

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS-SÉTIF (ALGÉRIE)

MÉMOIRE

Présenté à la Faculté des Sciences
Département de Physique

Pour l'Obtention du Diplôme de

MAGISTER

Option : Sismologie

Surveillance sismique de la région de Constantine
par réseaux GPS et sismologique

ISSAM ABACHA

Soutenu publiquement le : 01/02/2009
Devant la commission d'examen :

Mr. Halim HAROUN	Président	Professeur Université Ferhat Abbas Sétif
Mr. Abdelkarim YELLES-CHAOUICHE	Rapporteur	Directeur de recherche CRAAG Alger
Mr. Hammou DJELLIT	Examineur	Directeur de recherche CRAAG Alger
Mr. Fethi SEMMANE	Examineur	Maître de recherche CRAAG Alger
Mr. Kamel LAMMALI	Invité	Ingénieur en Chef CRAAG Alger

Remerciements

Au nom de Dieu le Clément, le Miséricordieux.

Je remercie Allah le tout-puissant qui m'a donné la force et la volonté de continuer à travailler sérieusement et arriver à finir ce modeste travail, que je dédie à toutes les personnes, dont les noms viennent ci-après.

Je remercie infiniment Monsieur Yelles, directeur du CRAAG et promoteur de ce mémoire, qui m'a encadré et suivi pendant deux années. Je le remercie encore pour tous les moyens qu'il m'a fournis pour me faciliter la tâche. Au nom de tous mes collègues du groupe de sismologie, je le remercie pour les cours qu'il nous a donnés pendant l'année théorique, malgré ses occupations en tant que directeur d'un centre de recherche. J'ai été très content de travailler en sa compagnie. Je lui souhaite, une longue vie et beaucoup de réussites dans sa noble carrière.

Mes remerciements vont aux membres de jury:

Je remercie Mr Haroun d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance. Je le remercie, de ses efforts pour que la promotion de la sismologie réussisse dans notre pays. A travers lui, je remercie spécialement l'ancien chef de département de physique, monsieur Hachemi Hacem, de sa responsabilité vers le groupe des étudiants de sismologie pour nous préparer le meilleur environ pour étudier et ses occupations pour choisir les enseignants les plus compétents, et ses contacts avec les responsables des secteurs spécialisés en domaine de cette branche d'étude. Sans oublier tous les travailleurs de notre institut et de toute l'université de Sétif, pour leurs services et leur belle réception.

Je remercie Monsieur Djellit pour ses cours qu'il nous présentait dans l'année théorique sur la géologie générale et pour la sortie de terrain où il nous a permis pour la première fois de visiter et de voir les structures géologiques. Aussi, je le remercie d'examiner mon travail.

L'examineur Monsieur Semmane, je le remercie d'être un membre, et aussi je le remercie de tous les conseils qu'il m'avait donnés lors de mes séjours dans le laboratoire de la sismologie du CRAAG.

Ce travail a été réalisé avec les deux groupes de recherche du Département "Etudes et Surveillance Sismiques" du CRAAG : celui de Mesures des Déformations et de la Sismologie.

Je remercie spécifiquement le Chef de Laboratoire de Mesures des Déformations, Monsieur LAMMALI Kamel, qui m'a suivi dans la partie théorique et expérimentale du GPS. Son expérience de terrain m'a appris beaucoup sur l'acquisition des données. J'ai aimé travailler avec lui car il est

sérieux lors de son travail. Il m'a donné des conseils précieux sur la méthodologie de travail et je le remercie encore d'avoir été comme un père. Mes remerciements s'adressent aussi aux autres membres de son laboratoire: BELLIK Amar, BACHA Wahab.

Mes remerciements vont aux membres du laboratoire de la sismologie, en particulier HANED Abderrahmene pour toutes les aides qu'il m'a données en ce qui concerne la partie sismologique de ce mémoire, tout pour l'acquisition, le dépouillement et le traitement des données, et pour l'établissement des cartes. Je remercie aussi ALLILI Toufik, BELDJOUDI Hamoud pour leur précieuse aide.

Tous les gens du CRAAG, chercheurs, agents de sécurité, femmes de ménages, les administrateurs et tous les autres employés du CRAAG, je les remercie et je leur souhaite beaucoup de réussite dans leur travail.

Aussi les gens de la station régionale de Constantine, surtout monsieur AMRANI Azouz, pour toutes les facilités qu'il m'a fournies lors de mon séjour de travail chez eux, afin de finir ce mémoire.

Je remercie chaleureusement mes enseignants de l'année théorique, qui nous ont ramené la lumière sur cette nouvelle filière au niveau de notre département, où ils ont fait des efforts pour nous enseigner et nous apprendre l'essentiel.

Je remercie aussi mes collègues pour leurs encouragements, leurs aides et les beaux moments qui nous avons passé ensemble pendant trois années d'étude. Nous étions comme des frères pour le travail en commun.

Vous, mes parents, je vous remercie très très fort, grâce à vous, Dieu m'a permis d'arriver à ce niveau. Merci pour vos Invocations en ma faveur, merci aussi pour vos encouragements, vos conseils et les conditions que vous m'avez préparé pour bien étudier. Aussi, je remercie tous mes frères et toutes mes sœurs.

A toutes et à tous encore une fois, merci.

Issam ABACHA

Avant propos

Les séismes à travers le monde menacent la vie humaine du fait de leurs effets sur le bâti construit par l'homme. Le récent séisme qui s'est produit le 12 Mai 2008 en Chine, dans la région du Sichuan et de magnitude $M_w=7.9$ en est la plus parfaite illustration. Près de 80 000 morts, des centaines de milliers de blessés et près de 6 millions de personnes sans abri. Ainsi le risque sismique à travers le monde ne cesse d'augmenter en raison de la croissance démographique, du développement sans cesse croissant des centres urbains mais aussi du non respect des normes de construction surtout dans les pays en voie de développement.

L'Algérie a été frappée au cours de son histoire par de nombreux séismes destructeurs. Parmi les plus récents ceux du 10 Octobre 1980 à El Asnam ($M_w=7.3$), du 25 Octobre 1985 à Constantine ($M_s=6.0$) et du 21 Mai 2003 de Boumerdes ($M_w=6.8$). Ces événements sismiques qui ont générés des effets désastreux ont montré la vulnérabilité de notre pays face au risque sismique en raison d'une grande concentration démographique et industrielle existante dans le nord de l'Algérie.

L'existence du risque sismique dans notre pays s'explique par la position de la région Nord au niveau de la frontière de plaque Africaine et Eurasienne. La convergence des deux plaques, liée à l'expansion océanique au niveau de la dorsale Atlantique, produit les reliefs observés autour de la Méditerranée. Ces reliefs dans la partie sud de la Méditerranée constituent la chaîne Tellienne (Atlas Tellien), segment orogénique périméditerranéen de la ceinture active Alpine et Himalayenne qui s'étend du Sud-Ouest Asiatique à l'Océan Atlantique (M. Durand Delga, 1969). Ce contexte géodynamique régional a engendré dans le Nord de l'Algérie, sur une bande d'environ 300 km de large, un ensemble de structure tectonique (plis, failles) de direction générale perpendiculaire à la direction de convergence (NNW-SSE) des plaques tectoniques.

L'occurrence du séisme de 21 Mai 2003 de Boumerdes a conduit les autorités algériennes à lancer une nouvelle stratégie de réduction du risque sismique dans notre pays.

Parmi les actions engagées on peut citer :

- 1) Le renforcement des activités des centres spécialisés tel que le CRAAG ;
- 2) Le lancement de nombreux projets scientifiques pour la réduction du risque : Projet de Géodésie spatiale, projet de campagne en mer...
- 3) Une plus grande sensibilisation des populations à la construction parasismique. Un renforcement de la législation sur le bâti ancien, sur les constructions illicites, sur le parachèvement des constructions ainsi que la formation de spécialistes dans le domaine a été engagé ;
- 4) La mise en place de formation (Ingénierat, Magister...) en sismologie dans les Centres Universitaires du pays. L'exemple est donc donné par la mise en place en 2006 de la première post graduation de sismologie au sein de notre Université de Sétif et la sortie de la première promotion de Magister en Juin 2007.

Cette promotion, la première en Algérie, fruit de la collaboration entre l'Université de Sétif, le CRAAG et les universités de Strasbourg apporte une contribution certaine à la réduction du risque dans notre pays.

Sommaire

Remerciement	
Avant propos	
Introduction générale.....	1

PARTIE I : INSTALLATION D'UN RESEAU GPS AUTOUR D'UNE FAILLE ACTIVE –FAILLE D'AIN SMARA-

CHAPITRE I : TECTONIQUE DE LA REGION MEDITERRANEENNE

I.1	Introduction.....	4
I.2	Cadre sismo-tectonique.....	5
	I.2.1 Situation des principales régions et structures géologiques de la Méditerranée.....	5
	I.2.2 La convergence Afrique-Eurasie.....	6
	I.2.3 Tectonique de la Méditerranée.....	8
	I.2.4 La sismicité de la Méditerranée.....	10
I.3	La Méditerranée occidentale.....	11
I.4	La déformation active en Algérie.....	13
	I.4.1 Dans la région d'Ech Chelif.....	13
	I.4.2 Dans la région d'Alger (Boumerdes).....	14
	I.4.3 Les projets géodésiques (GPS) en cours en Algérie.....	16

CHAPITRE II : RAPPEL DE GEODESIE

II.1	Introduction.....	17
II.2	Définition.....	18
II.3	Notion fondamentale.....	18
	II.3.1 L'ellipsoïde géodésique.....	18
	II.3.2 Modélisation de la surface terrestre (géoïde).....	19
	II.3.3 la déviation de la verticale.....	20
	II.3.4 Coordonnées géographiques géodésique et astronomiques.....	20
II.4	Méthodes (techniques) de la géodésie.....	20
	II.4.1 Techniques terrestre de géodésie (techniques de géodésie classique).....	20
	II.4.1.1 Etablissement des réseaux géodésiques.....	21
	II.4.1.2 L'astronomie de position.....	21
	II.4.1.3 Contrôle horizontal (planimétrie).....	21
	II.4.1.4 Contrôle vertical (altimétrie).....	21
	II.4.2 La géodésie spatiale.....	22
	II.4.2.1 Mesures de distances.....	22
	II.4.2.2 Mesures de directions.....	22
	II.4.2.3 Systèmes de navigation.....	23
	II.4.2.4 Mesures de variations de distances ; effet Doppler; système DORIS.....	23
II.5	Présentation du système GPS.....	24
	II.5.1 Le système GPS.....	24
	II.5.1.1 Composition du système GPS.....	24
	II.5.1.2 les signaux GPS.....	26

II.5.1.4	Services fournis.....	27
II.5.2	Principe de fonctionnement du système GPS.....	27
II.5.3	Positionnement par GPS.....	28
II.5.3.1	Principe de mesures GPS.....	29
II.5.3.2	Utiliser les différences de mesures.....	32
II.5.4	Précision du système GPS.....	33
II.5.4.1	Facteurs de qualité du positionnement.....	33
II.5.4.2	Erreurs de mesures UERE (User Equivalent Range Error).....	34
II.6	La déformation.....	35
II.6.1	L'aspect dynamique des déformations.....	35
II.6.1.1	Tenseur de contrainte.....	35
II.6.1.2	Tenseur de déformation.....	36
II.6.2	Evaluation des déformations.....	38
II.6.2.1	Calcul du tenseur de déformation.....	38
II.6.2.2	Surveillance géodésique des failles actives.....	39

CHAPITRE III: ANALYSE DE LA FAILLE D'AIN SMARA

III.1	Introduction.....	41
III.2	Contexte géologique de la région de Constantine.....	41
III.2.1	La stratigraphie du secteur étudié (Analyse lithologique).....	41
III.2.2	Le cadre néotectonique de la faille d'Ain Smara.....	43
III.3	Analyse de la sismicité.....	45

CHPITRE IV : INSTALLATION D'UN RESEAU GPS AUTOUR DE LA FAILLE ACTIVE D'AIN SMARA

IV.1	Introduction.....	50
IV.2	Acquisition et traitement des données.....	51
IV.2.1	Mission de reconnaissance du terrain : Avril 2007.....	51
IV.2.2	Deuxième mission de reconnaissance du terrain : 24-27/12/2007.....	54
IV.2.3	Première campane d'observation : Constantine 14-24/01/2008.....	54
III.2.3.1	Déroulement de la mission.....	54
IV.3	Traitement des données.....	57
IV.3.1	Préparation des données.....	57
IV.3.2	Ashtech Solution.....	58
IV.3.3	Traitement des données.....	60
IV.4	Conclusion.....	64

PARTIE II : LA CRISE SISMIQUE DU 30/11/2007 DANS LA REGION DE CONSTANTINE

CHAPITRE V : ETUDE DE L'ACTIVITE SISMIQUE DE LA REGION DE CONSTANTINE

V.1	Introduction.....	66
V.2	Surveillance sismique de la région de Constantine.....	66
	V.2.1 Réseau REALSAS).....	66
	V.2.2 Réseau ADSN (Algerian Digital Seismic Network).....	67
V.3	Analyse de la sismicité.....	69
	V.3.1 Analyse statistique.....	69
	V.3.2 Analyse sismo-tectonique.....	71

CHAPITRE VI : ETUDE DE LA CRISE SISMIQUE (SISMICITE INDUITE) DE LA REGION DE AIN KERMA (REGION DE CONSTANITINE)

VI.1	Introduction.....	77
VI.2	Activité sismique enregistrée (30-11-2007-10-01-2008).....	77
VI.3	Explication du processus de transfert des eaux.....	79
VI.4	Cadre géologique.....	81
VI.5	Phénomène de sismicité induite.....	82
VI.6	Acquisition des données	83
	VI.6.1 Le réseau sismologique.....	83
	VI.6.2 Détermination des foyers.....	89
	VI.6.2.1 Dépouillement.....	89
	VI.6.2.2 Tri des données.....	90
	VI.6.2.3 Traitement des données.....	90
	VI.6.2.4 Statistiques.....	93
VI.7	Etude des événements sismiques.....	96
	VI.7.1 Distributions spatial des évènements.....	96
	VI.7.2 Distribution des foyers en profondeur.....	99
	VI.7.3 Mécanismes au foyer.....	100
VI.8	Conclusion.....	102
	Conclusion générale.....	103

Introduction générale

Le nord de l'Algérie est caractérisé par une sismicité modérée marquée parfois par d'importants séismes. Le premier séisme connu remonte au 2 Janvier 1365. Celui-ci a frappé la ville d'Alger.

Les différentes études de la sismicité, effectuée depuis l'époque de la période française à permis de produire de nombreux catalogues (Hée (1950), Rothé (1950), Grandjean (1954), Benhallou, (1971) et Roussel (1973)). Ces catalogues indiquent que la sismicité est localisée essentiellement dans la région septentrionale de la plaque africaine, dans la bande comprise entre la région littorale et la flexure sud atlasique. Cette sismicité délimite ainsi la frontière de plaques entre l'Afrique et l'Eurasie. L'ampleur de cette sismicité s'atténue du Nord vers le Sud puisqu'au niveau de la plateforme saharienne, la sismicité est absente.

Dans la région Nord, l'ampleur de la sismicité est différente d'une région à une autre sismicité et se présente en donc en zones sismiques. Chaque zone est caractérisée par un niveau de sismicité liée aux caractéristiques et la présence de structures actives dans la zone.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la sismicité de la région de Constantine du fait que peu d'études se sont focalisées sur cette région, que la région connaît une sismicité intense se traduisant par de nombreux petits séismes et enfin du fait que la région a été touchée à plusieurs reprises par des événements modérés. Quantifier l'aléa de cette région et réduire le risque restent une priorité dans la mesure où dans cette région se situent de grands centres urbains tels que Constantine, Mila ou de grandes infrastructures socio-économiques tels que le barrage de Beni Haroun.

Les études tectoniques dans la région de Constantine sont essentiellement basées sur les travaux de Vila (1980), Aissaoui (1984), Meghraoui (1988). Le travail de Bounif et al. (1989) s'est attelé à étudier le séisme qui a touché la région le 27 Octobre 1985.

Les récents travaux de Harbi et al, (1999) se sont intéressés quant à eux à la sismicité historique de la région.

Ainsi de ces différentes études, quatre failles actives semblent localisées autour de Constantine : Il s'agit des : faille Nord Constantinois, faille de Sigus, faille de Temlouka et faille d'Ain Smara. Cette dernière produit la majorité des séismes enregistrés dans la région de Constantine. Trois séismes de magnitude importante se sont produits, avec une période de retour de 39 ans, qui sont : celui du 4 août 1908 de magnitude $M_s = 5.2$, celui du 6 août 1947 de magnitude $M_s = 5.0$ et celui 27 octobre 1985 de magnitude $M_s = 6.0$.

Il est important de noter que la région de Constantine est concernée par un deuxième risque majeur qui est celui des glissements de terrain. Des études récentes ont été effectuées par les autorités locales pour tenter de quantifier l'aléa généré par ces glissements.

Afin de procéder à l'évaluation de l'aléa de la région, il est apparu important d'étudier l'activité sismique de la région, mais aussi d'étudier les mécanismes de la déformation. Pour cela et pour la première fois un réseau de surveillance géodésique a été installé dans la région. Il a pour but de quantifier au cours du temps les taux de déformation et de préciser ultérieurement les mécanismes de cette déformation.

Ce travail a consisté à l'application des méthodes d'observations géodésiques et sismologiques dans le cadre d'une surveillance sismique dans la région de Constantine. Pour ce fait, ce mémoire est divisé en deux parties :

La première partie est consacrée à l'installation d'un réseau de surveillance GPS autour de la faille d'Ain Smara. Ce réseau est proposé pour suivre les mouvements et la déformation de cette faille et de mieux comprendre sa cinématique. Cette méthode est nouvelle en Algérie. Dans cette partie, plusieurs chapitres ont été développés:

Le Chapitre I est consacré la déformation tectonique en Méditerranée et les différents travaux géodésiques effectués pour l'estimation des taux de convergence et les régimes de déformations dans les différents domaines méditerranéens, occidentaux et orientaux, ainsi que les travaux et les programmes géodésiques en Algérie.

Dans **le Chapitre II**, nous avons pensé important de faire un rappel de géodésie. Nous citons aussi, les différentes méthodes de la géodésie, ainsi que la théorie de déformation.

Dans **le chapitre III**, nous présentons la faille d'Ain Smara, principale structure active de la région. La sismicité historique de cette faille est présentée.

Dans **le chapitre IV**, nous présentons les résultats de l'acquisition et du traitement des données obtenues à partir du réseau GPS installé dans la région. Une première analyse des données est présentée

Dans la seconde partie de ce mémoire, nous nous sommes intéressés à la sismicité de la région de Constantine.

Dans **le chapitre V**, nous présentons la surveillance sismique de la région. Nous y présentons l'ensemble des informations sur la sismicité historique de la région ainsi que sur l'activité sismique récente.

Dans **le chapitre VI**, nous présentons notre travail sur la crise sismique de Novembre 2007 produite dans la région d'Ain El Karma au nord-ouest de la ville d'Ain Smara. L'acquisition, l'analyse des données des campagnes de terrain est présentée dans ce chapitre

Le Chapitre VII est consacré à la conclusion générale de ce mémoire.

**PARTIE GEODESIQUE : SURVEILLANCE
SISMIQUE DE LA FAILLE ACTIVE D'AIN SMARA
PAR RESEAU GPS**

CHAPITRE I : TECTONIQUE DE LA REGION MEDITERRANEENNE**I.1. Introduction**

Dans la région Méditerranéenne s'affrontent les plaques Africaine (ou plus exactement sa partie Ouest appelée Nubie) et Eurasiatique. La frontière de plaque associée à cette convergence correspond à une zone de déformation s'étalant du point triple des Azores jusqu'à la région Anatolienne. Cette convergence a conduit à la création des chaînes de montagnes qui entourent la Méditerranée mais aussi à l'existence de zones peu déformées. Ces zones sont interprétées comme des microplaques (Adriatique et Anatolie) dont la cinématique propre se superpose au mouvement de convergence général. Les processus de déformation sont générés par différents processus géodynamiques (subduction, ouvertures de bassins océaniques), conséquences de processus profonds. A cette déformation de la région méditerranéenne est associée une sismicité qui touche un certain nombre de pays des deux rives. Cette sismicité semble prononcée dans la région Adriatique et dans la région égéenne alors qu'elle apparaît modérée dans la région Maghrébine.

I.2. Cadre sismo-tectonique

I.2.1. Situation des principales régions et structures géologiques de la Méditerranée

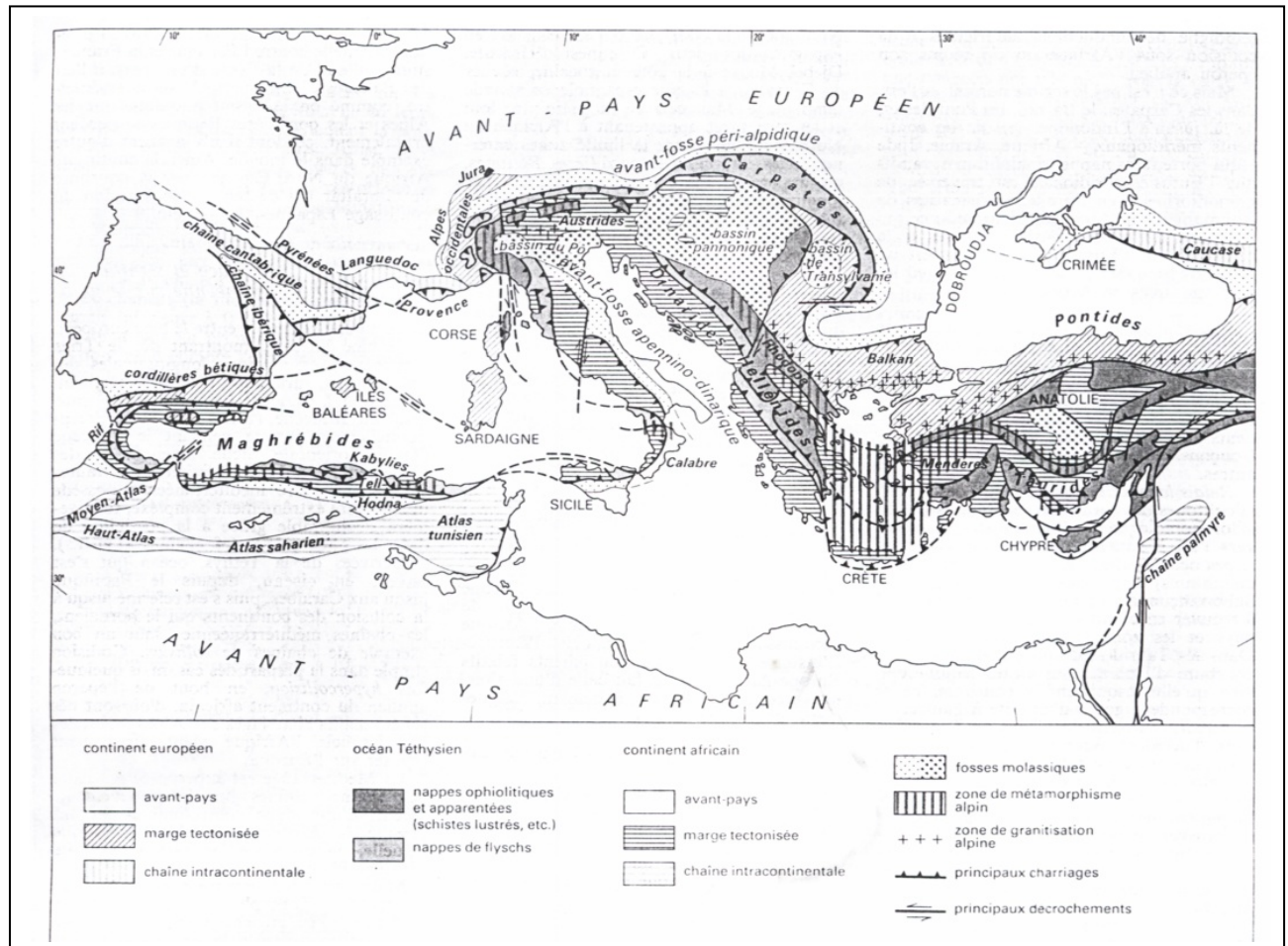


Figure I.1 : Situation des principales régions et structures géologiques en Méditerranée, (JEAN AUBOUIN)

Les continents eurasiatique et africain forment les avant-pays des chaînes qui sont charriées sur leurs marges. On appelle zones externes les parties des chaînes alpines directement adjacentes à l'avant-pays dans lesquelles on reconnaît des terrains simplement déformés sans métamorphisme. Les zones internes sont au contraire, effectuées par le métamorphisme alpin.

Trois zones de contact ont été distinguées dans la région Méditerranéenne :

- Le contact Méditerranée-socle africain : Entre Sousse et Port-Saïd, la couverture du bâti stable africain s'enfonce au nord sous les eaux.
- Le contact Méditerranée-zones plissées extra-alpines : (La côte orientale du Tunisie), (la côte du Levant, de Port-Saïd à Alexandrette) et (Provence).
- Le contact Méditerranée-chaînes alpines : (Cordillères Bétiques et Maghrébides), (Pyrénées) (Apennins), (sud des alpes occidentales et Corse), (ensemble dinariques) et (chaîne Taurique).

I.2.2. La convergence Afrique-Eurasie

La convergence de la plaque Afrique vers la plaque Eurasie en Europe détermine la condition cinématique aux limites du système Méditerranée-chaînes alpines. Cette remontée est liée à l'expansion océanique au niveau de la dorsale Atlantique. Les vitesses d'extension entre les plaques Eurasie-Amérique du Nord, Afrique-Amérique du Nord et Afrique-Amérique du Sud indiquent une ouverture moyenne pour l'Atlantique nord de 25 mm/an alors qu'elle atteint 40 mm/an pour l'Atlantique sud. Conséquence de cette différence de vitesse d'ouverture, l'Afrique présente un mouvement de rotation antihoraire par rapport à l'Europe avec un pôle de rotation situé au large du Maroc. La valeur actuellement pour le pôle Afrique-Europe est donnée par le modèle cinématique global NUVEL1A (DeMets et al., 1990; DeMets et al., 1994) qui propose un pôle situé à (longitude -20.6°E, latitude 21.0°N, 0.13±0.02 deg/Ma).

Le tableau I.1 présente les valeurs des paramètres d'Euler pour le mouvement relatif de la plaque Afrique par rapport à l'Eurasie pour différents modèles.

Modèle et source	Lat. (deg)	Long. (deg)	Vitesse Ang (Deg./Ma)	Données utilisées
Argus et al. (1989)	18.8	-20.3	0.10±0.02	Les anomalies magnétiques le long de la dorsale médio-Atlantique.
NUVEL1A (DeMets et al., 1990,1994)	21.0	-20.6	0.13±0.02	Même chose comme Argus.
Crétaux et al (1998)	26.1	20.2	0.139±0.03	4 sites, solution DORIS.
Albarello et la., (1995)	41.6	-11.8	0.117	Même chose comme Argus et al., (1989).
REVEL (Sella et al., 2002)	18.2	-20.0	0.06±0.005	5 sites, solution GPS.
Kreemer et Holt (2001)	2.6	-21.0	0.036±0.005	7sites, solution GPS.
IGS02P09-M1 Nocquet et Calais, 2004)	2.1	-20.0	0.07±0.02	4 sites (GOUG, MASI, HARB et NKLG), solution GPS global du réseau mondial IGS.
IGS02P09-M2 N et C, 2004)	7.7	-18.3	0.07±0.02	6 sites (4 sites M1 + HRAO, SUTH), solution GPS global du réseau mondial IGS.
WEURO-Modèle 1	15.5	-13.9	0.07±0.01	3 sites (NOTO, LAMP et SRER), solution GPS.
WEURO-Modèle 2	14.2	-17.5	0.07±0.01	4 sites (3 Modèle 1+ MASP), solution GPS.

Tableau I.1. Paramètre d'Euler du mouvement relatif Afrique/Europe (Nocquet et Calais, 2004).

