiques permettent d'estimer des paramètres de troposphère, d'ionosphère, d'orbites, d'horloge, ils utilisent les fichiers de calibration d'antennes (Bouteloup D., 2003).

Il n'est pas rare d'avoir des écarts-types de quelques dixièmes de millimètres sur une base de plusieurs dizaines de kilomètres pour une durée d'observation de plusieurs heures (Fig. 47).

Cependant ces 2 types d'erreurs sont hautement corrélés spatialement. C'est à dire que 2 récepteurs proches géographiquement l'un de l'autre subiront les mêmes erreurs.

Fig. 47: Précision d'un positionnement entre différents usages.



CONCLUSION GENERALE

Les études géotechniques ont montré que ces terrains sont susceptibles de glisser s'ils sont à l'état saturé ou moyennement saturé. On constate que les premières profondeurs indiquent des coefficients de compressibilité et des cohésions relativement faibles (14m, 32m). Il faut préciser que l'essai inclinométrique a atteint une profondeur de plus de 80m. Les résultats de cet essai ont montré que la vitesse de glissement est fortement appréciable en périodes humides qu'en d'autres périodes. Les mesures géodésiques ont apporté les mêmes remarques et cela sur des périodes espacées et répétées en saisons humides. Des valeurs sensiblement pareilles ont été constatées par les 3 différentes observations (inclinométrique géodésiques, photographiques).

Les responsables de la ville de Constantine doivent veiller à ce qu'il y est une cartographie précise et actualisée à tout moment pour surveiller les bâtisses existantes et avoir un œil sur le patrimoine historique et emblématique.

L'installation d'un réseau de surveillance de type Interférométrie différentielle ou GPS de précision devient indispensable. Ces dispositifs permanents sont des moyens sûrs pour l'obtention d'une cartographie, d'un suivi capable de répondre, de donner des résultats d'appui et enfin de tirer des conclusions exploitables et en dégager des solutions dans des temps courts.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Azimi C. Desvareux P., 1986, « Etude et Prévision des Mouvements de Terrains en X Y Z », *Revue Association Française de Topographie*, n°28, Paris.

Benaissa.A., 1998, « Propriétés géotechniques de quelques formations géologiques propices aux glissements de terrains dans l'agglomération de Constantine », *Université de Constantine, Revue Rummel*, n°6, pp.111 -120.

Bougeatre P., 1977, « *Théorie Générale sur les Erreurs* », E.N.S.G, Arzew

Boutabia M., 1999, *Cours de Statistique*, 1^{ère} Année Post - graduation Département de Mathématiques, Université de Annaba, Annaba.

Bouteldja M. et Chekh Lounis G., 1996, « *Glissement d'el Achour* », 7th International Symposium on Landslides Rotterdam, Institut des Sciences de la Terre (U.S.T.B.H.), pp. 1169-1177, Alger.

Bouteloup D., 2003, *Présentation du Système GPS*, IGN, ENSG, p. 70, Paris.

Botton S. Duquenne F.1997, *GPS localisation et navigation*, Edition Hermès, p192, Paris.

Caillemer A. et Le Qoq C. 1983, *Astronomie de Position, Géodésie* Editions technip, Paris, pp. 71-237.

Carnec C. et Villain J.-P., 2000, *Interférométrie S.A.R. Différentielle - Application à la détection et au suivi de mouvements de terrain*, p. 192, Paris.

Cartes d'état major 1960, Constantine et El Aria de l'INCT, 1/25000, Alger.

Carte de géologie 1981, Ech. 1/200 000 Sonatrach, Algérie.

Cartier G., 1981, *Recherche et Etudes sur les Glissements de Terrain*, 188 p., Paris.

Coiffait, P.-E., 1992. *Un bassin post-nappe dans son cadre structural : l'exemple du bassin de Constantine*. Thèse de doctorat d'état, Université Henri Poincaré, Nancy I, France, 502 p.