Les vitesses prédites par ces modèles sur l'ensemble de la frontière de plaques.

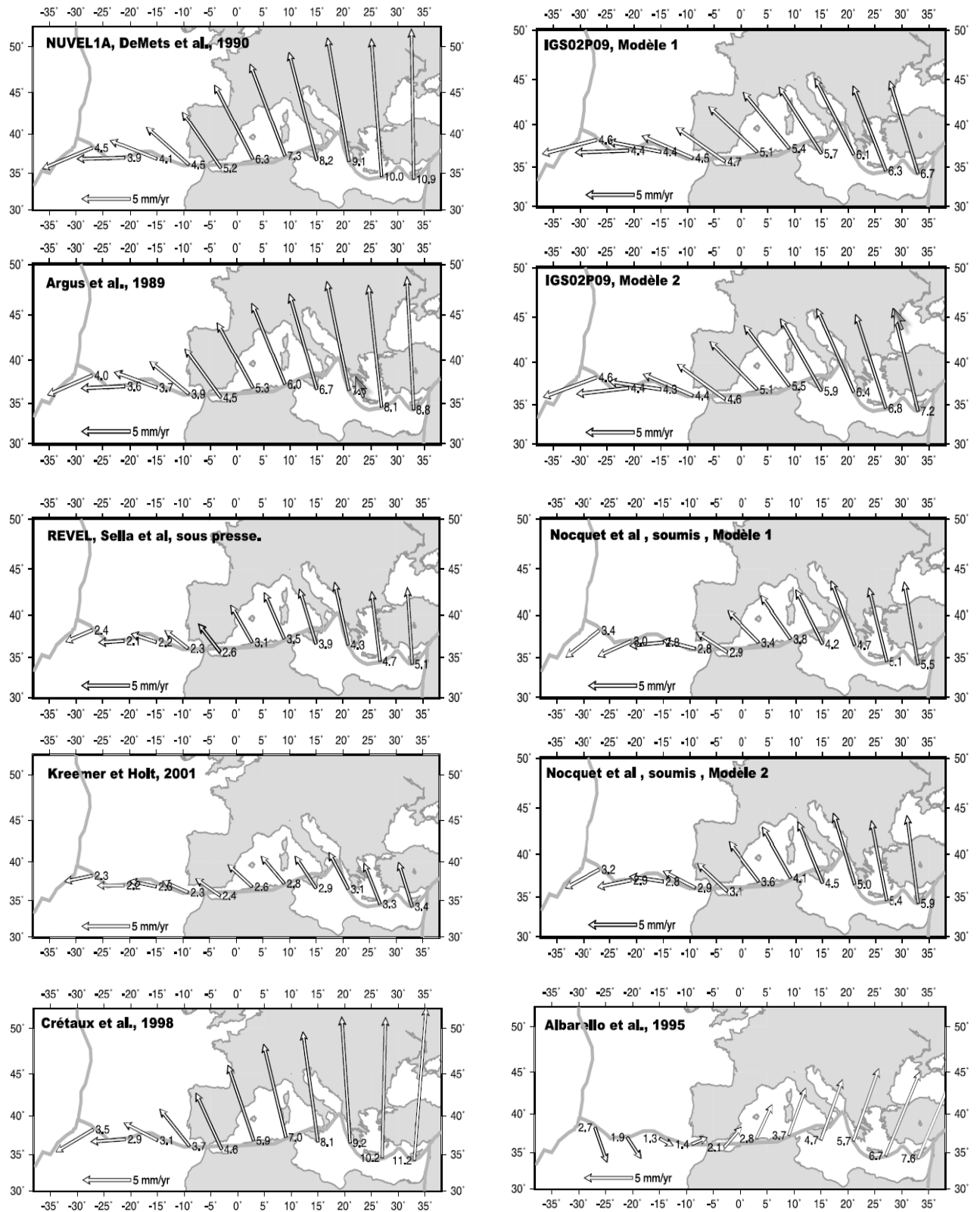


Figure. I.2: Condition cinématique à la frontière de plaques Afrique/Eurasie prédite par différents modèles (Nocquet, 2002).

Tous les modèles géologiques et géodésiques s'accordent à prédire une convergence en Méditerranée dans une direction allant de N0 à N45W à l'exception de Albarallo et al. (1995).

Les vitesses de convergence prédites par ces modèles vont de 11 mm/an à 3 mm/an pour la Méditerranée orientale, de 8 à 2 mm/an pour la Méditerranée occidentale. La cinématique de la Méditerranée orientale est caractérisée par une convergence plus rapide de l'Afrique vers l'Europe (1.5 cm/an au niveau du Caire) qu'en Méditerranée occidentale (Nocquet, 2002).

Les directions de convergence sont compatibles entre les modèles. La direction de convergence en Méditerranée orientale est comprise entre N0 et N330, et en Méditerranée occidentale, entre N350 et N300. Les modèles basés sur des données géodésiques indiquent des vitesses de convergence de 30 à 60 % plus faibles que NUVEL1A et Argus et al. (1989), à l'exception de Crétaux et al. (1998), (Nocquet, 2002).

I.2.3. Tectonique de la Méditerranée

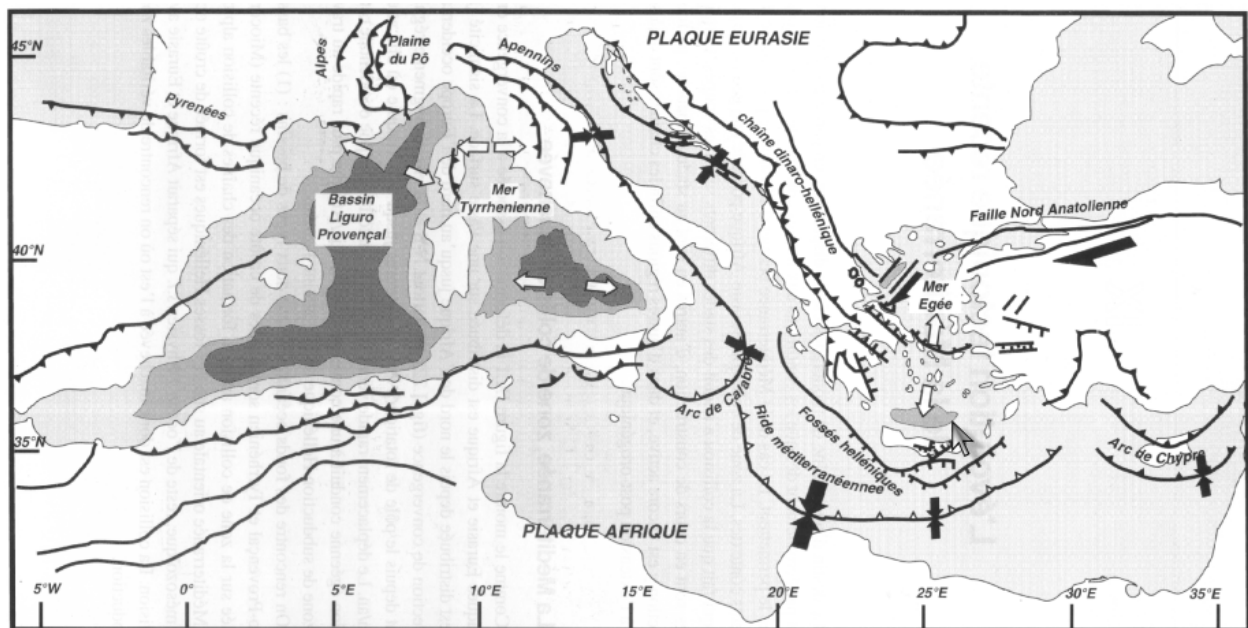


Figure I.3 : Carte tectonique de la Méditerranée (Laurent Jolivet, 1997).

Dans les fonds océaniques méditerranéens, on rencontre dans deux types de bassins :

- Les bassins Liguro-Provençal et Tyrrhénien sont formés de croûte océanique récente (Miocène),
- La Méditerranée orientale au sud des fosses Helléniques est formée d'une croûte océanique mésozoïque.

Associé à l'existence de ces bassins, on peut affirmer que les différents processus géodynamiques marquent actuellement la région Méditerranéenne. Ce sont :

Subductions : La lithosphère océanique de la Méditerranée orientale subducte sous les deux arcs Hellénique et Calabrais. Les fosses Helléniques ne représentent pas le front de subduction mais des fossés d'avant-arc en extension. Le front lui-même est reporté au pied de la marge de Libye au front du prisme d'accrétion de la ride Méditerranéenne. Les deux zones de subduction passent latéralement à des zones de collision au débouché de la mer Adriatique et au sud de la Turquie.

Collisions : apparaît dans :

- La chaîne Dinaro-Hellénique. Cette chaîne se prolonge à l'est dans la chaîne des Taurides en Turquie et plus loin encore rejoint la ceinture péri-Arabe (Zagros et Oman) et l'Himalaya.
- Les deux rives de l'Adriatique : le long du tronçon Dinarique (îles ioniennes) et au front de la chaîne des Apennins. Ces deux zones de collision sont actives et reliées au nord par l'autre chaîne des Alpes.
- La chaîne de Maghrébides qui se prolonge en Afrique du Nord sur toute la marge nord-africaine depuis les rives de l'Atlantique jusqu'à Tunisie.
- La chaîne des Pyrénées, résultant de la fermeture d'un rift Crétacé entre la péninsule ibérique et la plateforme européenne à l'Eocène.

Extrusion : A l'extrême Est du domaine méditerranéen le bloc anatolien coulisse très rapidement vers l'Ouest le long de la Faille Nord Anatolienne. Ce bloc anatolien expulsé vers les zones de subduction helléniques par la collision Arabie-Eurasie dans l'Est de l'Anatolie.

Extension post-collision :

- Dans la Méditerranée occidentale, les bassins Liguro-Provençal et Tyrrhénien, ainsi que la Mer d'Alboran, sont situés sur l'emplacement des zones internes des Apennins et des Maghrébides. L'extension de la Mer Tyrrhénienne est en particulier surimposée aux structures compressives des Apennins internes et de la Corse alpine. L'ouverture de ces bassins a débuté à la fin de l'Oligocène et se poursuit aujourd'hui dans le sud de la Tyrrhénienne au nord de la Sicile.
- Dans la Méditerranée orientale, la Mer Egée est située sur l'emplacement d'une chaîne de collision faisant le lien entre les Helléniques et les Taurides. L'ouverture de la Mer Egée, est active depuis le début du Miocène.

I.2.4. La sismicité de la Méditerranée.

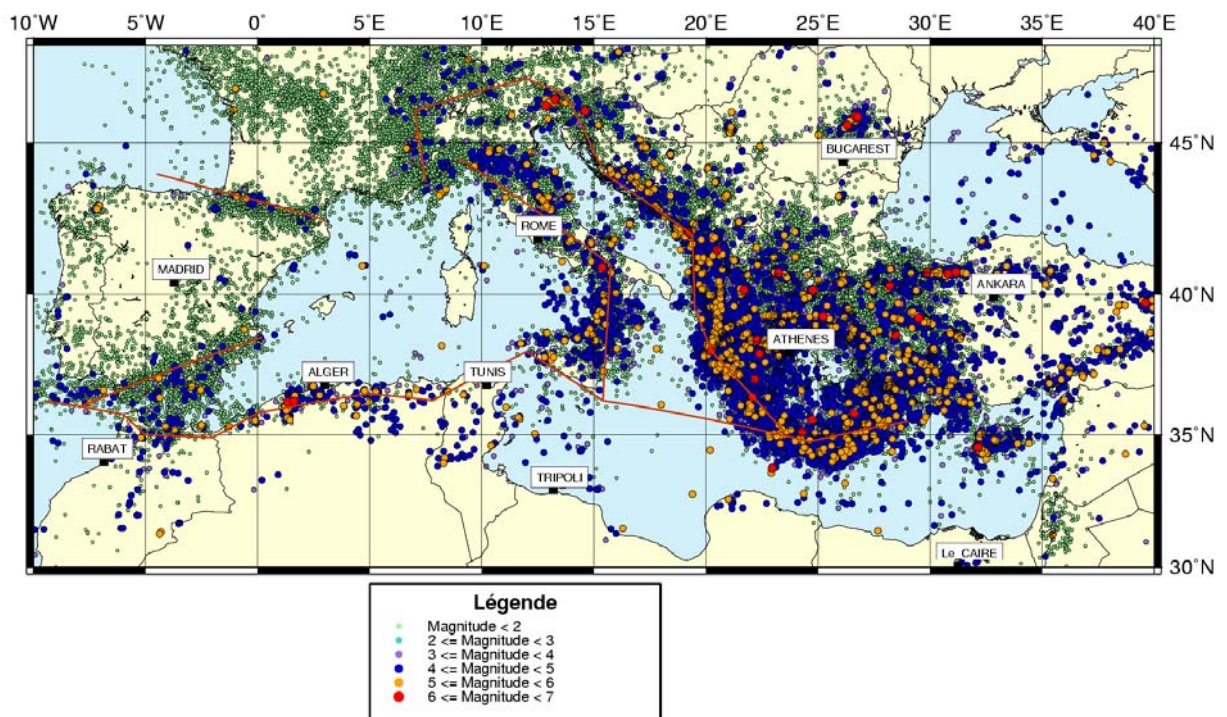


Figure I.4: Sismicité du Bassin Méditerranéen 1928-2003 (NEIC).

La sismicité dans la région Méditerranéenne matérialise les zones de déformation suivantes :

- **La frontière de plaques Afrique-Eurasie**

La distribution de la sismicité matérialise la frontière de plaques séparant les plaques Afrique et Eurasie en Méditerranée. D'ouest en est, la frontière commence au milieu de l'Atlantique au point triple des Açores. Elle se prolonge à l'est par la « Terceira Ridge », structure orientée N120 et en extension NW-SE. La frontière de plaques rejoint ensuite la faille de Gloria, orientée est-ouest fonctionnant en décrochement dextre. Elle atteint ensuite le détroit de Gibraltar, puis se prolonge dans les chaînes du Maghreb parallèlement à la côte. Au niveau de la Tunisie, la zone sismique tourne brutalement vers le nord-est et forme un arc le long de la Sicile et de la Calabre pour remonter l'Italie le long des Apennins. La sismicité se prolonge dans les Alpes occidentales. A partir de là, une branche suit les Alpes centrales et orientales, tandis que la branche principale suit les Dinarides en longeant la côte septentrionale de la mer adriatique. Elle descend ensuite le long de la côte albanaise. La faille de Céphalonie fonctionnant en décrochement dextre assure la transition vers l'arc de subduction crétois et le système de déformation en Méditerranée orientale. La transition entre le régime extensif (Terceira ridge) - décrochant (faille de Gloria) - compressif (Maghrébides) indique que le régime de déformation est dominé par la rotation de l'Afrique par rapport à l'Eurasie (Nocquet, 2002).

- **Les blocs rigides ou les microplaques :**

- la microplaque adriatique ;
- La péninsule Ibérique ;
- La microplaque Anatolienne.

SW dans les Dinarides devenant NS au niveau de la région du Frioul. La limite sud de la plaque adriatique reste un problème majeur à la compréhension de la cinématique de cette frontière de plaques. Plusieurs auteurs ont proposé des pôles de rotation pour cette microplaque, dans eux, Calais et al, 2002 (long. 9.1° lat. 45.3° W= 0.5° /Ma), Anderson et Jackson, 1987 (long. 10.2° lat. 45.8°), Westaway, 1990 (long. 9.5° lat. 44.5° W= 0.3° /Ma) et Ward, 1994 (long. 6.3° lat. 46.8° W= 0.3° /Ma) (Nocquet et Calais 2004).

3) Mer Ionienne : Plusieurs auteurs ont proposé que la mer Ionienne ait un mouvement vers le NE dans un référentiel Europe stable, compatible au premier ordre avec le mouvement de la plaque adriatique. Dans ce cas, la zone de déformation allant de la zone Tunisie-Sicile à la Lybie accommode le mouvement relatif de la mer Ionienne relativement à l'Afrique (Nocquet, 2002).

4) La microplaque Ibérique : Les incertitudes sur les vitesses permet de proposer une valeur de la déformation intégrée à travers des Pyrénées de l'ordre 0.5 ± 1.5 mm/an en extension (Nocquet, 2002).

5) Le bloc Corso-Sarde et la mer ligure : Le mouvement relatif entre la Corse et la Sardaigne est très faible (< 0.5 mm/an), et que le bloc Corso-Sarde peut être considéré comme solidaire de l'Europe Stable, les modèles de rotation de la plaque adriatique indiquent une compression NS dans les Alpes maritimes et la mer Ligure (Nocquet, 2002).

6) Les Alpes : Dans les Alpes occidentales, le réseau REGAL permet de commencer à avoir une estimation précise de sa cinématique. Une prédominance de cisaillement dextre combinée à de l'extension EW (Calais et al, 2002). Ces résultats sont compatibles avec des conditions cinématiques aux limites imposées par la rotation de la plaque adriatique dans la plaine du Pô. Dans les Alpes orientales, les mouvements semblent indiquer un échappement vers l'est. Les vitesses géodésiques observées dans les Alpes orientales et au nord des Balkans correspondent à l'extrusion d'une partie du bassin pannonien vers l'est et le sud-est, liée au poinçonnement de la plaque adriatique dans les Alpes centrales au niveau de la région du Frioul. Les Dinarides joueraient le rôle de charnière en absorbant la convergence de la plaque adriatique relativement au bassin pannonien (~ 4 mm/an) et permettant un mouvement vers le sud-est le long de décrochements de direction NW-SE dans leurs parties internes (Nocquet, 2002).

7) Les chaînes du Maghreb : Comparativement aux autres zones du domaine méditerranéen, peu d'informations sur les déformations actuelles sont disponibles, en particulier en ce qui concerne l'Algérie. La zone comprise entre le banc de Goringe, située au sud-ouest de la côte portugaise, et l'Atlas tellien à l'ouest d'Alger est dominé par un régime transpressif, avec une direction de compression NS à NW-SE. Les structures accommodant cette déformation sont orientées NE-SW perpendiculairement à la direction de raccourcissement, de manière similaire à les failles d'El Asnam et Ain Smara. La zone de déformation est large de 50-100 km et le taux de raccourcissement à travers cette zone, calculé à partir des observations géologiques est de 1.0-2.3 mm/an (Nocquet, 2002).

I.4. La déformation active en Algérie

Les travaux de géodésie afin de quantifier la déformation ont commencé en Algérie suite au séisme d'El Asnam (mesures de nivellement et de triangulation). Ces observations géodésiques ont permis de contraindre les modèles de rupture des séismes de 1954 et de 1980).

I.4.1. Dans la région d'Ech Chelif

La région d'Ech Chelif est la zone la plus active dans la Méditerranée occidentale que marque l'affrontement des plaques d'Afrique et l'Europe où se sont produits plusieurs tremblements de terre de Magnitude ≥ 5 (McKenzie, 1972).

Dans la région d'Ech Chelif le CRAAG effectue des observations géodésiques pour l'étude des mouvements de l'écorce terrestre liés à la sismicité de la région et spécialement l'étude de la faille d'El Asnam. Après le séisme du 10 Octobre 1980 ($M_w = 7.3$), en Juin 1981 une première évaluation des mouvements verticaux et horizontaux par les méthodes géodésiques en remesurant le réseau géodésique d'état local. Par la suite, un réseau spécifique a été construit autour de la faille d'El Asnam (Dimitrov et Lammali, 1989). Les résultats des travaux de nivellement (l'évaluation des déformations verticales) de 36 repères (forment le réseau vertical) de 1976, 1981, 1985,7 ; 1986,9 ; 1987,4 et 1987,9 mettent en évidence la tendance du chevauchement NW-SE et indiquent des mouvements relatifs dans le même sens (Dimitrov et Lammali, 1989). Les déformations horizontales ont été déterminées avec la reprise d'un réseau de 15 points par la méthode classique de triangulation. Ces mesures altimétriques et planimétriques ont été entreprises sur toute la longueur de la faille (40 km NE-SW) pour suivre les mouvements post sismiques. Les résultats obtenus [Lammali et al., 1997] ont permis de comprendre les mécanismes de déformation de cette faille.

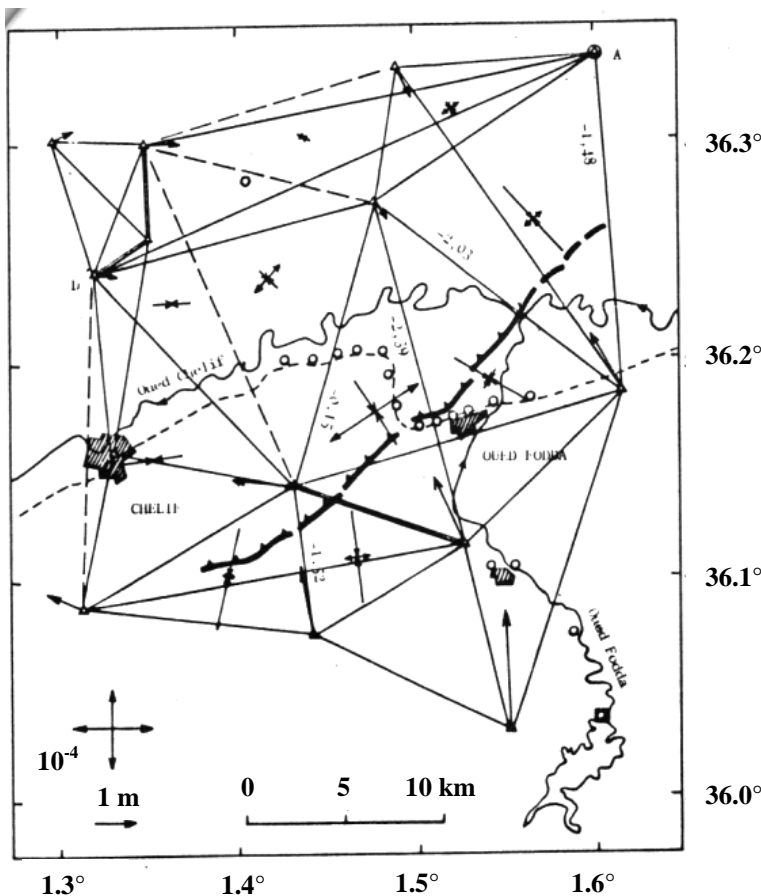


Figure I.6 : Carte schématique du réseau de surveillance utilisé pour l'évaluation des mouvements horizontaux et verticaux 1981 (Dimitrov et Lammali, 1989).

I.4.2. Dans la région d'Alger (Boumerdes)

Dans le cadre de la mise en œuvre de son programme de surveillance des structures actives par les mesures géodésique, le GRAAG a adopté la technologie de GPS et choisit, en 2001, la région Est d'Alger (région de Boumerdes) pour installer pour la première fois en Algérie, un réseau de surveillance.

Le 21 Mai 2003, un séisme de magnitude $M_w = 6.8$ a frappé la partie centrale au Nord de l'Algérie, dans la région de Boumerdes (40 Km Est d'Alger) avec une intensité X [Ayadi et al., 2003]. L'épicentre localisé par le CRAAG se situe à 7 kilomètres nord du village de Zemmouri (36.91°N, 3.56°E) [Yelles et al., 2003]. Ce séisme est généré par une faille inverse orientée NE-SW.

Deux mois avant le séisme de Boumerdes, en mars 2003, le réseau GPS avait été remesuré sur 10 sites dans la région de Thenia, approximativement 20 Km sud-ouest de l'épicentre. Ce réseau couvre seulement la partie Ouest de la région affectée par la déformation coséismique. Chaque site a été observé pendant 3 à 4 sessions de 24 heures à l'aide des récepteurs bi-fréquence Ashtech Z-12 et Z-Xtreme avec antennes géodésiques. Le réseau a été ré observé en juin 2003, deux semaines après l'événement, par les récepteurs bi-fréquence Ashtech micro-Z avec des antennes Choke-ring. Les données ont été traitées par le logiciel GAMIT, comprenant 10 sites IGS (International GPS Service) bien déterminés dans l'ITRF-2000 (International Terrestrial Reference Frame). A chaque site, le déplacement coséismique et le RMS (Root Mean Square) a été calculé.

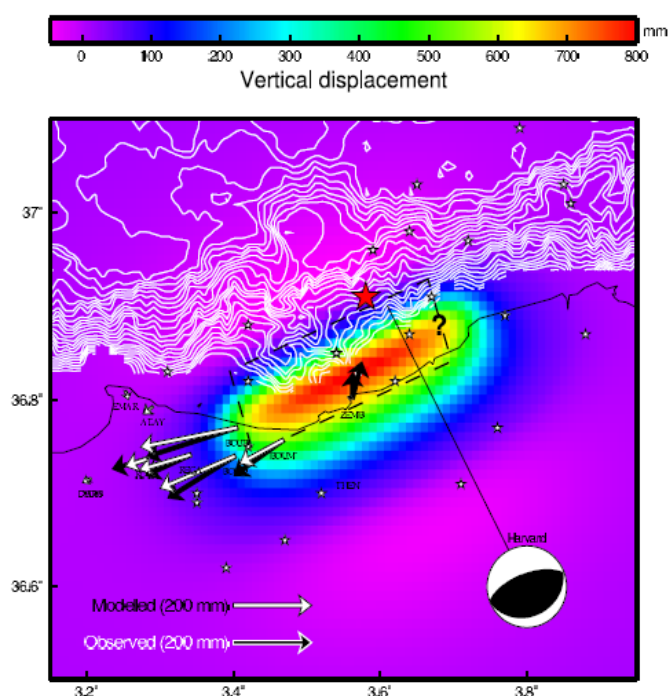
Ce travail a donné lieu à un article publié a GRL, par (Yelles et al., 2004). Les résultats obtenus proposent un Modèle avec les paramètres source suivants (où la latitude, la longitude, et la profondeur sont le point milieu du sommet de la faille rectangulaire) :

Glissement	Longueur	Profondeur	Largeur	Pendage	Longitude	Latitude	Azimut
180 cm	32 km	4 km	14 km	42°	3.53°	36.88°	205°

Tableau I.2 : Paramètre source du modèle « Best-Fit ».

- Les flèches noires : les observations de déplacement coséismique horizontal.
- Les flèches blanches : le modèle de ces observations.
- Les étoiles blanches : les répliques (CRAAG).
- L'étoile rouge : le choc principale (CRAAG).
- mécanisme focal de la base de données de Harvard CMT.
- Le point d'interrogation : la partie Est de la rupture n'est pas été observée.

Figure I.7: le déplacement cosismique d'après le modèle « Best-Fit ».



D'après le tableau (I.2) et la figure (I.7), la rupture se produit sur un plan avec un pendage de 42° au sud, mais elle n'atteint pas la surface (au moins dans sa partie occidentale). Les données GPS indiquent une extrémité occidentale de la rupture autour de 3.4°E .

Ces résultats sont cohérents avec le modèle structural de [Déverchère et al., 2003], (une série des failles inverse actifs, pendage-sud) la marge Algérienne. Le séisme de Boumerdes indique que les failles marines absorbent une partie du mouvement entre les deux plaques Afrique-Eurasie dans le Méditerranée occidental et représentent ainsi une menace sismique significative pour la partie Nord de l'Algérie. Cette étude conforte les résultats précédents obtenus dans la région d'EL Asnam [Lammali et al., 1997] .

Antérieurement à ce travail Bacha et Bougrine, soutenant leur mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'Etat en Géophysique, Octobre 2003, sous la direction de M. Yelles et dont l'intitulé était « Application du GPS a la surveillance du système de failles Thénia-Zammouri », avaient travaillé dans la région de Boumerdes. Trois campagnes de mesures, 2 avant le séisme (Thénia-Juillet 2002 et Thénia-Mars 2003) et une après le séisme (Thénia-Mai 2003, juste après le séisme) furent réalisées. Les données furent traitées à l'aide du logiciel *Ashtech* slution. Ce mémoire, le premier du genre en Algérie, permis pour la première fois l'utilisation de la technologie GPS. Les résultats présentés dans ce mémoire étaient préliminaires, a cause de :

- L'utilisation des orbites radiodiffusées à contraire d'orbites précises, ce qui diminue la précision.
- Une seule station de référence régionale a été utilisée (Thénia), ce qui affecte aussi la précision, contrairement aux réseaux qui sont rattachés à plusieurs stations mondiales répertoriées dans un système de référence précis dans ITRF ;
- Le logiciel utilisé ne permettait pas de corriger les erreurs de propagation du signal, ce qui peut contribuer aux erreurs pour les plus longues lignes de bases. Par contre l'utilisation d'un logiciel scientifique comme GAMIT, permet d'éliminer ces erreurs ;
- La précision des résultats étaient limitée aussi par la courte durée des sessions de mesure.

Mais il est important de souligner que si avant le séisme, aucun mouvement significatif n'a été détecté, des mouvements significatifs des terrains se sont produits après le séisme. Ainsi les résultats obtenus lors des trois campagnes étaient importants car réalisés lors des phases présismique et cosismique de l'événement du 21 Mai 2003.

I.4.3. Les projets géodésiques (GPS) en cours en Algérie.

Parmi les actions en cours, une coopération Algero Française s'est mis en place depuis 2003 afin d'améliorer l'évaluation du risque sismique et gravitaire en Algérie du Nord. Parmi les objectifs recherches, l'installation des réseaux GPS temporaires et permanente en Algérie pour :

- La contribution à une meilleure compréhension de la cinématique de la plaque Afrique ;
- A une meilleure connaissance de la cinématique des déformations actives dans le domaine méditerranéen, (établir la part de la convergence Afrique-Europe pris en compte par la déformation active et potentiellement sismogène en Afrique du Nord, en particulier les structure actives (Tell, Hauts plateaux, Atlas et flexure sud-atlasique) du l'Algérie).
- A une meilleure connaissance de la distribution spatiale de la déformation actuelle au travers des structures actives en Algérie (terre et mer). (de plus, de l'établissement de la quantité de déformation prise en compte par chacune des ces structures actives. Il est important d'établir la déformation active en mer, et identifier des zones déformées sous-marins le long de la marge).

Le risque associé aux grandes failles actives en Algérie est particulièrement aigu dans les régions d'Oran, Alger et Constantine, où des failles actives et des séismes historiques destructeurs sont connus. Il faut donc concentrer les études sur ces 3 zones clés afin d'y mesurer directement l'accumulation de déformation sur les principales failles actives, accumulation d'énergie susceptible d'être libérée lors de séismes importants (Appel d'offres 2003 CMEP).

Les projets en cours sont :

Réseau Permanent (Projet REGAT)

Mesures GPS continues sur sites permanents : Cinq sites ont été instrumentés par le CRAAG : Tamanrasset, Alger (enceinte du CRAAG), Oran, Chlef et Constantine (antenne du CRAAG). Ce réseau initial de 5 stations sera augmenté progressivement les années suivantes.

Réseau semi-permanents (Campagnes temporaires)

Le CRAAG a débuté les reconnaissances pour l'installation de sites dans ces régions. Certains sites de triangulation anciens de l'IGN français ou de l'INC algérien seront utilisés pour les mesures GPS. Chaque réseau sera constitué de 20 à 30 points GPS. Ces réseaux seront mesurés une première fois en 2004, puis périodiquement remesurés au cours des années suivantes.

Quatre cibles ont été identifiées par le CRAAG, sur lesquelles des failles actives capables de générer des séismes importants sont connues, dans des régions à forte vulnérabilité sismique et où l'accessibilité des sites rend les mesures géodésiques possibles: Alger (anticlinal du Sahel, faille de Thenia, comme on a vu précédemment); Oran (anticlinal de Murdjajo et faille de Kristel); Mitidja et Constantine (faille d'Ain Smara).

CHAPITRE II : RAPPEL DE GEODESIE

II.1. Introduction

L'absence d'enseignements de Physique de Globe et de Géodésie à l'Université de Sétif et du fait de l'utilisation de cette technique dans ce mémoire nous a conduit à présenter les fondements de la géodésie sur lequel repose la technique GPS.

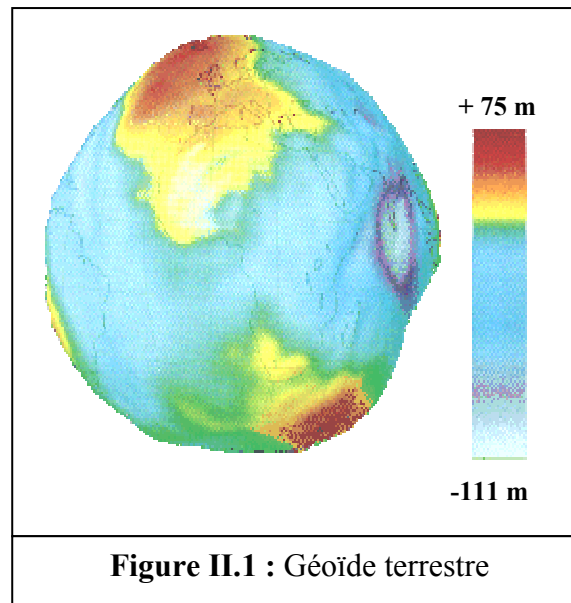
Nous présentons ainsi dans une première partie les notions fondamentales de géodésie sur lesquels contribue toute analyse des formes de la terre ou de leurs modifications.

Dans une seconde partie, nous présentons le principe de la technique GPS qui ont été utilisés dans ce mémoire.

Dans la troisième partie, nous présentons aussi les notions de déformation essentielles pour comprendre les mouvements de la croûte terrestre générés par l'activité sismique

II.2. Définition

La géodésie est l'étude mathématique de la forme et des dimensions de la Terre et l'étude de son champ de pesanteur ["La géodésie est la science de la Mesure et de la Représentation de la surface de la Terre", Helmert, 1880]. Etymologiquement, « géodésie » vient du grec « *geôdaisia* » qui signifie littéralement « diviser la Terre ». La géodésie va permettre de connaître la forme exacte de la Terre, permettant par exemple d'obtenir le « Géoïde », niveau moyen et de référence de la Terre

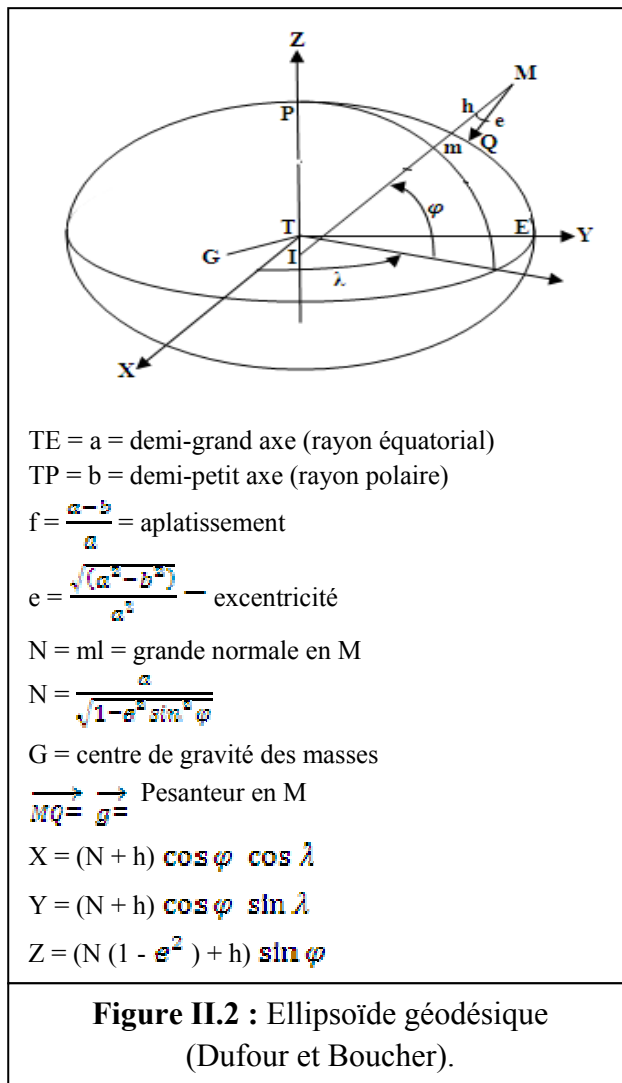


L'étude pratique de la forme et des dimensions de la Terre est réalisée par la mise en place de réseaux géodésiques. Un réseau géodésique est un ensemble de points à la surface du Globe matérialisés et munis de coordonnées, et que l'on mesure de façon répétitive pour connaître la stabilité de ces points.

II.3. Notion fondamentale

II.3.1. L'ellipsoïde géodésique

Le récepteur GPS détermine une position dans l'espace par rapport au centre de la Terre, dans un système de coordonnées à trois dimensions, appelé ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed). Pour retrouver une position sur une carte, le récepteur doit transformer cette information dans un système en longitude, latitude et altitude, appelé système géodésique. Pour définir ces lignes de longitude et de latitude, il est important d'avoir un modèle précis de la Terre. Newton et Huygens ont imposé l'ellipsoïde de révolution appelé **ellipsoïde géodésique**.



Ellipsoïde	a (m)	1/f
Ellipsoïde des poids et mesures 1799	6375739	334.29
Bessel 1841	6377397.155	299.1528128
Clarke 1866	6378206.4	294.9786982
Clarke 1880	6378249.145	293.466021
Hayford 1909 (International 1924)	6378388	297
Fischer 1968	6378150	298.3
GRS 1980	6378137	298.257222101
WGS 72	6378135	298.26
WGS 84	6378137	298.257223563

Tableaux II.1 : Ellipsoïdes géodésiques (Paul Correia, 2005).

De nombreux ellipsoïde géodésique ont été estimés et utilisés dans différent pays. Le tableau II.1 répertorie quelques-uns les plus utilisés dans les systèmes géodésiques.

Un point M à la surface de la Terre, ou proche de celle-ci, peut être repéré en toute rigueur (figure II.2) :

- Soit par ses coordonnées cartésiennes (XYZ) dans un trièdre de référence de centre T, dont les axes, TZ est parallèle à la ligne des pôles, TX est dans le méridien de Greenwich, TY complète le trièdre vers l'est ;
- Soit par ses coordonnées ellipsoïdiques (λ, φ, h), définies par rapport à la normale Mm ; λ est longitude ; φ est la latitude géodésique ; $h = Mm$ est l'altitude ellipsoïdique.

II.3.2. Modélisation de la surface terrestre (géoïde)

Un ellipsoïde représente le niveau moyen de la mer en tous les points du globe. Or les variations locales de la gravité font varier ce niveau d'un lieu à l'autre. Ces variations sont modélisées à l'aide du géoïde.

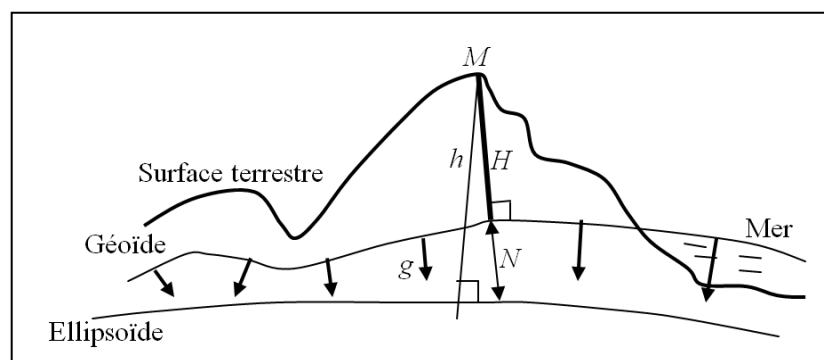


Figure II.3 : Modélisation de la surface terrestre.

H : L'altitude (l'éloignement d'un point par rapport au géoïde) ;
 h : la hauteur par rapport à l'ellipsoïde.

Le géoïde est une surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre proche du niveau moyen des mers.

II.3.3. La déviation de la verticale

On appelle déviation de la verticale l'angle θ entre n et v : $\cos \theta = n \cdot v$

Tel que : n est le normale à l'ellipsoïde

v est le vecteur unitaire défini par $v = \frac{-g}{\|g\|}$, (on appelle verticale la direction du vecteur accélération du pesanteur terrestre g . ce verticale est dirigée par v).

- Zénith : la direction définie par $+v$ et nadir est la direction opposée de $-v$.
- Numériquement, $\theta < 15''$ en France, et $\theta < 100''$ dans le monde.
- $v = \begin{pmatrix} \eta \\ \xi \\ 1 \end{pmatrix}$; η et ξ sont les composantes de la déviation de la verticale, respectivement dans les directions Est-Ouest et Nord-Sud.

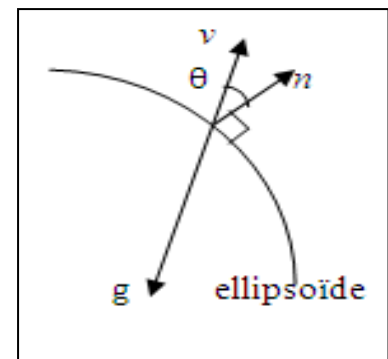


Figure II.4 : Vecteurs g et n

II.3.4. Coordonnées géographiques géodésique et astronomiques

On appelle coordonnées géographiques géodésiques les angles notés (λ_g, φ_g) décrivant l'orientation du vecteur n .

On appelle coordonnées géographiques astronomiques les angles notés (λ_a, φ_a) décrivant l'orientation du vecteur v .

La relation entre ces coordonnées et les composantes de la déviation de la verticale est donnée dans les deux relations suivantes :

$$\xi = \eta_\varphi = \varphi_a - \varphi_g \quad \text{II.1}$$

$$\eta = \eta_\lambda = \cos \varphi (\lambda_a - \lambda_g). \quad \text{II.2}$$

II.4. Méthodes (techniques) de la géodésie

II.4.1. Techniques terrestre de géodésie (techniques de géodésie classique)

La géodésie classique, est l'ensemble des techniques (nivellement, astronomie de position, ou encore la triangulation) qui se sont développées depuis quatre siècles en utilisant des mesures de surface qui aboutissaient à l'établissement de réseaux.

II.4.1.1. Etablissement des réseaux géodésiques

La surveillance géodésique des failles actives repose sur l'installation d'un réseau de repères qu'il s'agit de mesurer périodiquement. Un réseau de contrôle géodésique est un ensemble de points matérialisés par des repères au sol (piliers, bornes,...) dont les coordonnées (position et l'altitude) sont connues avec précision.

Il existe différents types de réseaux de contrôle, selon l'endroit et la raison pour laquelle ils ont été établis. Un réseau de contrôle peut avoir des coordonnées très précises, mais pas d'altitudes (contrôle horizontal) ou des altitudes très précises, mais pas de coordonnées (contrôle vertical). Certains réseaux de contrôle existent combinant les deux types que l'on vient d'énumérer, mais sont beaucoup moins utilisés. Les réseaux de contrôle verticaux seront bien sûr utilisés dans le nivellement, l'altimétrie et la gravimétrie. Les réseaux de contrôle horizontaux seront quand à eux utilisés dans l'étude des mouvements de la Terre (comme la tectonique des plaques par exemple).

II.4.2.2. L'astronomie de position

C'est la première des opérations au moment de l'établissement d'un réseau géodésique. Le référentiel stellaire fournit deux renseignements importants :

- La place de la verticale d'un lieu par rapport au système cartésien terrestre, par la détermination de l'heure et de la distance zénithale des étoiles au lieu considéré.
- La détermination de la direction horizontale d'une ligne matérialisée sur le terrain. Compte tenu de la relation : $(A_Z^a - A_Z^g) = (\lambda_a - \lambda_g) \sin \phi$. $\xrightarrow{\text{d'après I.2}}$ $A_Z^a = A_Z^g - \tan \varphi$ II.3

A_Z^a : Azimut astronomique; A_Z^g : Azimut géodésique; η : déviation est – ouest.

II.4.2.3. Contrôle horizontal (planimétrie)

Les mesures planimétriques consistent en des lectures de distance et d'angle entre deux points, parfois très éloignés. Les mesures d'angles s'appellent *triangulation*. Comme son nom l'indique, la triangulation opère sur un canevas géodésique fait de triangles homogènes. La mesure de distance s'appelle la *trilatération*. Elle permet d'obtenir les coordonnées d'un point dans un système de référence bien déterminé.

II.4.2.4. Contrôle vertical (altimétrie)

L'altimétrie repose entièrement sur la maîtrise de la géodésie : les mesures doivent être géoréférencées dans le système de coordonnées adapté. Il existe deux types de système de référence :

- La hauteur sur l'ellipsoïde, qui est celle mesurée par GPS ;
- L'altitude sur le géoïde (voir figure II.3).

Le nivellement est l'ensemble des opérations consistant à mesurer des différences de niveaux, pour déterminer des altitudes. On le trouve en différents techniques : le nivellement direct ou géométrique, le nivellement indirect ou trigonométrique, le nivellement hydrostatique, Le

nivellement barométrique, le nivellement par positionnement satellitaire et le nivellement photogrammétrique.

II.4.2. La géodésie spatiale

La géodésie spatiale est une branche de la géodésie géométrique. Elle s'applique à des mesures géodésiques utilisant le suivi des trajectoires de satellites, de sondes spatiales, de radiosources et d'étoiles, et à leur traitement informatique. Le principe est le calcul des orbites satellitaires permettant de localiser des points de la surface terrestre. Les principales techniques de positionnement spatial énumérées ci-dessous.

I.4.2.1. Mesures de directions

Historiquement c'est la première technique géodésique utilisant les satellites artificiels de la Terre. Un satellite émettant à intervalles réguliers des éclairs lumineux est photographié à partir de plusieurs stations terrestres. L'examen photogrammétrique des clichés permet de déterminer les coordonnées-images du satellite et les étoiles environnantes visibles. Les positions des étoiles dans le ciel étant connues, un calcul géométrique de triangulation dans l'espace permet d'estimer les coordonnées du satellite et des stations terrestres d'observation. Cette technique a cessé d'être utilisée à partir des années 1970 (Dufour Jean-Philippe, 2001).

I.4.2.2. Mesures de distances

a. VLBI - Very Long Baseline Interferometry

L'interférométrie à très longue base (VLBI) (méthode astronomique) permet d'observer des radiosources extragalactiques telles que quasars ou noyaux actifs de galaxie, par observation d'ondes radio dans le domaine radioélectrique.

Son principe est le suivant : Deux antennes de radiotélescopes R_1 et R_2 , distants de quelques milliers de kilomètre à la surface de la Terre, reçoivent une onde radio émise par une radiosource E . L'onde d'une source atteint R_1 à l'instant t_1 , et R_2 à l'instant t_2 . La mesure de décalage (retard) $\Delta t = t_2 - t_1$ est une information de type géométrique entre R_1 et R_2 . Ce retard est estimé en effectuant la corrélation entre les deux signaux enregistrés. La réalisation de sessions de 24h sur un réseau intercontinental de 4 à 8 stations permet de déterminer l'orientation de la Terre ainsi que les coordonnées des radiosources et des stations.

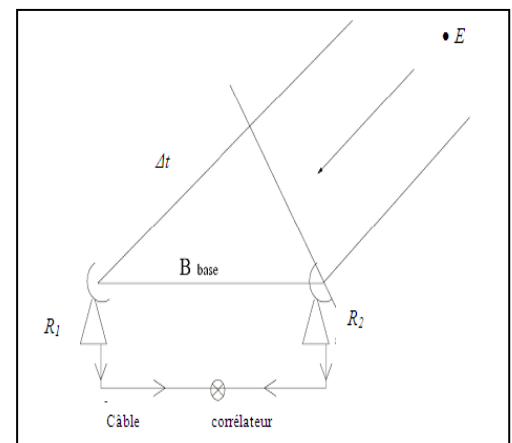


Figure II.5 : Principe de l'interférométrie à très longue base -VLBI

b. LLR/SLR - Lunar Laser Ranging/Satellite Laser Ranging

La méthode bi-directionnelle de télémétrie laser sur satellite (SLR), ou sur la Lune (LLR) consiste à mesurer le délai (temps) de propagation aller-retour Δt d'une impulsion de rayonnement laser entre une station de télémétrie au sol (émetteur E) et un satellite artificiel ou lune en vol (réflecteur R). Δt fournit ainsi la distance entre E et R .

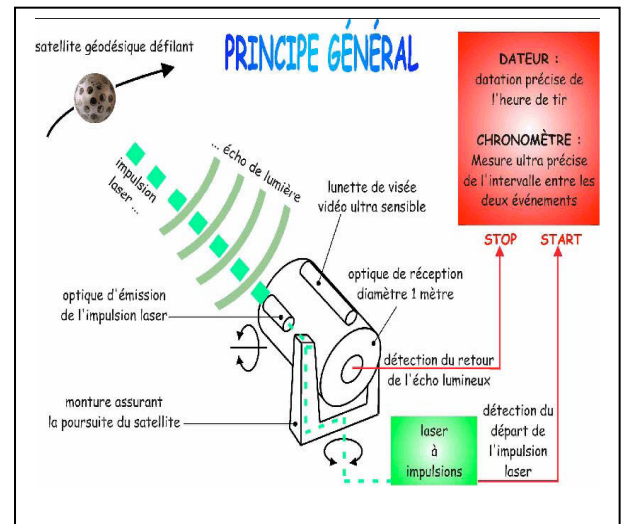


Figure II.6 : Principe général de la technique SLR

II.4.2.3. Systèmes de navigation

Les trois systèmes suivants font partie du GNSS (Global Navigation Satellite System). Ils fonctionnent à partir de caractéristiques équivalentes : une constellation de 24 (GPS/GLONASS) à 30 satellites (GALILEO) gravitant autour de la Terre.

Le NAVSTAR/GPS américain, on le trouve en détails dans le paragraphe II.5.

II.4.2.4. Mesures de variations de distances ; effet Doppler ; système DORIS

Le système DORIS (Détermination d'Orbite et Radiopositionnement Intégrés sur Satellite en français ou Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated from Satellite en anglais) parmi les méthodes unidirectionnelle de la géodésie spatiale. Est un système radioélectrique de détermination fine d'orbites et de localisation précise de stations au sol. Il a été développé par le CNES, l'IGN et GRGS dans les années 1980. Le système DORIS se compose des éléments suivants: Un réseau de stations émettrices permanentes, réparties à la surface de la Terre, des récepteurs installés à bord de plusieurs satellites, des stations dites « de localisation », de position inconnue, et un centre de réception et de traitement des données recueillies par les récepteurs embarqués.

Principe de fonctionnement : Le récepteur embarqué effectue la mesure de l'effet Doppler qui est un phénomène de décalage de fréquences. Les données recueillies sont stockées dans la mémoire de l'instrument et retransmises vers le sol à chaque passage du satellite au-dessus d'une station de réception. Après modélisation des forces agissant sur le satellite, le traitement des mesures effectuées sur le réseau permanent, appelé réseau d'orbitographie, permet une restitution précise de sa trajectoire. À partir de ces résultats et des mesures effectuées sur des balises de position inconnue, les coordonnées de ces balises peuvent être calculées.

II.5. Présentation du système GPS

II.5.1. Le système GPS

Avec le lancement du premier satellite en 1978, le département de la défense américaine a mis en place un système permettant à ses troupes de se positionner de manière précise et quasi instantanée, n'importe quand et n'importe où à la surface de la Terre : le NAVSTAR GPS (NAVigation System by Timing And Ranging – Global Positioning System), communément appelé GPS. Ce système est basé sur les temps de propagation d'un signal radioélectrique émis par chacun des satellites de la constellation GPS. Le nombre de satellites de la constellation n'a cessé de croître jusqu'en 1994.

II.5.1.1. Composition du système GPS

Le système GPS se compose de trois éléments distincts, appelés segments. Le premier segment, composé des satellites, est appelé « segment spatial ». Le deuxième segment qui comprend des stations de contrôles, s'appelle « segment de contrôle ». Le dernier correspond aux récepteurs GPS est dit « segment utilisateur ».

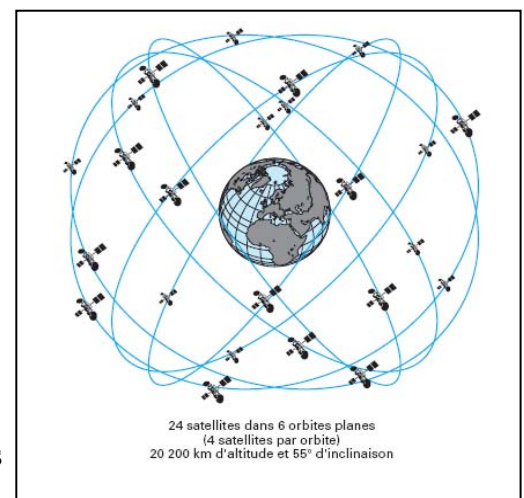
★ Segment spatial

Le segment spatial (SS, Space Segment) est constitué d'une constellation de 24 satellites GPS, appelés SV (Space Vehicle), évoluant sur une orbite quasi-circulaire à environ 20 200 kilomètres d'altitude (soit 3 fois le rayon de la terre) et se répartissent sur 6 orbites distinctes à raison de 4 satellites par orbite. La constellation permet une couverture moyenne de 4 à 8 satellites visibles simultanément au dessus de 15° d'élévation par rapport à l'horizon. Chaque orbite est inclinée de 55° par rapport à l'équateur, et formant un angle de 60° avec chacun des autres plans orbitaux. En plus de 24 satellites, d'autres satellites sont maintenus en réserve pour pallier toute défaillance (pour les cas de panne ou de remplacement de satellites non opérationnels).

La figure montre une représentation schématique de la disposition des satellites autour de la terre.

Chaque satellite effectue une évolution complète autour de la terre en 12 heures (11 heures 58 minutes) à la vitesse de 13 000 km/h, en suivant chaque jour le même chemin vu de la terre. La durée de vie d'un satellite est de 6 à 7 ans et demi. Il y a eu jusqu'à présent 3 *Blocs* de satellites :

Figure II.7 : Constellation de satellites



Bloc I : 11 satellites mis en orbite entre 1978 et 1985. Aujourd'hui, plus aucun satellite du Bloc I n'est encore en service.

Bloc II : Neuf satellites furent lancés en 1989 et 1990. Il ne reste plus aujourd'hui aucun satellite du Bloc II actif.

Bloc IIA : Lancés à partir de 1990. Actuellement 15 satellites du Bloc IIA sont actifs.

Bloc IIR : ces satellites mis en orbite à partir de 1996. Quinze satellites du Bloc IIR ont été lancés, quatorze sont actifs.

Bloc IIF : lancés dès 2007. Le programme vise à atteindre ainsi une constellation de 33 satellites.

Bloc III : Les satellites du Block III sont encore en phase de développement et ont pour but de faire perdurer le GPS jusqu'en 2030 et plus.

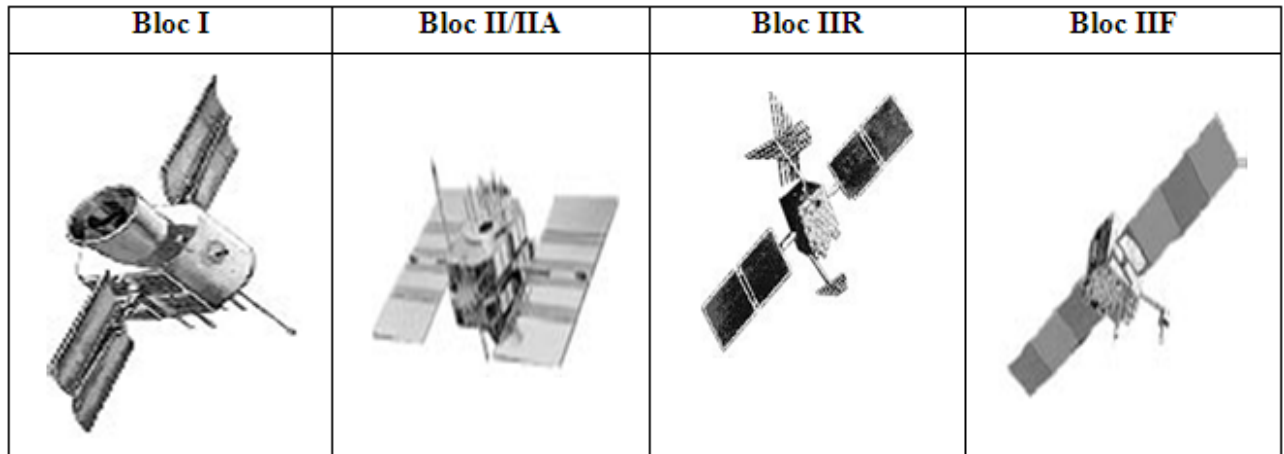


Figure II.8 : L'évolution des satellites GPS

Chaque satellite transmet en permanence un message de navigation indiquant sa position orbitale ainsi que l'heure exacte d'émission du message. Un almanach qui fournit la position et l'état de chaque satellite opérationnel est également transmis. Cet almanach permet aux récepteurs GPS de localiser tous les autres satellites à partir de la détection d'un seul satellite.