Costet J. et Sanglerat G., 1981. *Cours pratiques de mécanique des sols*, T1. Dunod, Paris, pp 6-45.

Cours E.N.S.G 1979, *Représentation Plane de la Terre. Calculs Géodésiques*, 102 p, Arzew.

C.T.C 1983 .Constantine Contrôle Technique de Construction Constantine.

Filliat G. et Dubus J. 1984, Appareils de Contrôle et de Surveillance, *Revue Laboratoire des Ponts et Chaussée*, pp. 71- 85, Paris.

Flageollet J.C., 1989, « Les Mouvements de Terrain et leur Prévention », *Revue de Géographie Alpine*, 78 p., Paris.

Freycon V., 1999, *Les GPS -Principes de fonctionnement et d'utilisation*, document technique CIRAD p.25, Paris.

Fruneau B., 2001, Interférométrie radar satellitaire appliquée au déplacement de la surface de la terre, Laboratoire de géomatériaux, Université de Marne la Vallée, pp 119 -143, Paris.

Girault F. et Memier M., 1999, «Auscultation des Versants Instables » *Bulletin Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, pp. 24-32, Paris.

Glotzl Baumesstechnik 1995, *Catalogue d'Appareils de Mesures et de Surveillance*, pp 25 -45 Germany.

Grimault F., 1977, Cours de Topographie Générale, E.N.S.G., 70 p. Arzew.

Humbert M., 1983, « La cartographie des risques liés aux mouvements de terrain, Hydrogéologie » *Géologie de l'ingénieur*, n°2, pp.71-79, BRGM, Orléans.

Kazmier L.J., 1982, *Statistiques de Gestion*, Série Schaum, Editions Mc Graw Hill, Florida, pp. 28-64, 89-173, USA.

Levallois J.J., 1978, Géodésie Générale, Tome 2, *Géodésie Bidimensionnelle*, Collection de l'I.G.N., Paris.

Levallois J.J., 1978, *Géodésie Générale*, Tome 4, Calcul de Triangulation, Collection de l'I.G.N., Paris.

Matichard Y. et Pillard J. 1997, Système d'Auscultation en Temps Réel d'un Versant Instable, 5th International Symposium on Landslides, pp 459-462, Lausanne.

Maquaire M. Levoy F. 1987, La Topométrie en Géomorphologie Dynamique, Centre de Recherche en Géographie Physique, pp 25-45, Paris

Mongereau N., Sanglerat G., David L. et Millers H. (1985), « Mouvements de terrain en zone urbaine:exemple la ville de Lyon », *Bulletin de l'AIGI*, N° 31 pp 93-103,Paris .

Millies-Lacroix A. 1981, « Classification des talus et versants instables » *Bulletin de Liaison Laboratoire des Ponts et Chaussée*, pp 55-6 Paris

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, N° arch. 117989, 42 p R.F.A.

Résultats du LNTP Est 2003 ,1984 (Laboratoire Nationale des travaux publics de l'EST), Constantine.

Revue Construire, N° 30 1989, Publication Ministère de l'Équipement, pp 26-40, Algérie.

Ralducci M. Custodi A.1989, « Les Glissements de Terrain du à l'Erosion », 12^{ème} Congrès International de Mécanique des Sols, p p 1535-1538, Rotterdam

Sanglérat G et Costet J, 1975, « Cours pratique des mécaniques des sols. Plasticité et calcul du tassement », T 1. Dunod; 285 p., Paris

Spiga Y 2001. « L'aménagement sur les terrains marneux a gypse du constantinois ou quand le déterminisme physique doit l'emporter », *Revue Sciences et Technologie* n° 16 pp 99-108, Université de Constantine.

Vachon P.W., D. Geudtner, A.L. Gray, and R. Touzi; 1995, « synthetic aperture radar repeat-pass interferometry Implications for RADARSAT »; *Journal canadien de télédétection*, Vol. 21, No. 4, pp 441-454.

Vila J.-M. 1980. La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens. Thèse, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI, 2 vol., 665 p.