★ Segment de contrôle

Le segment de contrôle (CS, Control Segment) est constitué de :

- Cinq stations de surveillance réparties autour de la planète, situent à Hawaii, à Kwajalein dans les îles Marshall, dans l'île de l'Ascension, à Diego Garcia et à Colorado Springs. Leur rôle est de capter tous les signaux émis par les satellites, d'accumuler les messages reçus et de transmettre toutes les informations recueillies à la station maître.
- Station maître (station principale), appelée MCS (Master Control Station) et localisée à Falcon Air Force Base à Colorado Springs, aux Etats-Unis, constitue le centre de contrôle générale du système GPS. Elle reçoit les informations captées par les stations de surveillance, calcule l'orbite exacte de chaque satellite, évalue les informations nécessaires à la bonne marche du système, et envoie ensuite les corrections à apporter aux messages de navigation transmis par chaque satellite.
- Trois antennes terriennes assurent la transmission de ces corrections aux satellites.



Figure II.9 : Répartition des antennes et des stations de contrôle

★ Segment utilisateur

Comprend l'ensemble des utilisateurs civils et militaires du système GPS. Il nécessite un système de réception composé d'une antenne et d'un récepteur décodant et stockant les informations émises par le secteur spatial.



Photos II.1 : Antenne AX 1202, station permanente d'Ain Smara



Photos II.2 : Récepteur Leica GRX 1200, CRAAG

I.5.1.2. les signaux GPS

Le signal émis par le satellite peut être séparé en trois parties :

- Les ondes porteuses L1 et L2.
- Les codes C/A (Coarse Acquisition) et P (Precise).
- Les informations ou messages du satellite

Composant du signal	Fréquence [MHz]
Fréquence fondamentale	$f_0 = 10.23$
Fréquence du signal L1	$f_1 = 154 f_0 = 1575.42$ ($\lambda_1 = 19.0$ cm)
Fréquence du signal L2	$f_2 = 120 f_0 = 1227.60$ ($\lambda_2 = 24.4$ cm)
Code P $P(t)$	$f_0 = 10.23$
C/A code $C(t)$	$f_0 / 10 = 1.023$
Message de navigation $D(t)$	$f_0 / 204600 = 50.10^{-6}$

Tableau II.2 : Composants des signaux émis par le satellite.

Tous les signaux émis par les satellites sont obtenus à partir d'un signal électromagnétique de fréquence fondamentale $f_0 = 10.23$ MHz généré par les horloges atomiques. L'émetteur génère deux signaux à polarisation circulaire à droite (les ondes porteuses) dans la bande L des micro-ondes. Ces signaux est connu sous le nom de L1 et L2 de fréquence et longueur d'onde respectivement [1575.42 MHz, 19.0 cm] et [1227.60 MHz, 24.4 cm].

Les codes pseudo-aléatoires modulés sur les ondes porteuses, tel que le code C/A (coarse/acquisition ou clear/access) présente une fréquence de 1.023 MHz, appelé aussi code S qui accessible à tous les utilisateurs. Le code P (précise ou private) présente une fréquence de 10.23MHz est remplacé par le code Y de l'usage militaire. L'onde L1 est modulée par les deux codes pseudo-aléatoires pour usage civil et militaire, tandis que la deuxième est modulée que par le code à usage militaire. Les longueurs des chips pour les codes C/A et P sont respectivement 293m et 29.3m, donc P est généralement dix fois plus précis que C/A.

Chaque satellite transmet en permanence des informations permettant au récepteur de déterminer la position, l'heure et la date. Ces informations comprennent l'heure de la transmission des messages, la position et l'état de fonctionnement du satellite. Ils renseignent aussi sur les délais de propagation sur signal, sur la correction pour permettre de calculer l'heure UTC ainsi que sur l'état de la constellation. Ces informations sont transmises sous la forme de trames de 15000 bits, chaque trame se compose de sous-trames de 300 bits.

Sous-trame 1	Horloge et fonctionnement du satellite
Sous-trame 2	Ephémérides du satellite
Sous-trame 3	Ephémérides du satellite (suite)
Sous-trame 4	Almanach des satellites 25 à 32
Sous-trame 5	Almanach des satellites 1 à 24

Tableau II.3 : Données de navigation (Paul Correia, 2005).

II.5.1.3. Services fournis

Le GPS fournit deux types de positionnement, le positionnement précis (PPS) et le positionnement standard (SPS). Seul le positionnement standard est librement disponible, le PPS étant réservé à l'armée américaine.

Le PPS (Precise Positioning Service) est réservé à l'armée américaine et à certains civils ayant une autorisation spéciale. Les signaux du PPS sont transmis sur les deux fréquences de L1 et L2, et qui contiennent le code de précision ou le code P qui est généralement crypté par l'AS (Anti-Spoofing), donnant un nouveau code désigné code Y.

Le SPS (Standard Positioning Service) est la version civile du GPS. Les signaux du SPS sont transmis sur la fréquence de L1, et qui contient le code C/A.

II.5.2. Principe de fonctionnement du système GPS

Le principe du positionnement par GPS se fonde sur la mesure de la distance entre le récepteur GPS et plusieurs satellites. Cette mesure se fonde sur la propagation des ondes électromagnétique (micro-ondes) à la vitesse de la lumière, soit 300 000 km/s. La position de chaque satellite dans l'espace est connue avec une très grande précision par le récepteur. En effet, chaque satellite transmet en permanence sa position exacte par rapport à la terre et l'heure exacte de transmission du message. En calculant le temps mis par les signaux pour arriver jusqu'au récepteur,

on établit la distance du satellite. Grâce à la distance et à la position d'un satellite, il est possible de tracer un cercle imaginaire sur la surface de la terre sur lequel se trouve obligatoirement le récepteur. L'intersection de plusieurs de ces cercles permet de connaître la position exacte du récepteur. Si l'on prend trois cercles de positionnement par rapport à trois satellites, ces cercles se coupent exactement en un seul point, lorsque l'horloge du récepteur GPS est parfaitement synchronisée sur celle des satellites. Si trois satellites sont suffisants pour un positionnement en deux dimensions, il est nécessaire d'utiliser un quatrième satellite pour éliminer l'imperfection de la synchronisation des horloges du récepteur et des satellites afin de positionner en trois dimensions : Latitude, longitude, altitude.

Le temps mis par le signal pour parvenir au récepteur GPS définit une sphère, dont le centre est le satellite et qui a rayon égal à la distance récepteur-satellite. Le récepteur se trouve quelque part à la surface de cette sphère.

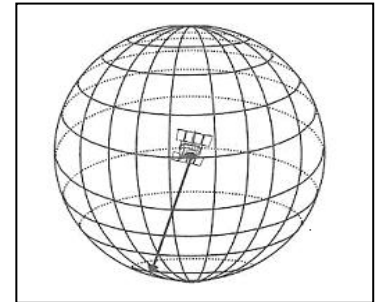


Figure II.10 : Sphère de positionnement

II.5.3. Positionnement par GPS

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.

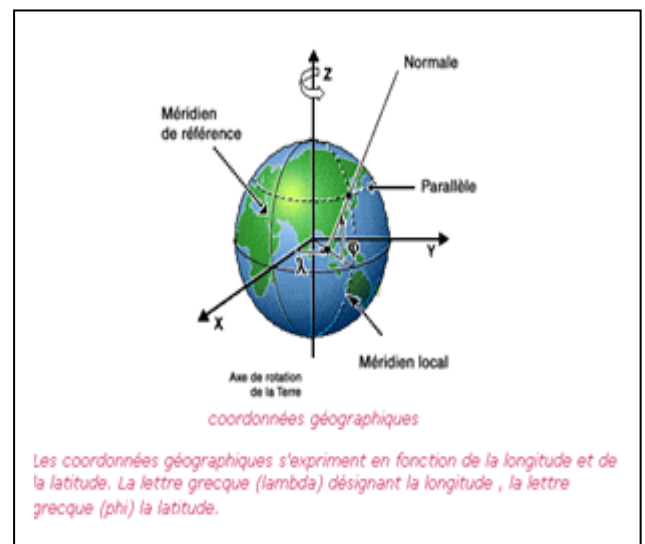
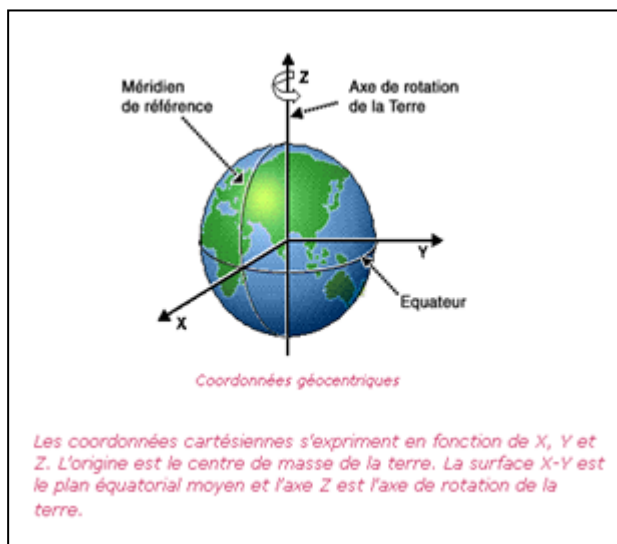


Figure II.11 : coordonnées géocentriques et géographiques

Il existe deux méthodes de positionnement :

- Positionnement absolu (autonome) : Cette méthode consiste à obtenir la position du récepteur, en absolu (un seul récepteur est nécessaire pour les mesures), par intersection des sphères d'émission de chaque satellite.

- Positionnement relatif (différentiel) : On observe les mêmes satellites en même temps sur les deux stations et le calcul se fait sur les différences des mesures. Dans ce cas, on détermine les composantes du vecteur compris entre une station connue dans le système WGS84 et une station inconnue. Il existe trois cas : la simple différence, la double différence et la triple différence (les détails dans le paragraphe II.5.3.2).

Le vecteur entre les deux points est appelé ligne de base.

Lignes de bases	Langueur		Récepteurs	Temps d'observations
très courtes	> 5 km		mono fréquence (2 ppm)	5 min pour l'initialisation et 10 min pour une détermination cm.
			bi-fréquence (1ppm)	30s pour l'initialisation et 6 min pour le calcul.
moyennes	5-20 km	5-10 km	mono fréquence	30 à 60 min
			bi-fréquence	7 à 15 min
	10-20 km	mono fréquence	1 à 2h	
		bi-fréquence	15 à 30 min	
longues	< 20 km			Les temps d'observations et les volumes de calcul deviennent dans ces cas extrêmement lourds.

Tableau II.4 : Lignes de basses

II.5.3.1. Principe de mesures GPS

Il existe principalement deux types de mesure en GPS :

Les mesures de codes (C/A et P)

Les mesures de phases (L1 et L2).

a. Les mesures de codes (pseudodistance)

Les codes émis par les satellites sont la base des mesures GPS en temps réel. Le signal GPS, y compris les codes, est créé simultanément par le satellite et le récepteur. Le décalage Δt (Figure I.12) entre le signal émis par le satellite et reçu par le récepteur, et celui généré par le récepteur correspond au temps mis par l'onde pour parcourir le trajet satellite-récepteur. En multipliant ce temps par la vitesse des ondes, identique au premier ordre à celle de la lumière, on obtient la « pseudodistance » entre le satellite et le récepteur.

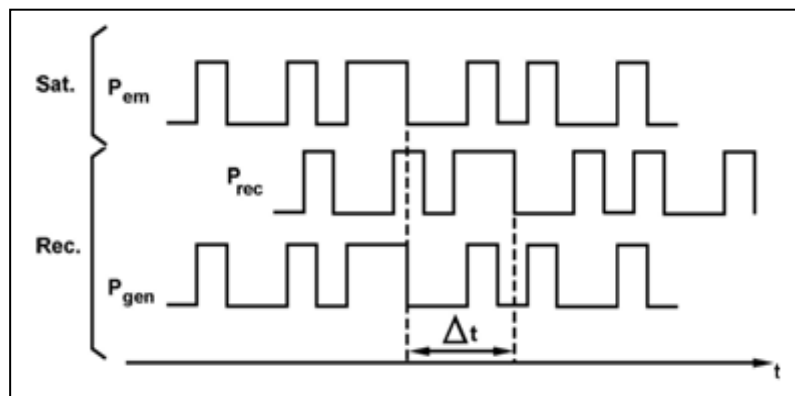


Figure II.12 : Principe de mesure GPS par code.

✓ P_{em} est le code émis par le satellite (Sat.).

✓ P_{gen} est le code généré simultanément par le récepteur.

✓ P_{rec} est le code reçu par le récepteur avec un délai Δt par rapport au code généré. Ce délai est la durée de propagation du signal entre le satellite et le récepteur, il est donc proportionnel à la distance parcourue.

On a donc pour la pseudodistance ρ :

$$\rho = c \cdot \Delta t \quad \text{II.4.}$$

avec c : la vitesse de la lumière, et

Δt : le délai de propagation de l'onde entre le satellite et le récepteur

Du fait de la non-synchronisation des horloges satellite et récepteur, Δt s'écrit :

$$\Delta t = t_r^r - t_e^s \quad \text{II.5.}$$

avec t_r^r : temps de réception dans l'échelle de temps du récepteur,

t_e^s : temps d'émission dans l'échelle de temps du satellite.

La différence entre les deux échelles de temps induit des erreurs sur Δt . Le temps d'émission et le temps de réception doivent donc être exprimés dans un référentiel unique de temps GPS :

$$t_e^{GPS} = t_e^s + dt_e \quad \text{II.6.}$$

$$t_r^{GPS} = t_r^r + dt_r$$

Le vrai délai de propagation corrigé des erreurs d'horloges est donc Δt_{vrai} :

$$\Delta t_{vrai} = t_r^{GPS} - t_e^{GPS} = t_r^r - t_e^s + dt_r + dt_e \quad \text{II.7.}$$

dt_e , le décalage entre l'horloge du satellite et le temps GPS est connu par l'intermédiaire des corrections d'horloge indiquées dans le message de navigation.

dt_r , le décalage entre l'horloge du récepteur et le temps GPS est inconnu, il est estimé lors du calcul en comparant les signaux en provenance de plusieurs satellites.

Quatre satellites différents sont donc nécessaires dans la détermination de la position d'une station par les mesures de codes, car il y a quatre inconnues (3 coordonnées et le décalage de l'horloge du récepteur).

b. Les mesures de phases

La mesure de phase se fait sur les ondes porteuses L1 et L2. Le principe de la mesure est la comparaison de la phase du signal reçu par le récepteur avec la phase du signal généré par le récepteur et qui est une réplique du signal du satellite. Le récepteur reçoit à l'instant t_R la phase du signal émis par le satellite à l'instant t_E .

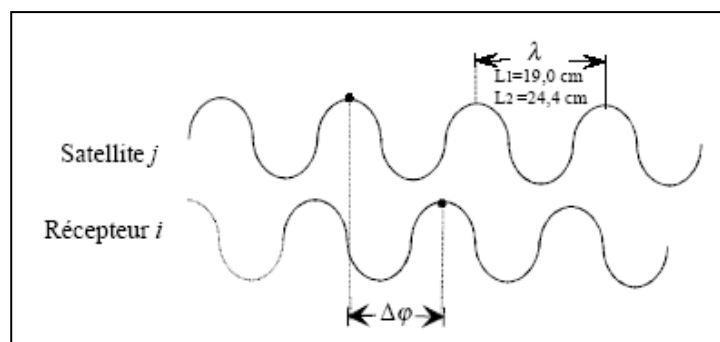


Figure II.13 : Comparaison entre signal reçu et signal du récepteur sur la porteuse

La partie réelle d'une fonction sinusoïdale peut s'écrire sous la forme :

$$X(t) = A \cdot \cos(\omega \cdot (t - t_0) + \phi_0) \quad \text{II.8.}$$

A l'instant t, la phase s'écrit :

$$\phi = \omega \times (t - t_0) + \phi_0 \quad \text{II.9.}$$

Elle peut également être exprimée en cycles :

$$\phi_{cy} = f \times (t - t_0) + \phi_{0cy} \quad \text{II.10.}$$

$$\text{: avec } \phi_{0cy} = \phi_0 / 2\pi \quad \text{II.11.}$$

Un cycle représente la phase correspondant à une période ($T=1/f$), et à une distance parcourue égale à la longueur d'onde : $\lambda=c/f$ (où c est la vitesse de propagation de l'onde). L'expression de la phase en distance est donc :

$$L = \lambda\phi \quad \text{II.12.}$$

La distance entre le récepteur et le satellite est donnée en comparant la phase du signal à l'instant de réception (t_R) à la phase à l'instant d'émission (t_E). En effet on a :

$$\phi(t_R) - \phi(t_E) = f \times (t_R - t_E) \quad \text{II.13.}$$

$$\text{et } (t_R - t_E) = \frac{\rho_i^j}{c} \quad \text{II.14.}$$

$$\phi(t_R) - \phi(t_E) = \frac{f \cdot \rho_i^j}{c} \quad \text{II.15.}$$

Lorsque le récepteur compare la phase $\Phi_i(t_R)$ de son signal à la phase $\Phi^j(t_E)$ du signal qu'il reçoit à t_R , on obtient un déphasage $\Delta\phi$. La différence de phase totale est :

$$\phi_i(t_R) - \phi^j(t_E) = \Delta\phi(t_R) + N_i^j(t_R) \quad \text{II.16.}$$

où N est un nombre entier inconnu de cycles que le récepteur ne peut pas mesurer.

En plus du déphasage, le récepteur mesure à l'aide d'un compteur le nombre entier de cycles du déphasage reçus depuis la première mesure. Ainsi si t_1 est l'instant de la première mesure, pour toutes les autres mesures on aura :

$$N_i^j(t_R) = N_i^j(t_1) + n(t_R) \quad \text{II.17.}$$

$n(t_R)$: nombre de cycles comptés par le compteur à l'instant t_R .

$$\Delta\phi(t_R) = \phi_i(t_R) - \phi^j(t_E) - (N_i^j(t_1) + n(t_R)) \quad \text{II.18.}$$

On voit donc que pour un satellite donné et un récepteur donné, la quantité inconnue $N_i^j(t_1) \equiv N_i^j$ est la même pour toutes les mesures tant qu'il n'y a pas d'interruption du signal. Cette quantité est appelée ambiguïté entière. La mesure de phase s'écrit donc

$$\Delta\phi(t_R) + n(t_R) = \phi_i(t_R) - \phi^j(t_E) - N_i^j \quad \text{II.19.}$$

On a d'après II.15 :

$$\phi^j(t_E) = \phi^j(t_R) - \frac{f \cdot \rho_i^j}{c}$$

$$\Delta\phi(t_R) + n(t_R) = \phi_i(t_R) - \phi^j(t_R) + \frac{f \cdot \rho_i^j}{c} - N_i^j \quad \text{II.20.}$$

Si les deux horloges étaient parfaitement synchronisées on aurait $\phi_i(t_R) = \phi^j(t_R)$, en réalité on a :

$$t_{Ri} = t_R - dt_i \quad \text{II.21.}$$

$$t_R^j = t_R - dt^j$$

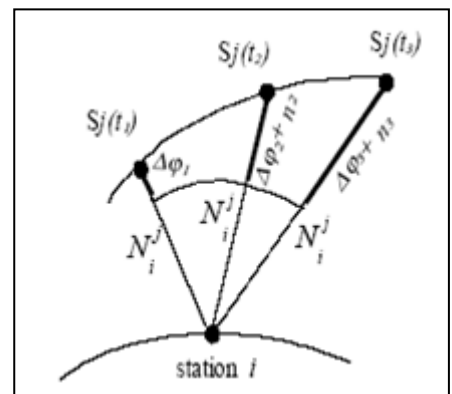


Figure II.14 : Interprétation géométrique de la mesure de phase

dt_i et dt^j sont les décalages des horloges par rapport au temps GPS(t_R)

$$\phi_i(t_{Ri}) - \phi^j(t_R^j) = f_i \times (t_R - dt_i) - f^j \times (t_R - dt^j) \quad \text{II.22.}$$

les fréquences des horloges étant très proches on peut ici faire l'approximation : $f_i \cong f^j \cong f$

$$\phi_i(t_{Ri}) - \phi^j(t_R^j) = f \times (dt^j - dt_i) \quad \text{II.23.}$$

On peut exprimer la mesure de phase en distance en multipliant par la longueur d'onde λ

$$\lambda\phi = c(dt^j - dt_i) + \rho_i^j - \lambda N_i^j \quad \text{II.24.}$$

Avec : $\phi = (\Delta\phi(t_R) + n(t_R))$

et d'après II.12. On trouve

$$L = c(dt^j - dt_i) + \rho_i^j - \lambda N_i^j \quad \text{II.25.}$$

c. Type de positionnement

Type de positionnement			Observation	Précision	
Basé sur les pseudo-distance	autonome		première position en quelques dizaines de seconde puis une position par époque d'observation	5m planimétrie, 10m altimétrie	
	DGPS		Dépendante de la ligne de base	Dépendante de la ligne de base	
Basé sur la phase	Mode statique	Classique	Mono-fréquence	une heure	2mm ± 5.10 ⁻⁶ D
			bi-fréquence	quelques heures à plusieurs jours	entre 2mm±10 ⁻⁶ D et 2mm±10 ⁻⁸ D
	Rapide		très dépendante de la longueur des bases		
	Mode dynamique	Cinématique			10-6D
		Trajectographie			

Tableau II.5 : Type de positionnement

II.5.3.2. Utiliser les différences de mesures

Afin d'éliminer ou de réduire l'influence des erreurs (horloges satellite et récepteur corrections atmosphériques et orbites) les calculs ne se font pas directement sur la relation non différenciée mais sur des différences de mesures (simple - double - triple différence). Le but est de déterminer les coordonnées d'un point inconnu (k), à partir des coordonnées d'un point connu (i) et pour cela déterminer la base à partir de mesures de phases aux deux points i et k, simultanément sur les mêmes satellites.

$$\vec{B}_{i \rightarrow k} = \begin{pmatrix} X_k - X_i \\ Y_k - Y_i \\ Z_k - Z_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_{ik} \\ \Delta Y_{ik} \\ \Delta Z_{ik} \end{pmatrix} \quad \text{II.26}$$

On a vu précédemment que l'expression de la mesure de phase à la station i sur le satellite j est:

$$\phi_i^j = f(dt^j - dt_i) + \frac{f}{c} \rho_i^j - N_i^j \quad \text{II.27}$$

Cette expression n'est pas directement utilisée dans les programmes de calcul, on forme en effet les différences comme suit.

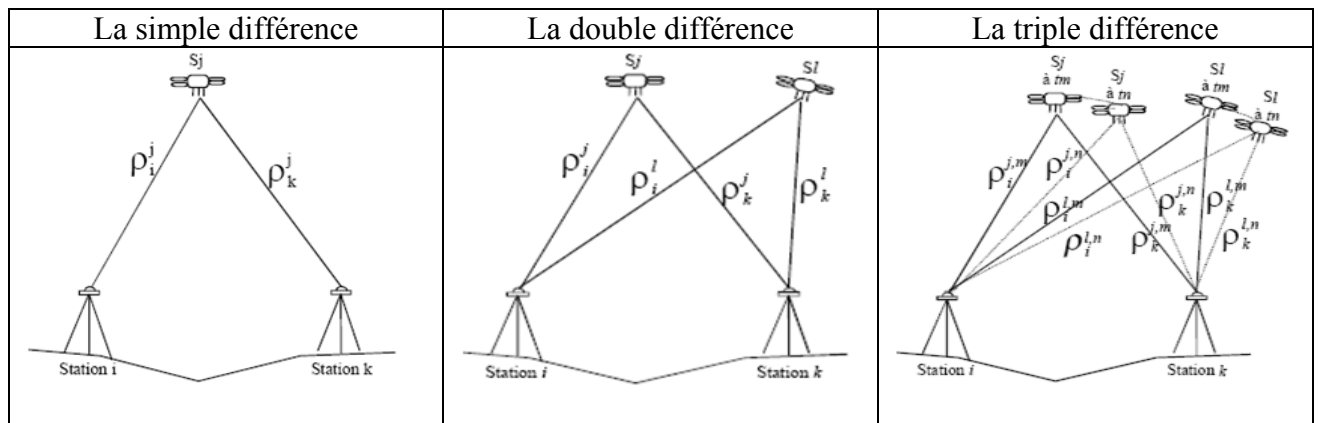


Figure II.15 : Les différences de mesures

- La simple différence : permet d'éliminer les décalages d'horloges satellites et de réduire l'influence des autres erreurs. Les stations *i* et *k* observent le même satellite *j* au même instant, et on forme la simple différence :

$$\phi_{ik}^j = \phi_k^j - \phi_i^j \tag{II.28}$$

$$\phi_{ik}^j = f(dt_i - dt_k) + \frac{f}{c}(\rho_k^i - \rho_i^i) - (N_k^i - N_i^i) \tag{II.29}$$

- La double différence : permet d'éliminer les erreurs d'horloge réceptrice, de réduire les effets des perturbations atmosphériques et des orbites. Les deux stations *i* et *k* observent les deux satellites *j* et *l* simultanément, et on forme la double différence :

$$\phi_{ik}^{jl} = \phi_{ik}^l - \phi_{ik}^j \tag{II.30}$$

$$\phi_{ik}^{jl} = \frac{f}{c}(\rho_k^l - \rho_k^j + \rho_i^j - \rho_i^l) - (N_k^l - N_k^j + N_i^j - N_i^l) \tag{II.31}$$

- La triple différence : permet élimine les ambiguïtés entières et elle est utilisée principalement pour rechercher et éliminer les sauts de cycles. Les stations *i* et *k* observent toujours simultanément les satellites *j* et *l*, et on considère ici les mesures à deux époques *tm* et *tn*. On forme la triple différence :

$$\phi_{ik}^{jl,nm} = \phi_{ik}^{l,n} - \phi_{ik}^{j,m} \tag{II.32}$$

$$= \frac{f}{c}(\rho_k^{l,n} - \rho_k^{j,n} + \rho_i^{j,n} - \rho_i^{l,n} - \rho_k^{l,m} + \rho_k^{j,m} - \rho_i^{j,m} + \rho_i^{l,m}) \tag{II.33}$$

II.5.4. Précision du système GPS

La précision du système GPS dépend de deux facteurs :

II.5.4.1. Facteurs de qualité du positionnement

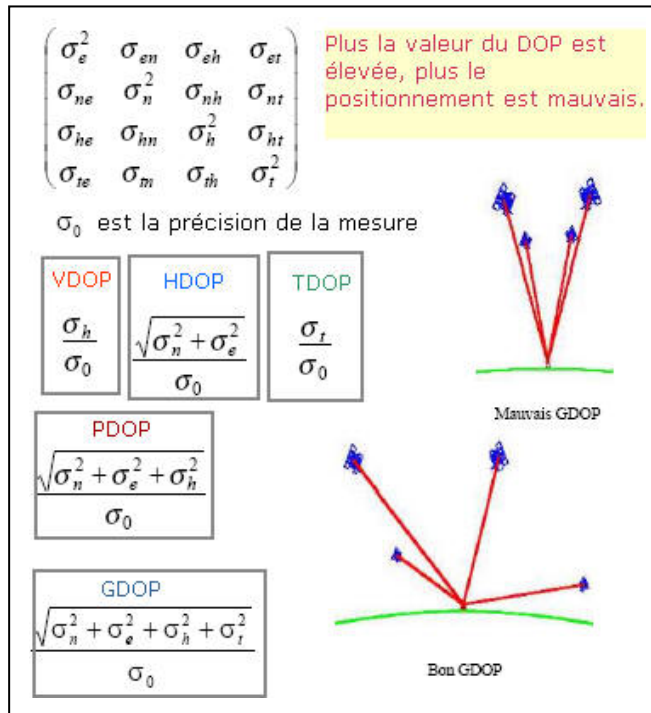
Une mauvaise répartition des satellites engendrera une faible précision de positionnement. Pour qualifier cette géométrie, on dispose généralement d'indicateurs notés DOP « Dilution Of Precision ». Le DOP à un instant donné, une appréciation de l'affaiblissement de la précision pour :

- Un positionnement planimétrique : HDOP (Horizontal DOP) ;
- Un positionnement altimétrique : VDOP (Vertical DOP) ;
- Une détermination du temps : TDOP (Time DOP) ;
- Un positionnement 3D: PDOP (Position DOP) ;
- Un positionnement 3D, TDOP+PDOP : GDOP (Geometric DOP).

Les paramètres du DOP permettent de choisir les quatre satellites les mieux placés de façon à proposer le meilleur résultat.

Le DOP se calcule à partir de la matrice de variance - covariance des coordonnées et du temps.

On exprime cette matrice dans le repère géodésique local (est, nord, hauteur, temps) et l'on obtient :



Le DOP représentant la contribution de la géométrie des satellites dans l'erreur sur la précision de la position.

$$DOP = \frac{\sigma_p}{UERE} \quad II.34$$

σ_p : erreur sur la position
 UERE (User Equivalent Range Error) : précision de mesure = σ_0 .

- PDOP ≤ 4 Configuration excellente.
- 5 ≤ PDOP ≤ 8 Configuration acceptable.
- PDOP ≥ 9 Mauvaise configuration.

Figure II.16: Représentation du DOP.

II.5.4.2. Erreurs de mesures UERE (User Equivalent Range Error)

Les erreurs sur la mesure GPS résultent d'une combinaison complexe de trois composantes :

- Les erreurs dues au récepteur :
 - L'accès sélectif « SA » ;
 - Erreur d'orbite (éphéméride) ;
 - Erreur d'horloge.
- Les erreurs dues au trajet du signal :
 - Effet ionosphérique ;
 - Effet troposphérique ;
 - Le multi-trajet.
- Les erreurs dues aux satellites.
 - Erreur d'horloge ;
 - Le centre de phase de l'antenne ;
 - Bruit du récepteur.

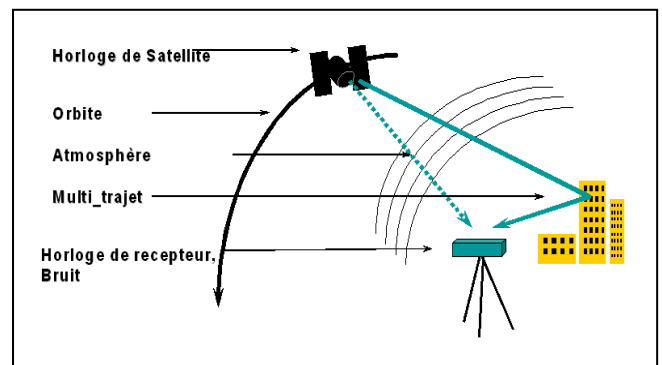


Figure II.17 : Les sources d'erreur GPS.

II.6. La déformation

Des observations, faites directement sur le terrain montrent que les roches et les couches géologiques sont souvent déformées et que la déformation se retrouve à toutes les échelles. Au cours de ces observations, nous ne voyons pas se produire la déformation, mais nous comparons l'état final à l'état initial.

II.6.1. L'aspect dynamique des déformations

Lorsqu'elle est soumise à des contraintes, la croûte terrestre se déforme. On peut définir simplement la contrainte comme étant une force appliquée à une certaine unité de volume ou de surface. Toute déformation est la conséquence de contraintes.

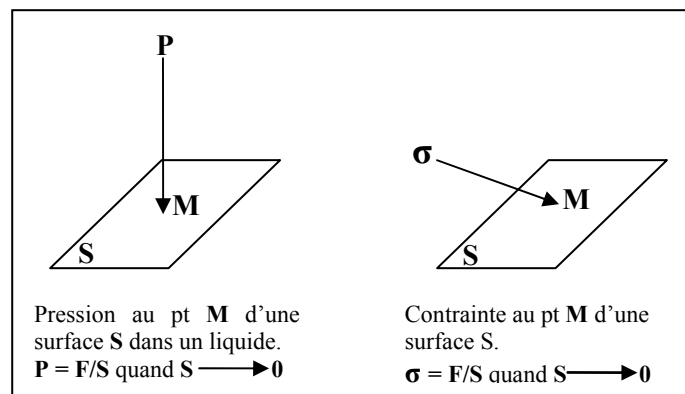


Figure II.18 : Notion de pression et de contrainte

II.6.1.1. Tenseur de contrainte

Après les calculs, on tire :

$$\begin{pmatrix} \sigma_{1v} \\ \sigma_{2v} \\ \sigma_{3v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} ; \vec{\sigma}_v = \vec{\sigma} \cdot \vec{v} ; \sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \tau_{12} & \tau_{13} \\ \tau_{21} & \sigma_{22} & \tau_{23} \\ \tau_{31} & \tau_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad \text{I.35}$$

Donc $\vec{\sigma} = \sigma_{ij}$: s'appelle tenseur des contraintes

$\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$ la symétrie du tenseur des contraintes.

σ_{ij} → i : direction d'application de la contrainte
 → j : orientation de la face, la direction de la normale

- Les composantes diagonales $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ représentent les contraintes normales : l'effet de compression ou traction
- Les composantes non diagonales $\sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{23}$ représentent les contraintes tangentiels, effet de cisaillement

X → 1 ; Y → 2 ; Z → 3

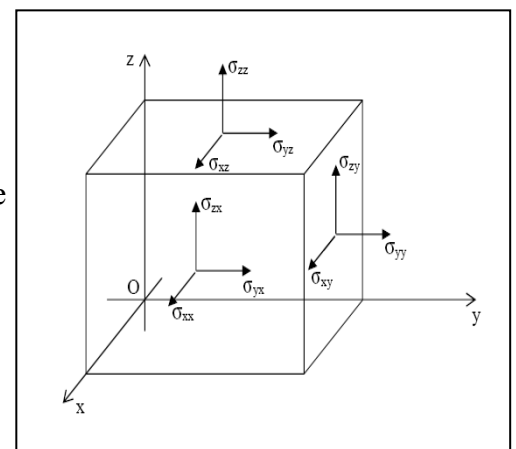


Figure II.19 : Représentation du tenseur de contrainte

II.6.1.2. Tenseur de déformation

Les moyens de représentation et les règles régissant les contraintes peuvent être transposées par analogie aux déformations. Donc sous l'application de force extérieures les particules d'un milieu modifient leurs dispositions les unes par rapport aux autres ce qui entraîne un changement de forme.

- Cas unidimensionnel.

$$PQ = dx \quad \text{II.36.a.}$$

$$P'Q' = dx'$$

$$du = dx' - dx$$

$$du = \frac{\partial u}{\partial x} dx \quad \text{II.36.b.}$$

$du = \theta dx$
 θ : déformation
 u : le vecteur de déplacement

- Cas tridimensionnel.

$$\vec{p}(\vec{r}) \longrightarrow \vec{p}'(\vec{r} + \vec{u}(\vec{r}))$$

$$\vec{q}(\vec{r}') \longrightarrow \vec{q}'(\vec{r}' + \vec{u}(\vec{r}'))$$

$$\vec{u}(\vec{r}) = \vec{u}(x_1, x_2, x_3)$$

$$\vec{u} : \text{Vecteur de déplacement}$$

$$d\vec{u} = d\vec{r}' - d\vec{r} = \vec{u}(\vec{r}') - \vec{u}(\vec{r}) \quad \text{II.37.a}$$

Pour chaque composante on a :

$$du_i = \frac{\partial u_i}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial u_i}{\partial x_2} dx_2 + \frac{\partial u_i}{\partial x_3} dx_3 \quad /i = 1,2,3 \quad \text{II.37.b}$$

$$du_i = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dx_j \quad \text{II.37.c}$$

Ce qui s'écrit $d\vec{u} = \underline{\underline{\rho}} d\vec{x}$ II.37.d

$\underline{\underline{\rho}} = \underline{\underline{\rho}}_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$: Tenseur d'ordre 2, caractérise les distorsions = déformation + rotations

On pose : $\underline{\underline{\rho}} = \underline{\underline{\varepsilon}} + \underline{\underline{A}}$ II.37.e

Avec : $A_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Rightarrow A_{ij} = -A_{ji}$: tenseur antisymétrique par rapport à i et j II.37.f

Rotation globale du milieu.

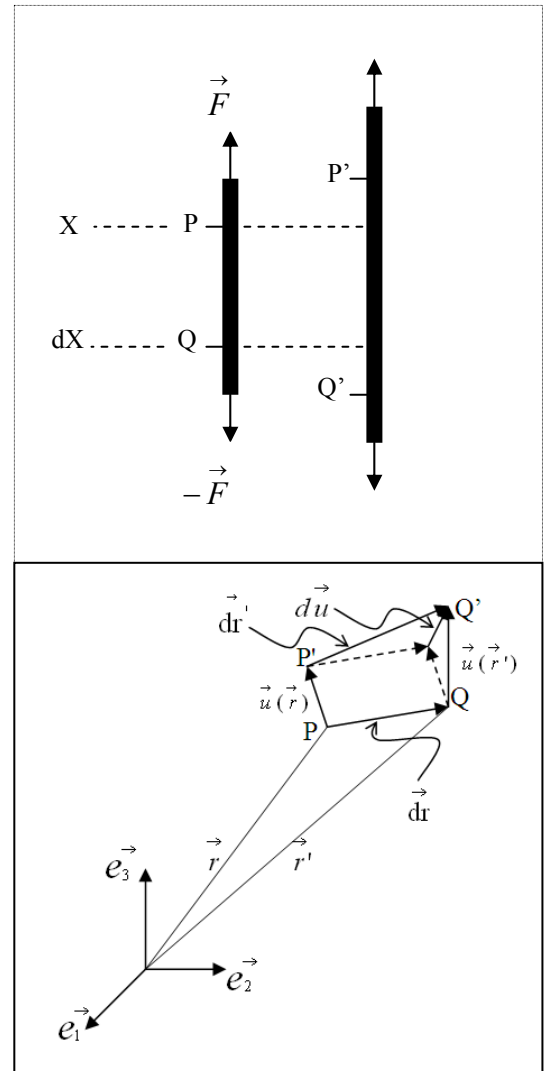


Figure II.20 : Représentation du tenseur de déformation

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \Rightarrow \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} : \text{Tenseur symétrique par rapport à } i \text{ et } j \quad \text{II.37.m}$$

Tenseur de déformation.

Le tenseur de déformation ε_{ij} dans les trois dimensions de l'espace s'écrit :

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial u_1}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_1} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_2} \right) & \frac{\partial u_2}{\partial x_2} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_3} \right) & \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \end{pmatrix} \quad \text{II.37.n}$$

Les éléments diagonaux $\frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \text{ et } \frac{\partial u_3}{\partial x_3}$ définissent les déformations *d'élongation*, la somme de ces trois éléments correspondant à la *dilatation* θ :

$$\theta = \frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \frac{dV}{V} \equiv \text{Variation relative de volume} \quad \text{II.38}$$

Les quantités $\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$ avec $i, j = 1, 2, 3$ et $i \neq j$ caractérisent les déformations qui ne sont pas dans l'axe de l'élongation : ce sont les déformations des angles droits sont modification *cisaillement*.

Le tenseur des contraintes $\overset{=}{\sigma}$ (la cause) et le tenseur des déformations $\overset{=}{\varepsilon}$ (l'effet) sont liés par le tenseur des constants élastiques $\overset{=}{c}$: $\overset{=}{\sigma} = \overset{=}{c} \overset{=}{\varepsilon}$ loi de Hooke

La notation en indice contracté permet d'écrire cette relation :

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad \text{où} \quad \begin{cases} \sigma_{ij} \text{ est élément du tenseur de rang 2 : } \overset{=}{\sigma} \\ \varepsilon_{kl} \text{ est élément du tenseur de rang 2 : } \overset{=}{\varepsilon} \\ c_{ijkl} \text{ est élément du tenseur de rang 4 : } \overset{=}{c} \end{cases}$$

Le rang d'un tenseur correspond au nombre d'indices nécessaires pour définir un de ces éléments. Ici, les tenseurs de rang 2 comptent $3^2=9$ composantes, et le tenseur de rang 4 comprend $3^4=81$ composantes. Le produit tensoriel de la loi de Hooke reste très lourd à manipuler, il faut artifice de calcul qui va permettre de simplifier les choses. A cause de la symétrie de la tenseur de contrainte et le tenseur de déformation, on peut associer à chacun de ces tenseurs un vecteur à 6 composantes, On obtient donc un vecteur, c à d un tenseur de rang 1 dont les composantes ne sont

$$\begin{aligned} \sigma_{ij} &\longrightarrow \sigma_\alpha \\ \varepsilon_{kl} &\longrightarrow \varepsilon_\beta \end{aligned} \quad \sigma_\alpha = c_{\alpha\beta} \varepsilon_\beta$$

$c_{\alpha\beta}$: étant réduit à une matrice 6x6 (tenseur de rang 2) symétrique possédant donc 21 composantes indépendantes.

II.6.2. Evaluation des déformations

Il existe deux méthodes d'évaluation des déformations d'un réseau géodésique :

La première repose sur le calcul des vecteurs déplacements qui sont déduits à partir des coordonnées compensées d'un réseau de points commun à deux époques, par rapport à des éléments géométriques considérés comme fixes (une station, ou un barycentre de plusieurs points).

La seconde est basée sur le calcul directement des tenseurs de déformations entre deux époques qui est indépendant du système de référence choisi ce qui nous permet de bien repérer et représenter les zones déformées.

II.6.2.1. Calcul du tenseur de déformation

Soit un réseau géodésique composé de n points, observés à deux époques t_1 et t_2 dont on dispose de deux séries d'observations représentées respectivement par des longueurs des côtés du réseau d_k^1 et d_k^2 . Chaque côté d_k présente une variation entre les deux époques désignée par :

$$\Delta d_k = d_k^2 - d_k^1 \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad \text{II.39}$$

Le calcul des composantes du tenseur utilise les méthodes des éléments finis (Pagarete et al, 1990 ; Welsch, 1983) qui nous permet de représenter la déformation à l'intérieur de chaque figure élémentaire (triangle ou polygone construit par les côtés observés).

- Soit deux points $P = (x_i)$ et $Q = (x_i + \delta x_i)$, le déplacement de Q par rapport au P est :

$$\delta u_i = \sum_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta x_j \text{ en deux dimension (i,j=1,2), (voir la relation II.37.c)}$$

$$\delta u_i = \sum_j \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right\} \delta x_j = \sum_j (\varepsilon_{ij} + \xi_{ij}) \delta x_j$$

Comme on a vu dans la relation (II.37.e) $\bar{\rho} = \bar{\varepsilon} + \bar{A} \rightarrow \rho_{ij} = \varepsilon_{ij} + \xi_{ij}$

ε_{ij} : Tenseur symétrique de déformation,

ξ_{ij} : Tenseur antisymétrique de rotation.

- La variation relative de chaque côté d_k peut s'écrire :

$$u_k = \frac{\Delta d_k}{d_k} = \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta_k + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta_k + 2\varepsilon_{xy} \sin \theta_k \cos \theta_k \quad \text{II.40}$$

θ_k et u_k : Respectivement le gisement et l'extension unitaire du côté d_k ,

ε_{xx} et ε_{yy} : Les composantes du tenseur des déformations selon les axes de coordonnées (élongation

ε_{xy} : Selon la composante de cisaillement.

- Donc l'allongement ε de l'élément PQ :

$$\varepsilon = \varepsilon_{PQ} = \frac{(P'Q' - PQ)}{PQ} = \varepsilon_{xx} \cos^2 \theta_k + \varepsilon_{yy} \sin^2 \theta_k + 2\varepsilon_{xy} \sin \theta_k \cos \theta_k$$

• La représentation de la déformation nécessite le calcul des composantes principales maximale e_1 et minimale e_2 à l'intérieur de chaque surface élémentaire (Pagarete et al., 1990) définies par :

$$e_1 = \frac{\Delta + \gamma}{2}, \quad e_2 = \frac{\Delta - \gamma}{2} \quad \text{II.41} \quad \text{Avec : } \Delta = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} \text{ et } \gamma = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2},$$

$$\gamma_1 = \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}, \quad \gamma_2 = 2\varepsilon_{xy},$$

- Le calcul du gisement des composantes e_1 et e_2 est obtenu par les relations suivantes :

$$\theta_1 = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{-\gamma_2}{\gamma_1} \right) \quad \text{II.42.a}$$

$$\theta_2 = \theta_1 + 90^\circ \quad \text{II.42.b}$$

II.6.2.2. Surveillance géodésique des failles actives :

a- Méthodes de recherche de failles

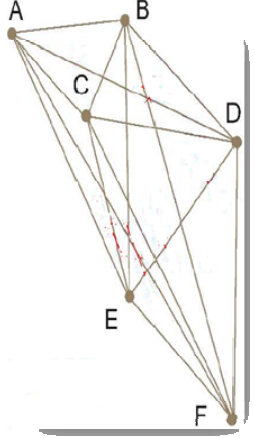
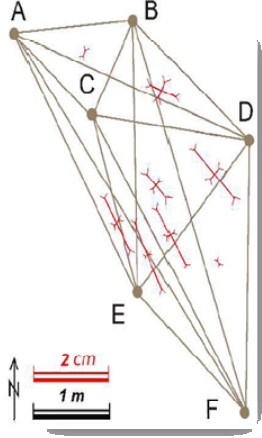
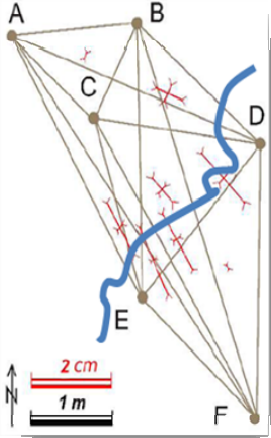
		
<p>La surveillance géodésique des failles actives repose sur l'installation d'un réseau géodésique.</p>	<p>À l'intérieur de chaque figure élémentaire (triangle ou polygone) du réseau géodésique on calcule le tenseur de déformation avec ces deux composantes principales : maximale e_1 (allongement) et minimale e_2 (raccourcissement). Ces deux composantes sont représentées graphiquement par deux barres perpendiculaires indiquant l'orientation et l'amplitude du déplacement dans le plan horizontal.</p>	<p>Pour trouver les positions des failles, il faut localiser les zones de déformations les plus importantes car c'est aux niveaux des failles que se trouvent les fronts de déformations. Ces fronts sont repérés grâce au taux élevé de raccourcissement ou d'allongement. Nous pouvons aussi trouver le type de déplacement relatif qui s'exerce sur chaque front en observant l'orientation des deux composantes (des deux taux) et l'amplitude de ces déplacements. Nous pouvons distinguer trois types simples de déplacements relatifs:</p> <ul style="list-style-type: none"> vecteurs de même direction générale à peu près perpendiculaire à la frontière: <ul style="list-style-type: none"> - sens convergent: écrasement, collision, subduction ; - sens divergent: étirement ; vecteurs de même direction générale à peu près parallèle à la frontière: <ul style="list-style-type: none"> - coulissement: décrochement.

Figure II.21 : Recherche des failles par l'installation d'un réseau géodésique

b- Evolution du cycle sismique

La surveillance géodésique des failles est une application capitale dans l'évolution du cycle sismique, c.-à-d. l'évolution du déplacement immédiatement avant, pendant et après un évènement sismique (déformations pré-sismiques, co-sismiques et post-sismiques), ainsi entre deux évènements (déformations inter-sismiques).

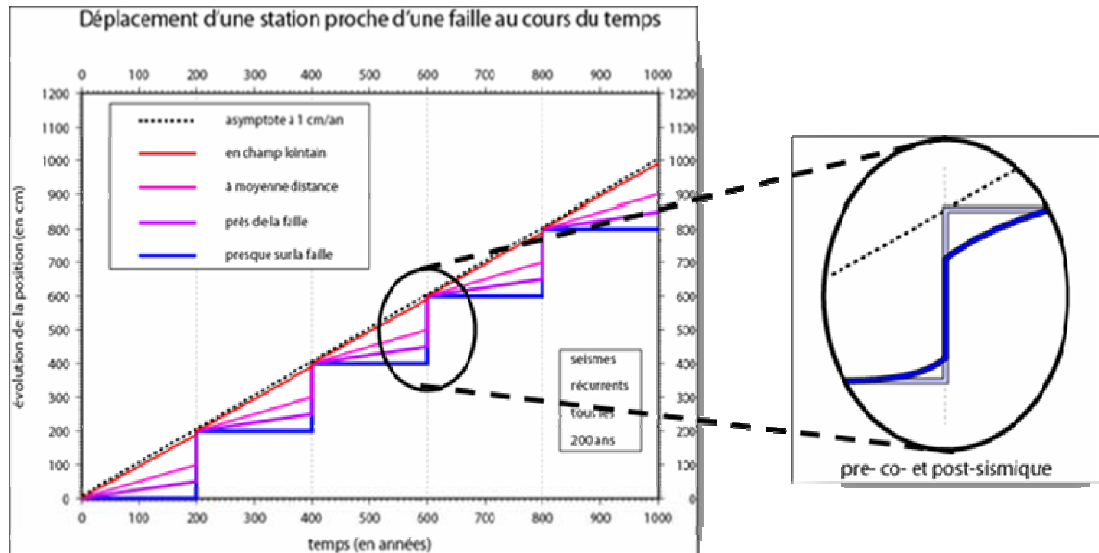


Figure II.22 : Déplacement d'une station GPS au cours du temps suivant sa proximité d'une faille décrochant (Christophe Vigny, 2006).

L'installation des réseaux GPS permanents plutôt qu'à réaliser des campagnes de mesures à intervalles réguliers, on se rend compte que le récepteur GPS devient un sismographe basse période et très large bande capable d'échantillonner la déformation depuis 10 Hz environ jusqu'à plusieurs décennies... Et c'est ainsi que l'on passe en quelques années de la tectonique à la sismologie (Christophe Vigny, 2006).

CHAPITRE III: ANALYSE DE LA FAILLE D'AIN SMARA

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte géologique de la région de cette faille à partir de la carte géologique 1/200 000 et sa notice. Ainsi, nous avons assemblé les résultats des travaux des différents auteurs sur la faille d'Ain Smara reconnue active à partir du séisme généré le 25 Octobre 1985.

III.2. Contexte géologique de la région de Constantine

III.2.1. La stratigraphie du secteur étudié (Analyse lithologique)

D'après l'analyse géologique de la région de Constantine, à partir de la feuille (1/200 000) élaborée par J.M. Villa (1977), nous constatons que les dépôts sédimentaires sont représentés par plusieurs étages géologiques allant du Secondaire jusqu'au Quaternaire. Les plus anciens sont d'âge Triasique. La nappe néritique constantinoise est formée par les sédiments du Jurassique Supérieur à Sénonien. Pour la nappe tellienne du secteur étudié, on rencontre l'existence des trois unités (Villa, 1980): la nappe ultra-tellienne, la nappe tellienne s.s (sensu-stricto) et la nappe péni-tellienne. Elles sont formées par des dépôts du Crétacé moyen et Sénonien ainsi des formations du Tertiaire représentées par les dépôts du l'éocène et l'oligocène. La nappe du flysch numidien est d'âge oligocène.

Dans ce qui suit, nous donnons l'essentiel des formations géologiques qui apparaissent sur le terrain de la région étudiée :

▪ L'Anté-néogène

Les dépôts sédimentaires d'âge Secondaire se manifestent dans la région étudiée par le Trias, Jurassique supérieur et le Crétacé. Le Trias est représenté par d'argiles varicolores, de gypses broyés blancs, roses ou rouges à gros « glaçons » calcaire-dolomique et à « ophites ». Le Jurassique supérieur formé principalement de dolomies noires et de calcaire massifs. Le Crétacé de la nappe constantinoise est représenté par calcaires fins et des marnes rosées ou jaunâtres, calcaires massifs, à silex et micritiques noirs...

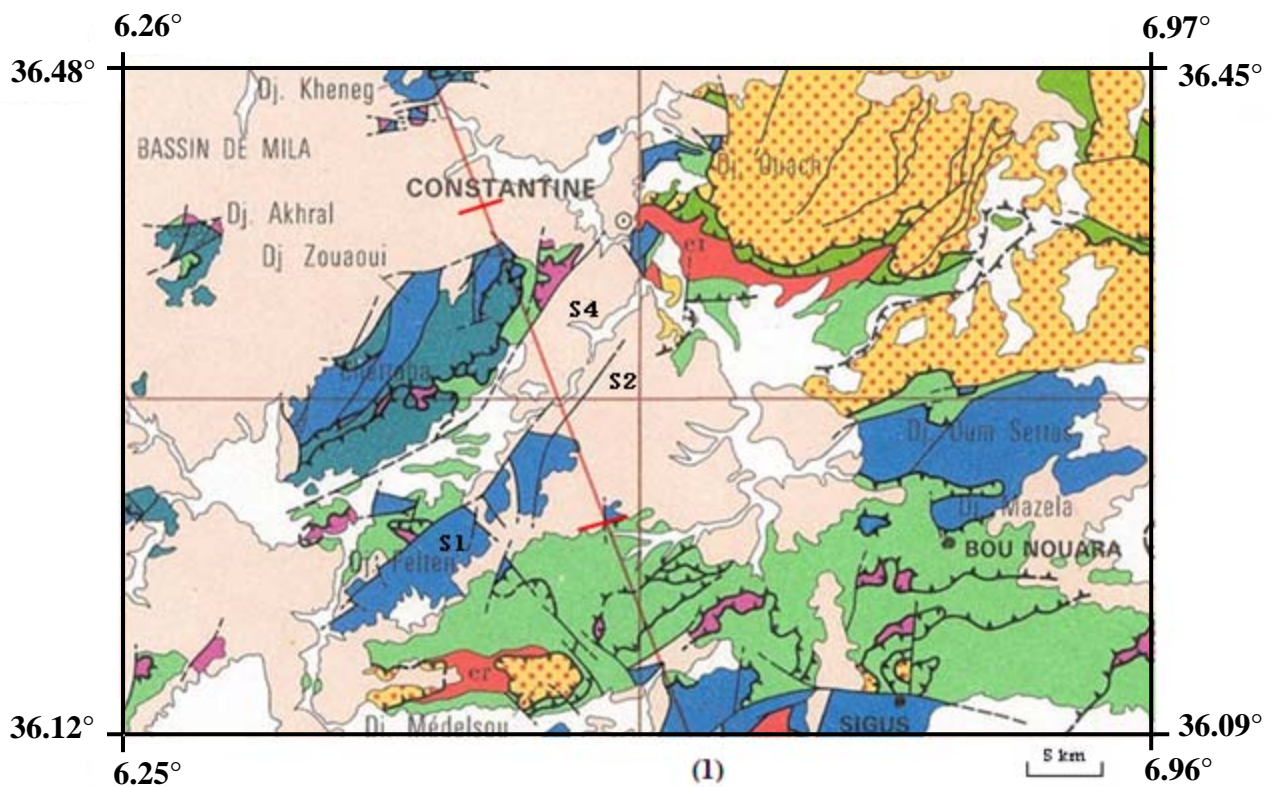
Le Tertiaire de la nappe tellienne est formé des calcaires, conglomérats, marno-calcaire, marnes grises ou noires, argiles vertes et grises. Le flysch numidien est formé par argiles brunes, vertes ou rouges.

▪ Le Néogène post-nappe

Il s'agit d'argiles, des marnes gypsifères, des calcaires lacustres, des conglomérats, des grès et de sables.

▪ Quaternaire

Les dépôts sont représentés par graviers des limons, des graviers et des galets constituant les alluvions actuelles ou récentes...



Légende de la carte

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Trias Exotique ou Extrusif - Nappe néritique constantinoise Jurassique à Sénézien - Nappe Tellienne Nappe péni-tellienne Nappe tellienne s.s Nappe ultra-tellienne er : Argiles priaboniennes à blocs g : Oligocène | <ul style="list-style-type: none"> - Nappe de flysch Nappe numidienne - Formation peu ou pas tectoniques Quaternaire Mio-pliocène continental |
|--|---|
-
- | | |
|--|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> 1- Contact stratigraphique 2- Principales failles 3- Charriages a- visibles b- cachés |
|--|--|

(1) Trace de coupe interprétative au 1/200000

Figure III.1: Schéma structural simplifié de la carte géologique de Constantine 1/200 000, (Vila, 1977)

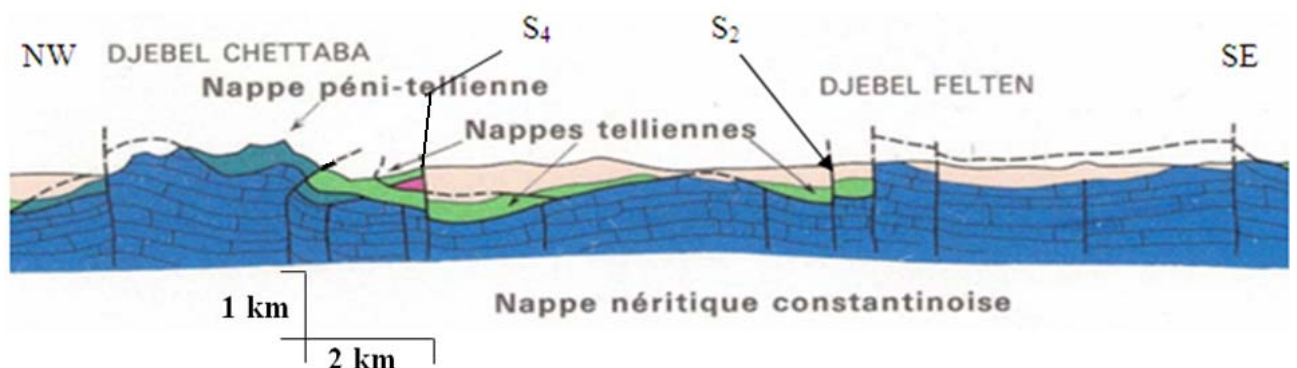


Figure III.2: Une partie située entre les deux tirets rouges perpendiculaires à la coupe (1) interprétative au 1/200 000

III.2.2. Le cadre néotectonique de la faille d'Ain Smara

Dans la région de Constantine, les remontées hydrothermales observées et l'existence de failles néotectonique, affectant les dépôts plio-quadernaires (conglomérats et calcarénites décrochant sur un substratum constitué de flysh), telles que la faille d'Ain Smara, reconnue active lors du séisme de Constantine du 27 Octobre 1985 (Bounif et al., 1987). Cette faille est composée de quatre segments. Dont les trois segments: S_1 , S_2 et S_4 sont illustrés dans la carte (III.1), avec (S_1+S_2) s'étendent sur près de 30 km. Elle est alignée suivant une direction NE-SW, avec un caractère décrochant attesté par le mécanisme focal du séisme de Constantine du 27 octobre 1985 (Bounif et al., 1987). Dans cette zone de l'Atlas, la déformation active semble régie par un mouvement transcurent dextre (Harbi, 2001).



Photos III.1 : Trace en surface pour le segment S_1 (~2 km de longueur), dans Djebel Felten



Photos III.2 : Trace en surface pour le segment S_2 (~1 km de longueur), dans Djebel Ouled Salem

Après le séisme de Constantine 1985, des ruptures de surface sont produites et observées en trois zones (figure III.3). La zone A (3.8 km) qui a un mouvement décrochant sénestre correspondant à la partie de la subsurface réelle de la faille existante d'Ain Smara (Bounif, 1990), et qui peut être considérée comme étant le segment S_4 de la faille d'Ain Smara.

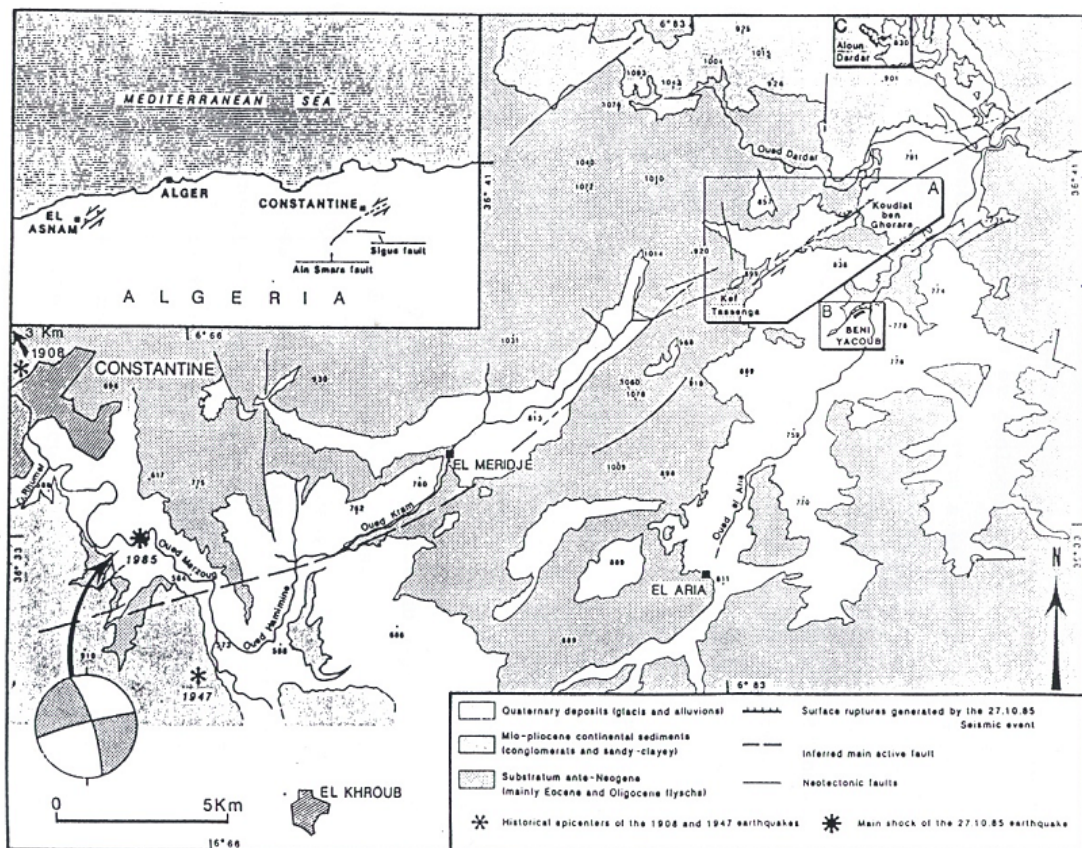


Figure III.3: Situation des ruptures de surface et la carte géologique correspondante (Bounif et al., 1987)

Les structures géologiques de la Figure III.3 montrent des dépôts quaternaires moyen et récent, composés de conglomérats (formés de quartz carbonaté) dans une matrice gréseuse friable et de terrains calcaires (plate-forme, terrasse). Ces dépôts sont continentaux et non-conformes aux flyschs substratum principalement éocène. Les flyschs du substratum sont affectés par plusieurs failles orientées NE-SW dans la même direction que les ruptures (Bounif, 1990).

La distribution spatiale des épicentres définit une surface faillée de 30 km de long et 2km de large. Celle-ci est orientée NE-SW. Les foyers sont distribués sur des plans de failles presque verticaux. La direction générale indiquée par les répliques ne coïncide pas exactement avec celle donnée par les failles néotectoniques d'Ain Smara (Bounif, 2004).

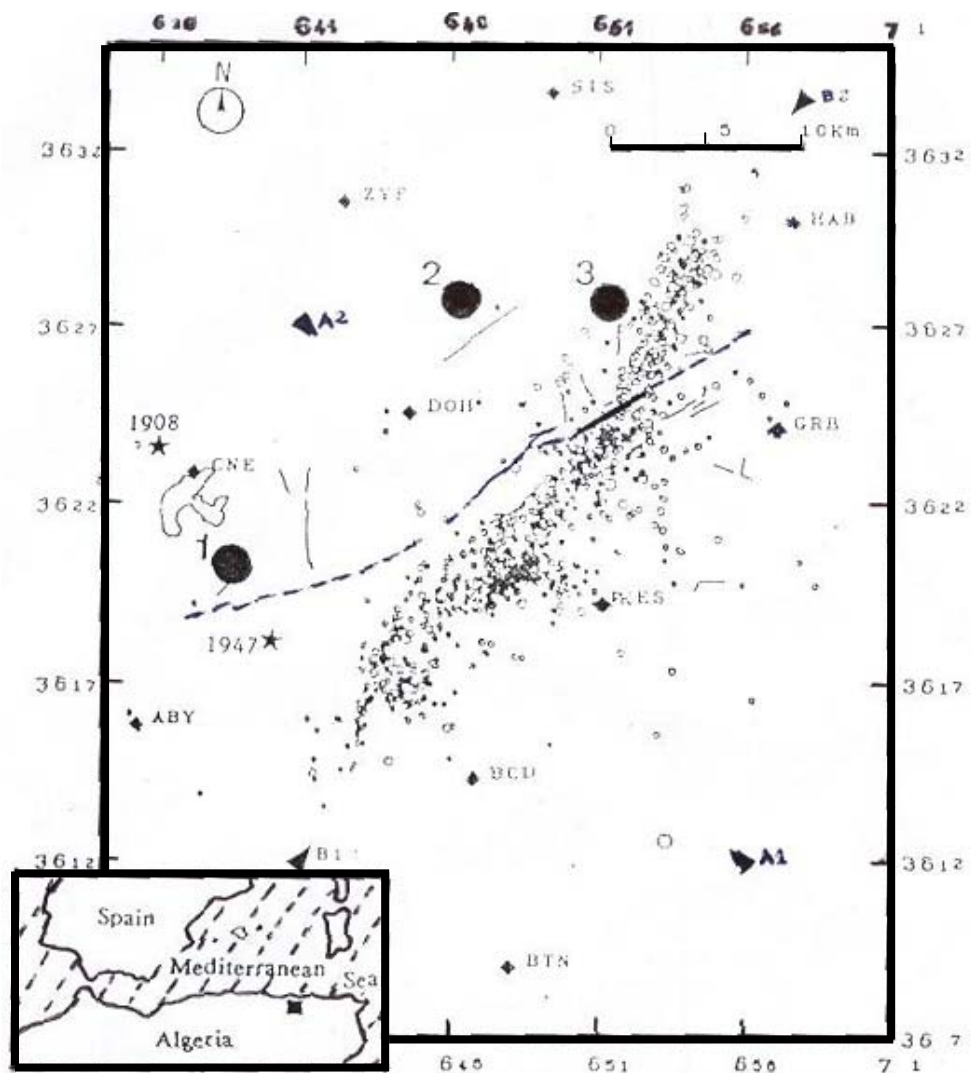


Figure III.4: La distribution des répliques de séisme de 25 Octobre 1985 (Deschamps et al, 1991).

- ★ Les épicentres des deux évènements : 1908 et 1947.
- ◆ Les stations d'enregistrement.
- Les épicentres du choc principal (séisme de 25 Octobre 1985) : 1. EMSC, 2. NEIC et 3. CMT.
- A1-A2 et B1-B2 : Les positions des coupes.

III.3. Analyse de la sismicité

La sismicité algérienne, connue dans l'Atlas Tellien, est le résultat de l'affrontement des plaques Africaine et Eurasien (voir chapitre I). Plusieurs séismes importants effectués la région de Constantine à cause de l'existence des structures géologiques accidentées en pli-failles.

III.3.1. Sismicité historique

La sismicité historique, donne une liste de séismes modérés qui ont affectés la région de Constantine depuis le début de 20^{ème} siècle (voir le tableau suivant).

Date	H: M: S	Magnitude	Location	Intensité Max. Obs. (I ₀)
04/08/1908	02:11:00	M _s =5.2	36.40°N, 6.60°E	VIII. (Nord de Constantine)
06/08/1947	09:45:38	M _s = 5.0	36.30°N, 6.67°E	VIII-IX à El Khroub. (prés de oued Hamimine).
20/12/1983	20:39:52	M _d =4.7	36.45°N, 6.60°E	V à Ibn Ziad, Hamma Bouziane, Zighout Youcef et Constantine.
27/10/1985	19:34:59	M _s =6.0	36.39°N, 6.65°E	VII-IX à El Aria.
28/03/1986	02:57:00	M _d =4.5	36.38°N, 6.80°E	V à El Aria, Ain Abid, El khroub, Ibn Ziad, Ouled Habiba et Hamma Bou...
17/10/1993	21:17:43	M _d =4.0	36.39°N, 6.49°E	IV à Ibn Ziad, III à constantine Ain Smara et Mila.
03/06/2000	13:43:22	M _d =4.1	36.56°N, 6.57°E	IV à Didouche Mourad, III à El Harrouche et Stora.
26/04/2006	08:25:52	M _d =4.2	36.35°N, 6.43°E	11km Nord Ouest Ain Smara

Tableau III.1 : Liste des séismes important (M > 4) survenus dans la région de Constantine

Magnitude de surface : $M_S = \log A(\Delta) - \log A_0(\Delta)$ (Gutenberg & Richter)

- A: amplitude maximale mesurée (onde de Rayleigh dont la période T est voisine de 20s),
- $M_S = \log (A/T) + 1.66 \log (\Delta) + 3.3$ formule dite de « Prague »,
- S'applique « bien » aux télé-séismes superficiels ($h < 80$ km, $90^\circ > \Delta > 25^\circ$).

Magnitude de durée : $M_D = a + b \times \log (t) + c \times \log (t^2) + d\Delta$

a, b, c, d : constantes de calibrations, t: durée du signal, Δ : distance du séisme.

- C'est une échelle locale qui s'applique aux petits séismes ($M < 4.5$) et $\Delta < 200$ km,
- Formule utilisée par le CRAAG : $M_d = -0.87 + 2.00 \log (d) + 0.0035\Delta$.

On ne connaît pas durant la période précédant l'année 1900, un séisme fort dans la région de Constantine. Ce qui n'est pas le cas de la période instrumentale où au moins 3 séismes d'intensité maximale VIII MSK (l'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik, est une échelle de mesure de l'intensité macrosismique, mise au point en 1964, décrit les effets d'un tremblement de terre en termes de destructions des installations humaines et en termes d'effets psychologique sur la population), ont touché la région : le premier est celui du 4 août 1908 de magnitude $M_s = 5.2$, le deuxième celui du 6 août 1947 de magnitude $M_s = 5.0$ et enfin le troisième le 27 octobre 1985 de magnitude $M_s = 6.0$. Aussi la crise sismique (33 séismes) de janvier à avril 1925 qui frappé la ville de Constantine (Harbi, 2001).

Les trois événements sismique historiques les plus signifiants qui se sont produits à Constantine en 1908, 1947 et 1985, font apparaître une période de retour (intervalle de récurrence) de séismes d'environ 39 années dans cette région (Bounif et al., 1987).

III.3.2. Cartes de sismicité

a. Générale

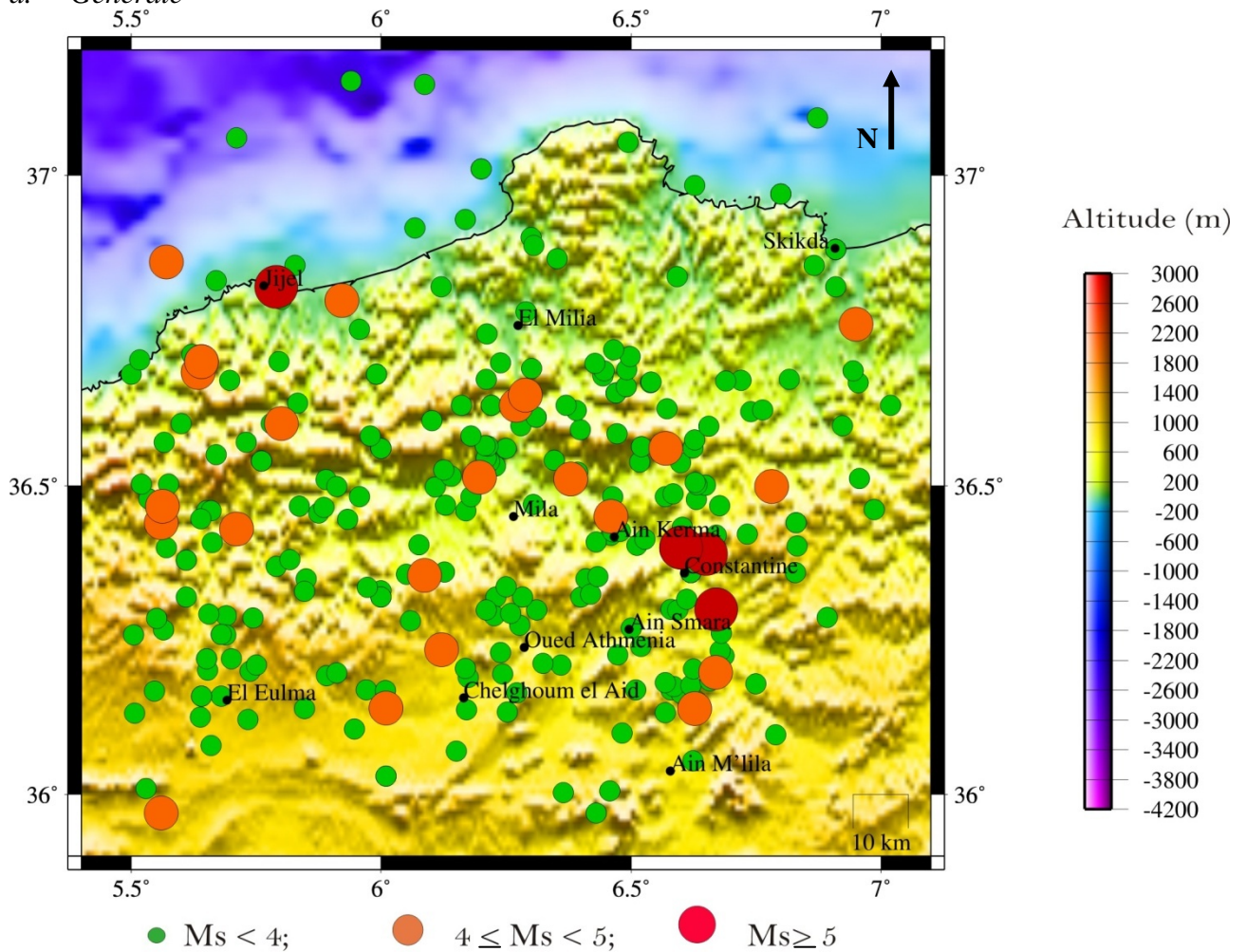


Figure III.5 : Sismicité historique 1850-2006.

Cette carte représente la distribution des séismes de la période 1850-2006. Les épicentres (macrosismiques, et instrumentaux) et les magnitudes (M_s) des séismes sont pris du catalogue de Harbi (2001) Mokrane et al (1994) et ceux de Yelles et al (2002 jusqu'à 2006).

Pour que les magnitudes soient uniformes, nous avons utilisé les relations empiriques établies par Benouar (1994), donnant M_s en fonction de m_b , M_l ou I_0 (MSK). Les formules numériques de ces relations sont :

- $M_s=f(I_0)$: $M_s = 0.47(I_0) + 1.36$;
- $M_s=f(m_b)$: $M_s= 0.47 + 0.86(m_b)$;
- $M_s=f(M_l)$: $M_s = 1.40 + 0.76(M_l)$.

Avec:

M_s : magnitude des ondes de surface,

M_l : magnitude locale,

m_b : magnitude des ondes de volumes, $m_b = \log (A/T) + Q (\Delta, h)$ (Gutenberg)

A est l'amplitude du mouvement du sol en microns observée sur la composante Z de l'onde P ($T = 1s$), T est la période de l'onde dont on mesure l'amplitude, Q est une fonction de calibration fonction de h (profondeur) et Δ (distance). S'applique à tous les séismes.

I_0 : intensité épicentrale donnée en MSK.

b. Région d'Ain Smara

Cette carte représente la sismicité historique enregistrée autour de la faille d'Ain Smara.

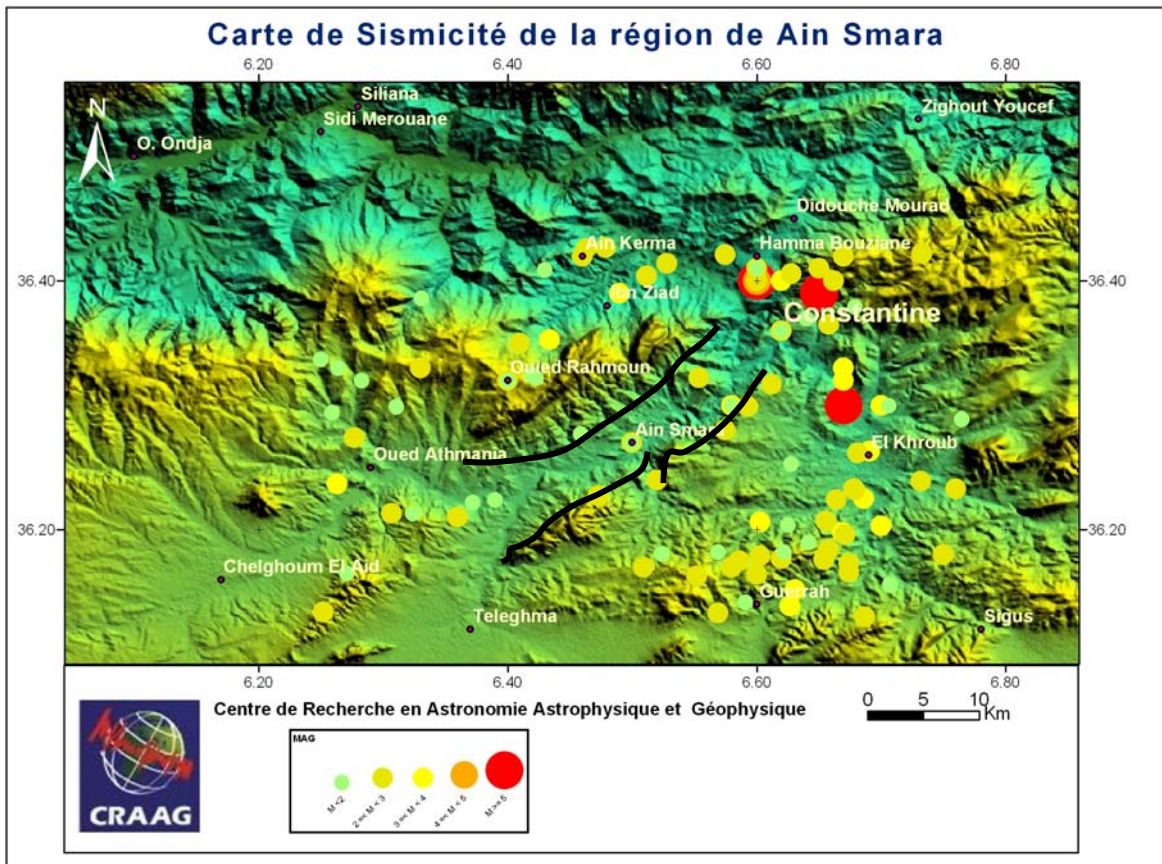
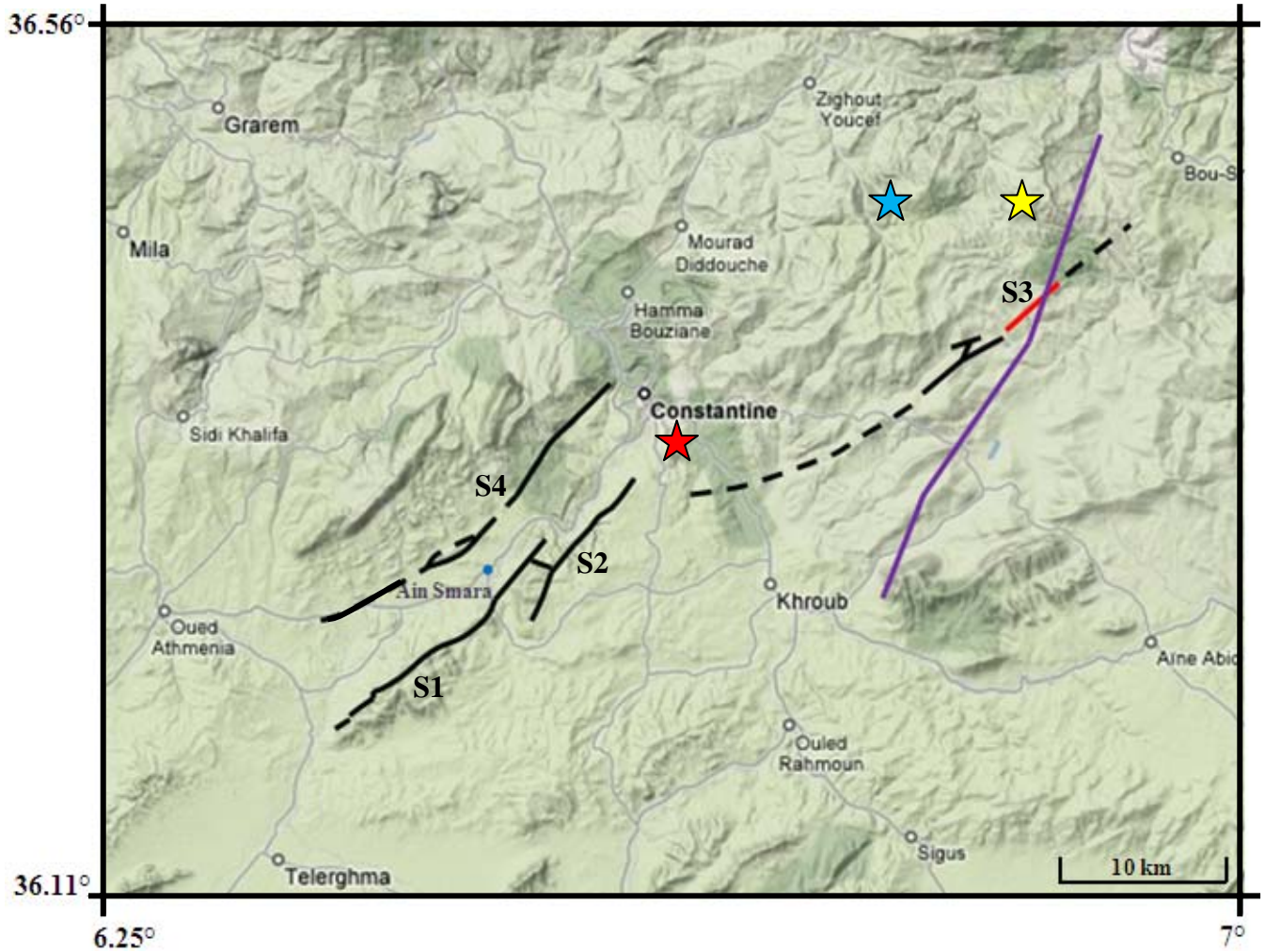


Figure III.6 : Carte de Sismicité autour de la faille d'Ain Smara 1850-2006

— Les trois segments de la faille d'Ain Smara (Villa, 1977).

Dans la carte suivante, nous présentons une synthèse des travaux précédents:



S1, S2 et S4 les trois segments de la faille d'Ain Smara (Vila, 1977) (fig .III.3).

— Rupture de surface observé après le séisme du 25/10/1980, 3.8 km (Bounif et al, 1987).

— Distribution spatiale des répliques définit une surface faillée de 30 km (Bounif, 2004).

- - - La rupture peut correspondre à la continuité nord-est de la faille d'Ain Smara (Bounif, 2004).

Choc principal : ★ EMSC ; ★ NEIC et ★ CMT (Deschamps et al, 1991).

Figure III.7 : Carte de la faille d'Ain Smara.

CHPITRE IV : INSTALLATION D'UN RESEAU GPS AUTOUR DE LA FAILLE ACTIVE D'AIN SMARA

IV.1. Introduction

Dans le cadre de la surveillance sismique de la région de Constantine et afin de comprendre les mécanismes de déformation de la structure active, il est apparu indispensable, comme cela fut le cas pour la région de Boumerdes, d'installer un réseau de surveillance autour de la faille de Ain Smara. Nous présentons dans ce chapitre, l'initiation de ce projet ainsi que les campagnes de mesure effectuée dans cette région, mesures qui nous le rappelons sont les premières du genre dans la région.

Pour ce faire, il s'agit ainsi de repérer autour de la structure active, des points géodésiques déjà existants ou bien à mettre en place.

Une fois ces points mis en place, il s'agit d'effectuer les mesures sur ces points en stationnant les capteurs GPS sur ces points.

Les mesures réalisées, il s'agit dans une troisième phase de procéder aux traitements de ces mesures.

IV.2. Acquisition des données

IV.2.1. Mission de reconnaissance du terrain : Avril 2007

Tout d'abord, nous avons cherché des points géodésiques déjà existants dans la région de Constantine. Pour cela, nous utilisons des cartes topographiques contenant des points géodésiques de la région, installés et mesurés par L'INCT. A partir de quatre cartes 1/50000 contenant la faille d'Ain Smara, dix points répartis de part et d'autre de la faille d'Ain SMARA ont été choisis :

Carte	Point	Coordonnées Géographiques		repère
96 (Ouled Athmania)	609 (Felten)	36° 12' 41.1502"	06° 27' 27.4812"	Pilier INCT (1989)
	618 (Ouled Salem)	36° 15' 42.1249 "	06° 31' 49.5097"	Pilier INCT (1989)
	896 (Bled Semar)	36° 14' 57.3376"	06° 23' 03.6829"	Pilier INCT (1989)
97 (El Khroub)	621 (Ain El Bey)	36° 15' 44.4526"	06° 36' 46.8978"	Pilier INCT (1989)
	637 (Soummaa)	36° 16' 19.8534"	06° 43' 32.9982"	Pilier INCT (1989)
	639 (Bounouara)	36° 12' 26.5407"	06° 46' 47.6341"	Pilier INCT (1986)
73 (Constantine)	620 (Ain Four)	36° 19' 06.3593"	06° 36' 45.5592"	Pilier INCT (1989)
74 (El Aria)	271 (Si Abdellah)	36° 25' 03.1469"	06° 40' 29.7603"	Boulon sur pilier (82)
	271b (Koudia El Arba)	36° 26' 01.9001"	06° 44' 56.8349"	Borne INCT (1982)
	638 (Ben Badis)	36° 19' 37.8207"	06° 47' 32.4214"	Pilier INCT (1986)

Tableau IV.1 : Points géodésiques INCT existants dans la région d'étude

Un 11^{ème} point a été choisi sur le toit du poste de garde de la station sismologique d'Ain Smara.

Une fois le choix sur carte des points réalisés, une sortie de reconnaissance sur site nous a permis de constater le bon état de certains points, la destruction d'autres points alors que d'autres étaient inaccessible.



Photos IV.1 : Site récupéré



Photos IV.2 : Point en bon état, 618 (Ouled Salem).



Photos IV.3 : L'accès du point (609) étant difficile, un autre point voisin a été choisi (support de drapeaux (609b))



Photos IV.4 : Tests pour choisir une station permanente.

Les mesures se sont déroulées pendant 04 jours (28 Avril - 01 Mai 2007). Nous avons utilisé deux récepteurs (GRX 1200 ; de N° : 462393 et 462275) et deux antennes (AX 1202) dont les numéros (N° : 05480079 et 05480014). Nous avons également utilisé aussi des trépieds, une boussole et des batteries pour l'alimentation. Tous les sites ont été observés durant une session de 10 min, sauf la station permanente de référence (positionnée sur le toit du poste de garde de la station sismologique d'Ain SMARA), cette dernière fut observée avec une session de 24 heures à une fréquence de mesure de 10 secondes. L'angle de coupure des observations est de 15°.

La figure (IV.5) représente un RX1200, qui donne lors d'observation de la station N° 620 (Ain El Bey) les informations suivantes :

- ✓ $L_1=7$: nombre de satellites émis l'onde L_1 , et observée par le récepteur. $L_2=7$: même chose ;
- ✓ Temps de l'observation de la station (point) : 00 :04 : 02 / 10 min ;
- ✓ Cycles sautées L_1/L_2 : 0/0 ;
- ✓ GDOP : 2.6 ;
- ✓ Fréquence de mesure (la cadence) : 10.0 s ;
- ✓ Observations statique : 25.



Photos IV.5 : RX1200

Dans le tableau qui suit nous présentons l'ensemble des informations sur le déroulement de la mission.

Jours	Station	Début de la session d'observation	Récepteur	Antenne	Hauteur de l'antenne	Support
28/04/07	N° 869 (Bled Semar)	17h30	N° : 462275	N° : 05480014	1,337m (V)	Trépied
28/04/07	N° 869 (Bled Semar)	15h30	N° : 462275	N° : 05480014	0,286m (O)	Trépied
29/04/07	N° 618 (OueledSalem)	17h30	N° : 462275	N° : 05480014	0,197m (V)	Embase
30/04/07	N° 621 (Ain El Bey)	09h00	N° : 462275	N° : 05480014	0,197m (V)	Embase
01/05/07	N° 620b (remplacement du point 620)	09h30	N° : 462275	N° : 05480014	1,467m (O)	Trépied
30/04/07	N° 637 (Soumaa)	14h00	N° : 462275	N° : 05480014	0,490m (V)	Embase
30/04/07	N° 639 (Bounouara)	15h40	N° : 462275	N° : 05480014	0,490m (V)	Embase
30/04/07	N° 638b (Ben Badis)	17h30	N° : 462275	N° : 05480014	1,255m (O)	Trépied
01/05/07	N° 271 (Si Abdellah)	12h15	N° : 462275	N° : 05480014	0,494m (O)	Embase
01/05/07	N° 271b (Koudiat El Arba)	15h10	N° : 462275	N° : 05480014	0,409m (O)	Embase
29/04/07	Ain Smara (toit poste de garde)	09h40	N° : 462393	N° : 05480079	1,590m (V)	Trépied

Tableau IV.2 : Mission Constantine - Avril 2007.

Les coordonnées, après 10 minutes de mesure, sont illustrées dans le tableau suivant :

Station	Latitude	Longitude	Altitude
N° 869	36° 14',965 N	06° 23',024 E	834 m
N° 609	36° 12',930 N	06° 27',109 E	870m
N° 618	36° 15',712 N	06° 31',788 E	925m
N° 621	36° 15',749 N	06° 36',745 E	734m
N° 620b	36° 19',582 N	06° 36',498 E	639m
N° 637	36° 16',341 N	06° 43',514 E	768m
N° 639	36° 12',454 N	06° 46',758 E	834m
N° 638b	36° 18',812 N	06° 49',517 E	855m
N° 271	36° 25',063 N	06° 40',459 E	1115m
N° 271b	36° 26',040 N	06° 44',910 E	1157m
Ain Smara	36° 16',278 N	06° 29',803 E	671m

Tableau IV.3 : Coordonnées des stations d'observations GPS pour la mission Avril 2007

Finalement cette mission de reconnaissance nous a permis de constater l'état des points géodésiques existants, la capacité à y effectuer des mesures ainsi que des conditions sécuritaires.

Si cette mission nous a permis de nous familiariser avec l'équipement géodésique et à connaître les principes d'acquisition des données, elle nous a montré toute la difficulté à installer un réseau en raison de plusieurs paramètres entre autres la sécurité des sites. Si cette sécurité n'est ainsi pas assurée, nous sommes ainsi dans l'obligation de repenser le réseau afin que toutes les conditions soient réunies. Ainsi une autre mission de mise en place du réseau fut décidée.

IV.2.2. Deuxième mission de reconnaissance du terrain : 24-27/12/2007

Cette mission fut dirigée par une équipe du CRAAG durant 4 jours. Pendant cette mission, 15 points GPS ont été préparés et matérialisés par une « monumentation » (Boulon implanté sur des piliers (Photos IV.7)) sur les toits des lieux bien protégés et surtout dégagés (protection civil, APC et Daïra). Une station permanente a été installée sur le toit du poste de garde de la station sismologique d'Ain Smara (Photos IV.6).



Photos IV.6 : La station permanente

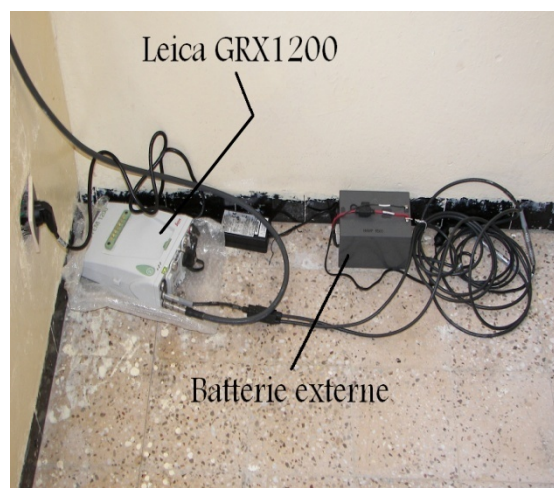


Photos IV.7 : Boulon monumenté

IV.2.3. Première campagne d'observation : Constantine 14-24/01/2008

VI.2.3.1. Déroulement de la mission

Cette campagne s'est déroulée durant 10 jours du 14 au 24/01/2008 pour l'installation d'un réseau de surveillance autour de la faille d'Ain Smara. Lors de la campagne, on était installés les 15 stations (préparés lors de la mission de reconnaissance), plus la monumentation et l'installation des 4 nouveaux points. Chaque station était composée d'un récepteur (Leica GRX 1200 pro), d'une antenne (Chockring AT 504 et MOBILE AX 1202, repose sur un TRIBACH et une EMBASES), d'une batterie permettant de faire face aux coupures d'électricité (le matériel est alimenté directement sur site). Les deux photos suivantes représentent un prototype de stations GPS installées.



Photos VI.8 : Station GPS



Photos VI.9 : Antenne LEIAT504, site OHBA.

Le déroulement de cette mission a été le suivant :

Jours	Déroulement de la mission
14/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> L'installation de trois stations : Chalhoun El Aid (CHAD); Oued El Athmania (ATHM) et Oued Seguin (OSGN).
15/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> L'installation de six stations : Ain El Bey (ANBY) ; El Khroub (KHRB) ; Ouled Rahmoune (ORHN) ; Ain Mlila (ANML) ; El Guerrah (GARH). La sixième station (Sigus), monumentée et installée.
16/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> L'installation de quatre stations : Didouche Mourad (DDCH) ; Zighot Youcef (ZIYF) ; Ibn Ziad (IBZD). La quatrième station (Mila), monumentée et installée.
17/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> L'installation de deux stations : Le site de Constantine monumenté et installé et alimenté par la batterie (interne et externe) ; Ben Badis (BNBS).
18/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> Repos.
19/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> Désinstallation de quatre stations : Oued El Athmania ; Oued Seguin ; Ain El Bey ; El Khroub. L'installation de trois stations : Ain Abid (ANBD) ; Bordj Sabaht (BSBT) ; Ouled Hebaba (OHBA).
20/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> Désinstallation de quatre stations : Ouled Rahmoune ; El Guerrah ; Ain Mlila ; Sigus. Monumentaion et installation de la station de Lambliche. Réinstallation de la station de Constantine : c'est-à-dire la station est alimentée directement sur le site (un bureau dans la direction général de la protection civile).
21/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> Désinstallation de quatre stations : Didouche Mourad ; Zighout Youcef ; Ibn Ziad ; Mila.
22/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> Repos.
23/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> Désinstallation de six stations : Constantine ; Ain Abid ; Bordj Sabaht ; Ouled Hebaba ; Ben Badis ; Lambliche.
24/01/2008	<ul style="list-style-type: none"> Désinstallation de la station du Chalhoun El Aid (elle n'a pas fonctionnée), et routeur au CRAAG.

Tableau IV.4 : Déroulement de la mission.

Dans chaque site, une fiche type de station a été établie :

Figure IV.1 : Fiche de station

Expérience				
Nom de la station :			Date :	
Code 4 lettres :			Jours de l'année :	
Lat :		Lon :	Alt :	
Repère			HD (GMT)	HF (GMT)
Permanent <input type="checkbox"/>	Semi-Perm <input type="checkbox"/>	Auxiliaire <input type="checkbox"/>		
Opérateur		Instrument		
		N° Récepteur :		N° Embase :
		N° Antenne :		N° Batterie :
Antenne				
Direction de l'antenne vers le Nord Mag <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non, Azimuth :				
Hauteur (mm) :		Schéma		
Avant :	Après :			
<input type="checkbox"/> Vertical	<input type="checkbox"/> Oblique			
Caractéristique Ethernet				
Adresse IP				
Masque				
Passerelle				

Chaque station fut observée avec une session de 24 heures à une cadence de 30 secondes, et un angle de coupure des observations de 15°.

Le tableau suivant, représente des informations sur les 19 stations.

Station	Code	Lieu	Jours	Début	Fin	Récepteur	Antenne	Type Ant	H. Ant
Ain Abid	ANBD	DAIRA	19-23/01/08	12:37:30	07:37:00	462398	LEIAT504	CHOCKRING	0,193
Ain El Bey	ANBY	PC	15-19/01/08	08:33:30	09:34:30	462405	LEIAT504	CHOCKRING	0,212
Ain Mlila	ANML	APC	15-20/01/08	12:50:00	09:09:00	462406	LEIAX1202	MOBILE	0,210
Ain Smara	SMRA	PG	14-23/01/08	00:00:00	13:08:30	462412	LEIAT504	CHOCKRING	0,048
Ben Badis	BNBS	APC	17-23/01/08	12 :00 :00	10 :30 :00	462408	ASHTECH	701008-01A	0.234
Bordj Sabath	BSBT	APC	19-23/01/08	13:55:30	08:46:00	462405	LEIAT504	CHOCKRING	0,192
Constantine	CSTN	PC	17-23/01/08	09:14:30	12:14:00	462407	LEIAX1202	MOBILE	0,198
Didouche M	DDCH	PC	16-21/01/08	09:02:00	07:43:00	462287	LEIAX1202	MOBILE	0,196
El Guerrah	GARH	APC	15-19/01/08	13:45:00	23:59:30	462404	LEIAX1202	MOBILE	0,219
El Khroub	KHRB	DAIRA	15-19/01/08	09:45:00	10:18:30	462398	LEIAT504	CHOCKRING	0,204
Ibn Ziad	IBZD	APC	16-21/01/08	12:37:00	10:03:30	462240	LEIAX1202	MOBILE	0,195
Lamblèche	LBCH	APC	20-23/01/08	12:47:00	11:34:00	462397	LEIAX1202	MOBILE	0,198
Mila	MILA	APC	16-21/01/08	15:04:00	12:09:00	462275	LEIAX1202	MOBILE	0,194
Oued Athm	ATHM	APC	14-19/01/08	14:46:00	07:37:00	462411	LEIAT504	CHOCKRING	0,191
Oued Seguin	OSGN	APC	14-19/01/08	15:53:30	08:25:00	462393	LEIAT504	CHOCKRING	0,196
Ouled Hebeba	OHBA	APC	19-23/01/08	15:04:00	09:23:30	462411	LEIAT504	CHOCKRING	0,192
Ouled Rahm	ORHN	APC	15-20/01/08	11:04:30	08:04:00	462399	LEIAX1202	MOBILE	0,196
Sigus	SGUS	DAIRA	15-20/01/08	15:28:30	10:22:30	462397	LEIAX1202	MOBILE	0,201
Zigout Youcef	ZIYF	PC	16-21/01/08	10:18:00	08:54:00	462400	LEIAX1202	MOBILE	0,194

Tableau IV.5 : Caractéristiques des matériels GPS utilisés au niveau de chaque station ainsi que la chronologie des sessions y afférentes, mission Constantine-Janvier 2008.

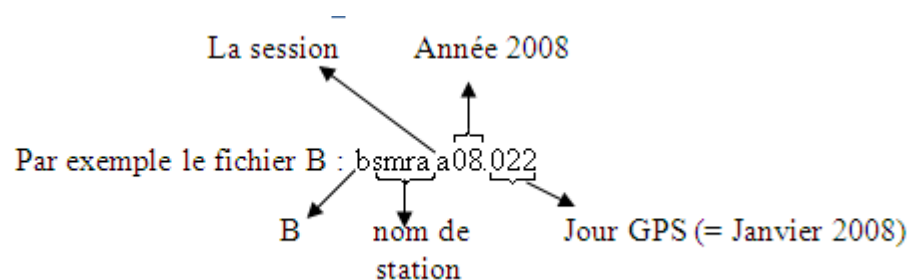
IV.3. Traitement des données

IV.3.1. Préparation des données

Les données brutes ont été téléchargées à l'aide d'un câble de connexion (RS232) entre les deux ports récepteur-ordinateur. Elles ont ensuite été archivées dans des répertoires nommés selon les jours d'observation. Chaque répertoire comprend trois fichiers pour une même station :

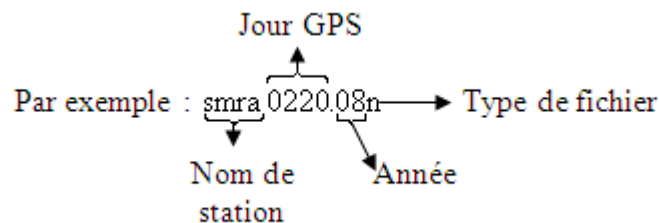
- Fichier E (éphéméride) (les observations) ;
- Fichier S (information sur la station) et ;
- Fichier B (observation en mode binaire) en plus du fichier Almanach.

On trouve les données des formats bruts soit en Leica ou en Ashtech (B, E, S). Les fichiers sont affichés sous la forme :
 Ashtech B. files (B*.*) ;
 Ashtech E. files (E*.*) ;
 Ashtech S. files (S*.*) .



Ces données ont été ensuite traitées par des logiciels tels que *Ashtech Solution*, *WinPrism*, *GAMIT*.

Pour pouvoir les traiter, les données ont été mises sous format RINEX. Ceci est possible grâce au convertisseur RINEX inclus dans *Ashtech Solution*, qui permet de passer du format Ashtech en Rinx et vice-versa. Dans ce cas les fichiers S, B, E deviendra des fichiers m, o, n.



2.11	OBSERVATION DATA				G	RINEX VERSION / TYPE	
Spider V2,3,0,2657					2008 02 09 11:22	PGM / RUN BY / DATE	
AIN MLILA					MARKER NAME		
ANML					MARKER NUMBER		
ISAAM AMAR	CRAAG				OBSERVER / AGENCY		
462406	LEICA GRX1200PRO 4.10/2.125				REC # / TYPE / VERS		
	LEIAX1202 NONE				ANT # / TYPE		
5130570.6708	590602.6793	3731640.3836			APPROX POSITION XYZ		
0.2100	0.0000	0.0000			ANTENNA: DELTA H/E/N		
1 1					WAVELENGTH FACT L1/2		
4 C1 L1 P2 L2					# / TYPES OF OBSERV		
30.000					INTERVAL		
2008 01 15 12 50	0.0000000	GPS			TIME OF FIRST OBS		
2008 01 15 23 59	30.0000000	GPS			TIME OF LAST OBS		
14					LEAP SECONDS		
22					# OF SATELLITES		

Figure IV.2 : La partie supérieur du fichier d'observation «o».

Le logiciel *Ashtech Solution* est le programme utilisé pour le traitement des données dans le cadre de ce mémoire.

IV.3.2. Ashtech Solution

Ashtech Solutions est parmi les logiciels les plus récents en matière de logiciel de post-traitement GPS automatique. D'une extrême convivialité, il simplifie de nombreuses tâches de bureau. Sur ordinateur compatible avec les systèmes d'exploitation Windows. Ce logiciel comprend des modules destinés à assister à toutes les étapes de la planification et du post-traitement d'un levé GPS (*Ashtech* Solution – Guide utilisateur –):

- Planification de mission (Mission Planning)
- Réglages du récepteur
- Transfert de données
- Calcul des vecteurs
- Ajustement de réseau
- Analyse de la qualité
- Transformation de coordonnées
- Création d'un rapport
- Export de données.

Ashtech Solutions comprend l'un des moteurs de post-traitement les plus rapides, ainsi qu'un système de détection d'aberrations très performant, afin de garantir un traitement correct dès la première utilisation.

L'affichage principal de *Ashtech* Solutions comprend trois fenêtres permettant la visualisation et l'utilisation de nos données : fenêtre Vue Observations, fenêtre Vue carte et fenêtre Vue Carnet de bord. Ainsi la barre d'outils *Ashtech* Solutions (voir Figure IV.3).

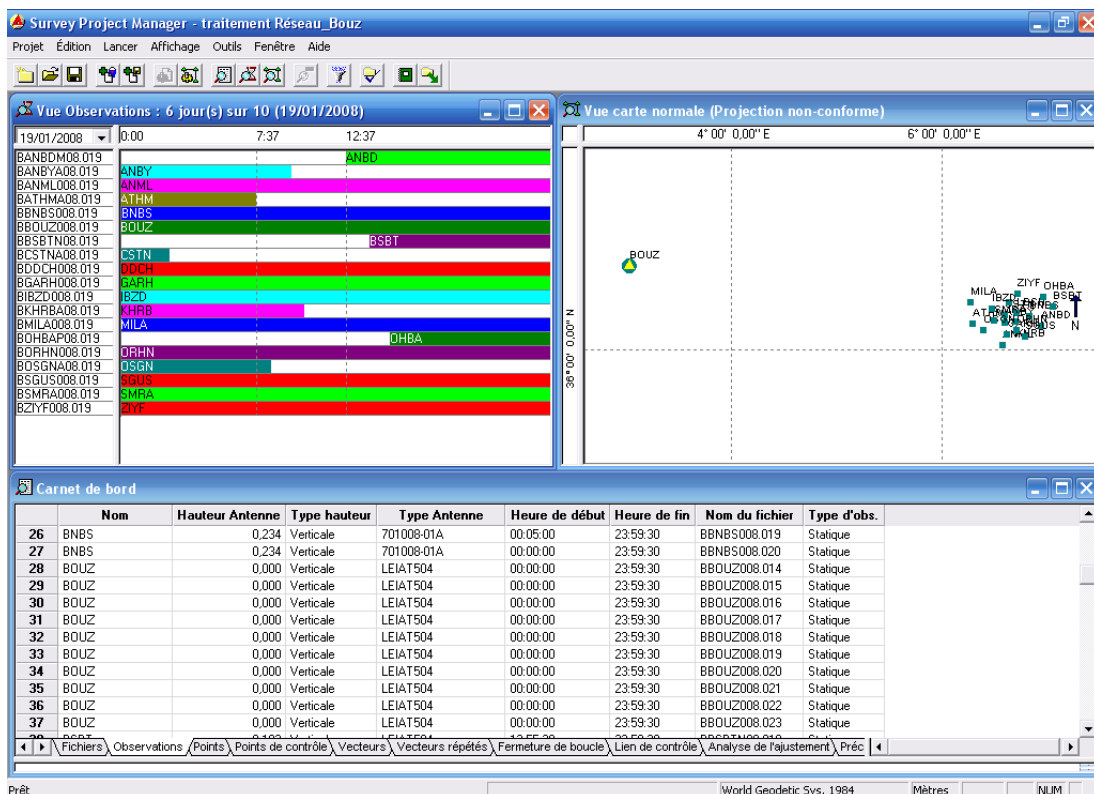


Figure IV.3 : Plateforme du logiciel Ashtech Solution

- ✓ La fenêtre Vue Observations, affiche les observations pour chaque récepteur ou fichier chargé dans le projet. Cet affichage permet de connaître rapidement l'heure d'observation de chaque point.
- ✓ La fenêtre Vue Carte, affiche les points et les vecteurs du projet et propose plusieurs modes d'affichage pour la mise en valeur des attributs importants.
- ✓ La fenêtre Carnet de bord, comporte des onglets affichant différents types d'informations, allant des coordonnées aux statistiques de précision du réseau. Plusieurs onglets contiennent des champs éditables.
- ✓ La barre d'outils *Ashtech Solutions* permet d'accéder rapidement aux commandes les plus couramment utilisées

➤ Traitement :

Les données brutes enregistrées par un récepteur doivent être traitées afin de déterminer la relation différentielle entre les points occupés pendant l'enregistrement des données. Le résultat du traitement des données brutes GPS est un vecteur qui définit cette relation. Le calcul de ces vecteurs est le rôle du module de traitement de données inclus dans *Ashtech Solutions*.

Les données GPS sont traitées en trois étapes :

- Analyse de données avant traitement : cela revient à entrer toutes les propriétés de l'observation et du point, telles que noms de point, paramètres de hauteur d'antenne et informations sur les points de contrôle.
- Traitement : Une simple pression sur un bouton invite le moteur de traitement à produire les vecteurs GPS à partir des données brutes.
- Analyse des données de post-traitement : Les vecteurs GPS traités sont analysés en utilisant les outils d'analyse fournis, afin de déterminer la qualité des données traitées.

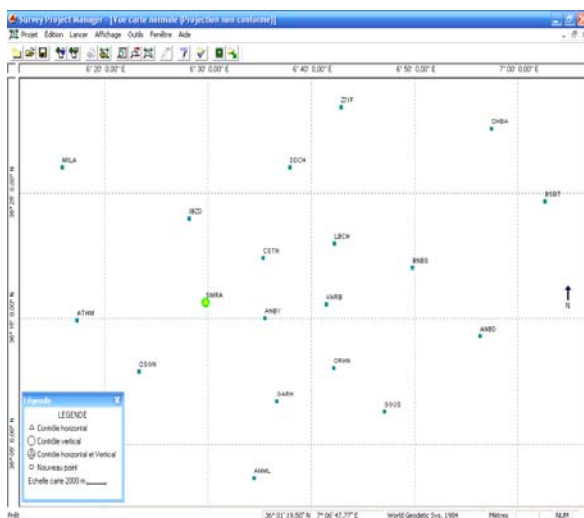


Figure IV.4 : Notre réseau avec point de Contrôle : SMRA

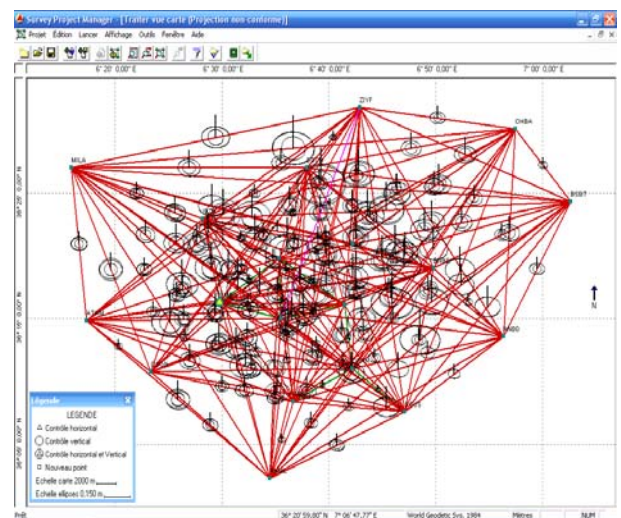


Figure IV.5 : Le réseau après le traitement

Une fois l'analyse avant traitement, le traitement et l'analyse post-traitement, sont terminés et que nous ne constatons aucune erreur observable dans les données traitées, nous pouvons passer à l'ajustement des données.

➤ Ajustement des vecteurs :

L'ajustement de nos observations constitue l'une des tâches les plus importantes permettant de garantir des résultats fiables et précis. L'ajustement du réseau est effectué dans les buts suivants : déceler les aberrations et les erreurs dans les observations et calculer les coordonnées finales des points étudiés en cohérence avec les points de contrôle existants utilisés.

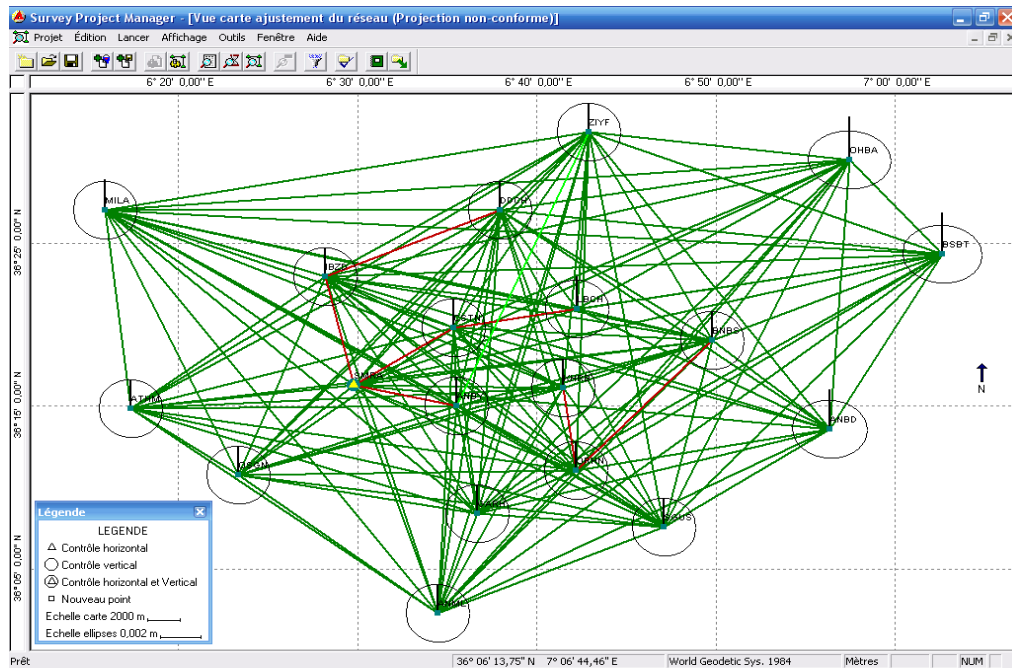


Figure IV.6 : Le réseau après ajustement

➤ Rapports

A la fin du traitement automatique, *Ashtech* Solutions transforme nos données brutes en un rapport parfaitement finalisé pouvant être établi sous divers formats en fonction des besoins du client.

IV.3.3 Traitement des données

Tout d'abord, il faut choisir un point de contrôle, et le fixé par rapport les points du réseau IGS. Pour cela, on a choisi 5 points (CAGL, EBRE, NOT1, RABT et SERF) du réseau IGS, et on a fixé le point de contrôle BOUZ de Bouzzeréah.

Les cinq points sont téléchargées par internet :

ID	Location	Pays	Agence	Coordonnées		
CAGL	Cagliari	Italie	ASI	39° 08' 09.24"N	08° 58' 22.08"E	238.4000 m
EBRE	Roquetes	Spain	TCC	00° 29' 32.64"N	40° 49' 15.24"E	107.0000 m
NOT1	Noto	Italie	ASI	36° 52' 33.96"N	14° 59' 23.28"E	126.2000 m
RABT	Rabat	Maroc	UNAUCO	33° 59' 53.16"N	06° 51' 15.48"W	090.0854 m
SERF	San Fernando	Spain	ROH	36° 27' 51.48"N	06° 12' 20.16"W	085.8000 m

Tableau IV.6 : Les points du réseau IGS

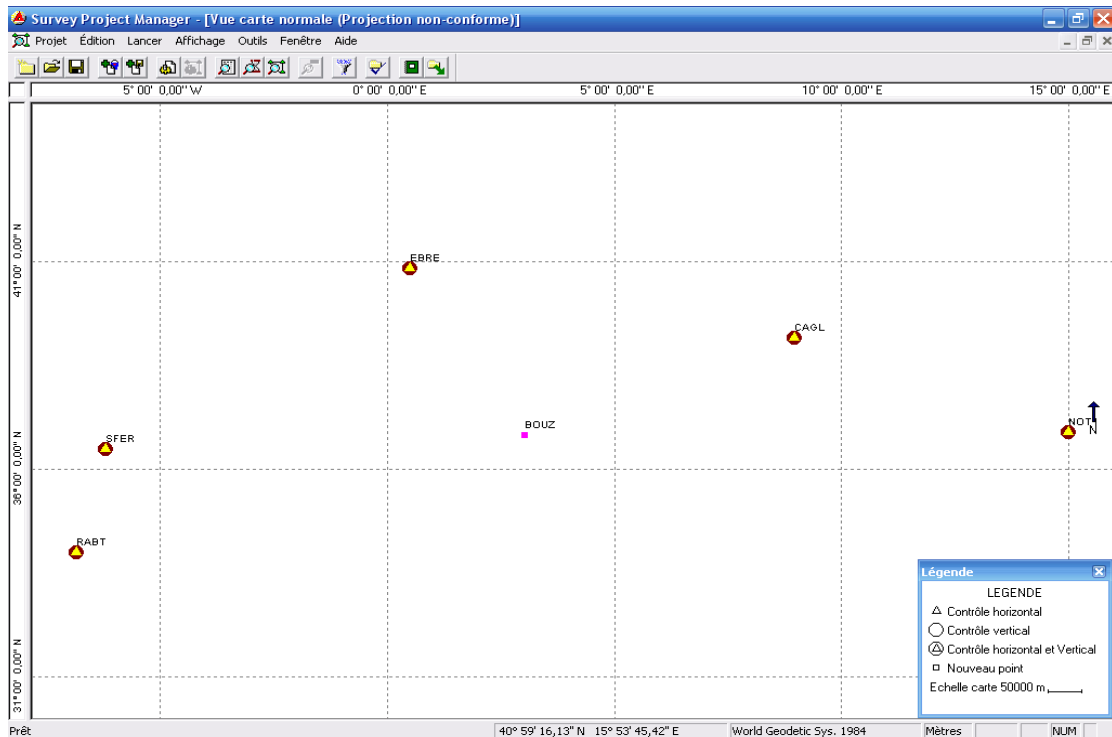


Figure IV.7 : Fixation du point de contrôle BOUZ/aux points IGS

Après traitement, on a obtenus les coordonnées fixes du point de contrôle BOUZ : (36° 47' 46.03867"N, 03° 01' 59.81061"E, 386.702 m).

Ces coordonnées ont été ensuite utilisées pour caler notre réseau. Après les étapes prévues précédemment, on obtient des rapports de traitement, parmi ces rapports on trouve un rapport sur le résumé de projet (Figure IV.8), et un autre sur les positions des points (Figure IV.9).

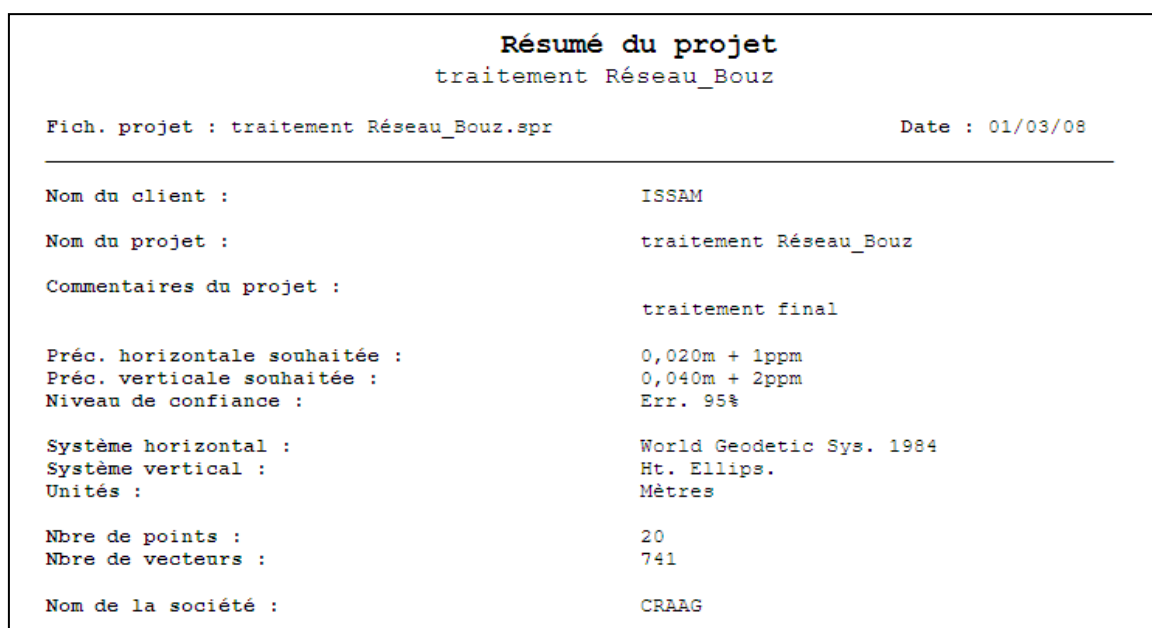


Figure IV.8 : Rapport sur le résumé du projet

Position des points						
traitement Réseau_Bouz						
Système horizontal :		World Geodetic Sys. 1984		Date :	01/03/08	
Système vertical :		Ht. Ellips.		Fich. projet :	traitement	
Réseau_Bouz.spr						
Préc. horizontale souhaitée :		0,020m + 1ppm				
Préc. verticale souhaitée :		0,040m + 2ppm				
Niveau de confiance :		Err. 95%				
Unités utilisées :		Mètres				
Point	Description	Position	95% Erreur	Etat Pt	Etat Position	
1	ZIYF	Lat. 36° 31' 51,07846" N Lon. 6° 42' 54,43183" E Elev. 582,549	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
2	ANBD	Lat. 36° 13' 35,58364" N Lon. 6° 56' 20,20467" E Elev. 906,210	0,012 0,014 0,015		Ajusté	
3	ANBY	Lat. 36° 15' 01,44848" N Lon. 6° 35' 31,47196" E Elev. 784,576	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
4	ANML	Lat. 36° 02' 18,97186" N Lon. 6° 34' 29,34270" E Elev. 819,458	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
5	ATHM	Lat. 36° 14' 50,27924" N Lon. 6° 17' 19,50706" E Elev. 746,501	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
6	BNBS	Lat. 36° 19' 02,52954" N Lon. 6° 49' 49,06384" E Elev. 852,238	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
7	BOUZ	Lat. 36° 47' 46,03867" N Lon. 3° 01' 59,81061" E Elev. 386,702	0,000 0,000 0,000	Fixé Fixé Fixé	Ajusté	
8	BSBT	Lat. 36° 24' 18,54793" N Lon. 7° 02' 38,67169" E Elev. 574,082	0,012 0,014 0,016		Ajusté	
9	CSTN	Lat. 36° 19' 48,64816" N Lon. 6° 35' 20,46030" E Elev. 592,893	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
10	DDCH	Lat. 36° 27' 01,56937" N Lon. 6° 37' 56,52343" E Elev. 591,626	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
11	GARH	Lat. 36° 08' 24,19395" N Lon. 6° 36' 39,85241" E Elev. 802,742	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
12	IBZD	Lat. 36° 22' 57,38618" N Lon. 6° 28' 13,05578" E Elev. 523,284	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
13	KHRB	Lat. 36° 16' 06,07919" N Lon. 6° 41' 29,23427" E Elev. 646,413	0,011 0,014 0,015		Ajusté	
14	LBCH	Lat. 36° 20' 56,74118" N Lon. 6° 42' 13,56319" E Elev. 719,185	0,011 0,014 0,015		Ajusté	

15	MILA	Lat.	36° 27' 02,97929" N	0,011	Ajusté
		Lon.	6° 15' 52,86608" E	0,014	
		Elev.	516,490	0,015	
16	OHBA	Lat.	36° 30' 08,09356" N	0,012	Ajusté
		Lon.	6° 57' 28,49210" E	0,014	
		Elv.	797,614	0,016	
17	ORHN	Lat.	36° 11' 02,65465" N	0,011	Ajusté
		Lon.	6° 42' 13,01754" E	0,014	
		Elev.	732,703	0,015	
18	OSGN	Lat.	36° 10' 47,54223" N	0,011	Ajusté
		Lon.	6° 23' 19,60716" E	0,014	
		Elev.	744,435	0,015	
19	SGUS	Lat.	36° 07' 35,63188" N	0,011	Ajusté
		Lon.	6° 47' 05,98462" E	0,014	
		Elev.	819,768	0,015	
20	SMRA	Lat.	36° 16' 16,58251" N	0,011	Ajusté
		Lon.	6° 29' 48,29393" E	0,014	
		Elev.	714,201	0,015	

Figure IV.9 : Rapport sur la position des points.

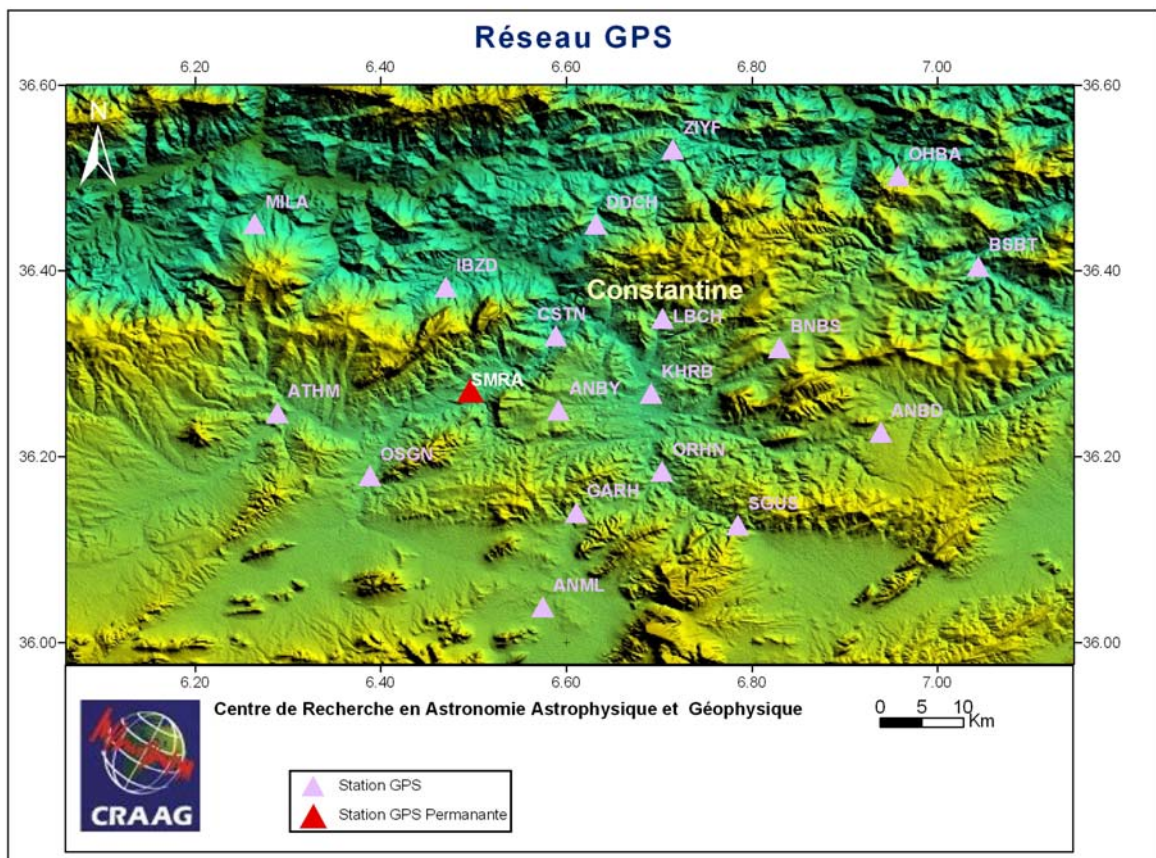


Figure IV.10 : 19 points du réseau GPS

IV.4. Conclusion

Dans ce travail nous avons procédé à l'installation du premier réseau de surveillance GPS autour de la faille active (faille d'Ain Smara). L'objectif premier de ce réseau de grande importance est de surveiller cette faille mais aussi de connaître les mécanismes de déformation.

Dix-huit points de ce réseau ont été observés durant 10 jours (14-24/01/2008) d'une façon semi permanente (4 à 6 jours). Nous avons rattaché ce réseau à la station permanente de Constantine localisée au niveau de la station régionale d'Ain Smara.

La déformation du nord algérien est une déformation lente. Elle est d'une moyenne de l'ordre de 5 mm/an. Donc la détection de cette déformation nécessite une longue période de temps d'observation qui est de l'ordre de 5 ans, pour obtenir une série temporelle de déplacement. Il est donc impossible de trouver des résultats significatifs dans quelques mois. Dans cette étude nous avons, installé ce réseau GPS avec une première mesure des positions, ce qui est important en cas de secousse importante dans la région pour la mesure des déformations cosismiques. Pour tenter de connaître, les mouvements lents, nous devons effectuer d'autres mesures chaque 6 à 8 mois.

Pour cette étude nous avons utilisé le logiciel *Ashtech* solution, pour le traitement des données GPS. Les résultats obtenus pour la précision des mesures sont de l'ordre de 11 à 14 mm pour la précision horizontale et 15 à 16 mm pour la précision verticale, pour toutes les stations. Les barres d'erreurs de ces mesures exagérées dans la mesure où nous devons obtenir des précisions de l'ordre de 1 mm. Pour viser cette valeur, il faudra retraiter ces données par des logiciels scientifiques comme GAMIT et il est demandé de prendre en considération les paramètres (les éphémérides,...) éliminant les erreurs sur le positionnement.

Cette première partie de notre travail est très importante dans la mesure où la première fois un réseau de station GPS est installé dans la région de Constantine, deuxième ville de notre pays. Ce réseau a pour mérite de nous renseigner sur les taux de déformation enregistrée au niveau de la faille d'Ain Smara, les directions de déplacement mais aussi d'avoir des mesures de référence pour tout calcul de mouvement cosismique.

Les remesures de ce réseau tout les 6 à 8 mois devra nous permettre de mieux comprendre les déformations dans la région de Constantine. Il s'agit d'une contribution certaine à la réduction du risque dans cette région.

**PARTIE SISMOLOGIQUE : LA SISMICITE DE LA
REGION DE CONSTANTINE**

CHAPITRE V : ETUDE DE L'ACTIVITE SISMIQUE DE LA REGION CONSTANTINOISE

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une analyse de l'activité sismique de la région Constantinoise. En effet, la mise en place des réseaux de surveillance REALSAS en 1998 ainsi que le réseau ADSN en 2007 permettent pour la première fois de connaître avec une meilleure précision l'activité sismique de la région Est algérienne. En effet, l'existence aujourd'hui, d'un nombre important de stations sismologiques digitales, opérant en mode temps réel, permet ainsi d'obtenir des informations fiables sur les différentes secousses qui se sont produites dans la région étudiée.

V.2. Surveillance sismique de la région de Constantine

V.2.1. Réseau REALSAS (Réseau Algérien de Surveillance et d'Alerte Sismique)

Ce réseau composé de 32 stations, initialement acquis en 1987, n'a pu être mis en place qu'en 2000. Il est composé d'une station principale (Alger) et de trois régionales (Constantine, Chlef, Oran). Chaque régionale est équipée d'une station tri composante courte période. Elle reçoit en temps réel les données des 7 stations par ondes radio UHF, directement ou bien par station relais. Les données sous forme digitale sont envoyées à la station centrale (Bouzaréah) par voies hertziennes spécialisées. Le réseau actuel de surveillance composé aujourd'hui de 25 stations du fait que certaines stations ont été abandonnées (8 à l'Est, 6 au Centre, 9 à l'Ouest) permet néanmoins une bonne écoute de l'activité sismique.

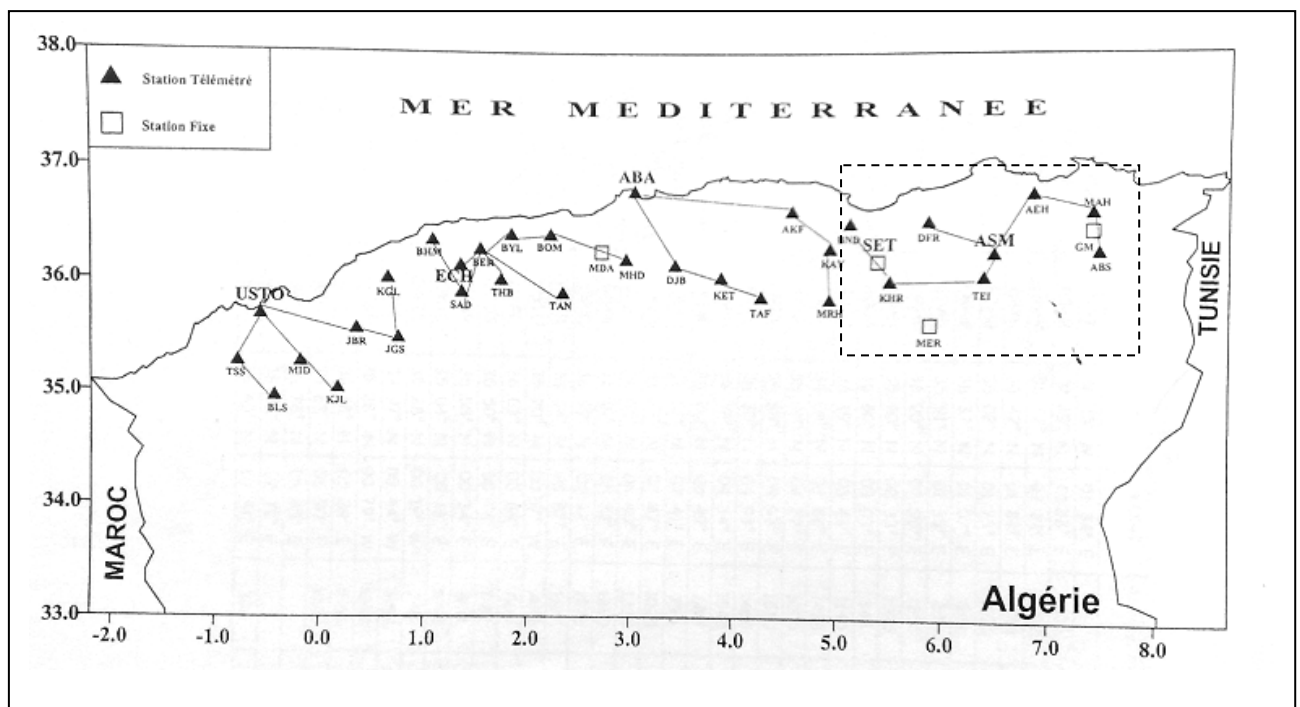


Figure V.1 : Réseau Algérien de Surveillance et d'Alerte Sismique

Le réseau sismologique de la région de Constantine est aujourd'hui composé de 10 stations, Merouana (CMER), et Guelma (CGLM), deux stations fixes, et 8 appartenant au réseau téléométré : Ain Smara (CASM) ; Bouaffroune (CDFR) ; Ain el Ouahch (CAEH) ; Dj-Teioualt (CTEI) ; Kef-Lehmer (CKHR) ; Dj-Manchoura (CMAH) ; Abbabsia (CABS) et Kef-Lekhel (CKFL), qui constituent le réseau régional de l'Est (voir la partie encadrée de la figure précédente).



Photo V.1 : La station analogique régionale de Constantine



Photo V.2 : Numérisation du signal analogique de la station de Constantine



Photo V.3 : Les trois composantes de sismomètre de la station CASM

V.2.2. Réseau ADSN (Algerian Digital Seismic Network)

Après le séisme de Boumerdes du 21 Mai 2003, le CRAAG décida de mettre en place le premier réseau sismologique digital. Une coopération entre la Chine et l'Algérie en matière de la sismologie a été mis en place pour bénéficier de l'expérience de ce pays en matière de surveillance. Un réseau de surveillance sismique de haute technologie (ADSN), composé de 08 stations numériques large bande (BB) et de 02 stations très large bande (VBB) fut installé en Avril 2007. La figure V.2 présente la répartition de ces stations sur le territoire algérien.

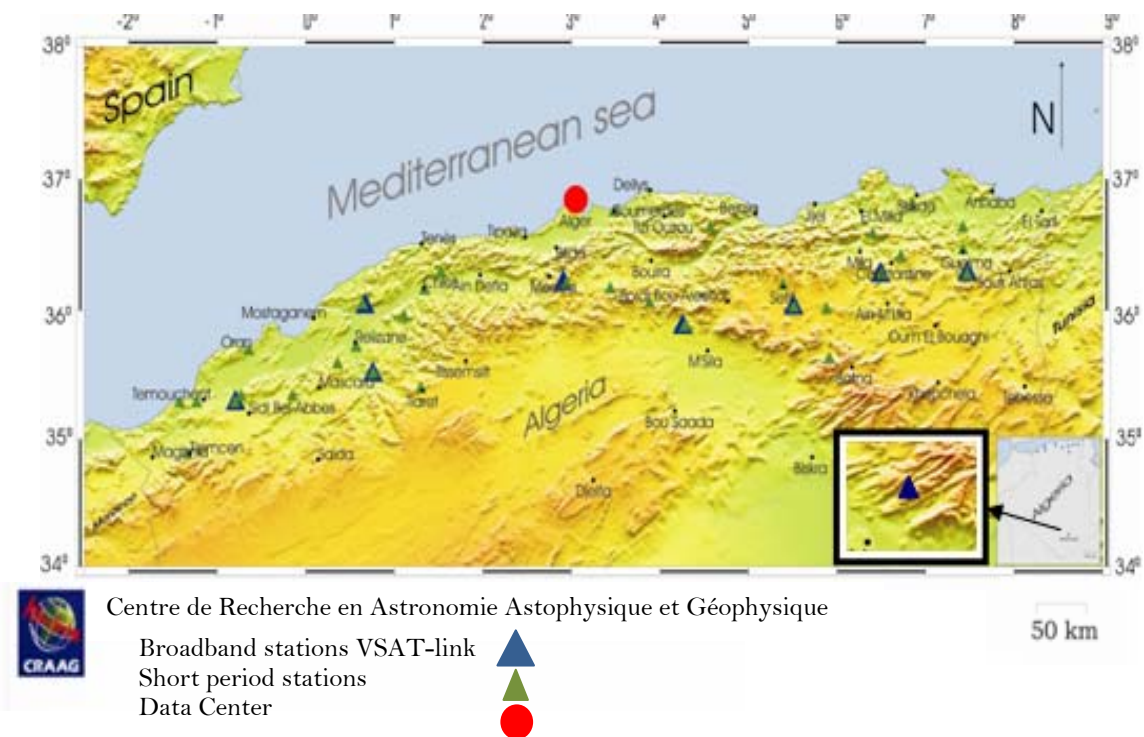


Figure V.2: Algerian Digital Seismic Network (ADSN)

Le choix des sites pour l'installation des stations a été basé sur les critères suivants :

- Géologie
- Bonne couverture du territoire.
- Etude du niveau de bruit (Campagne Site Survey).
- Sécurité des équipements.

Le tableau suivant résume les différentes caractéristiques des stations installées :

Station	Lieu	Type	Power	Transmission
EMHD	Mahouada (Médéa)	BB	Solar Panel	VSAT
ATAF	Tarf (M'Sila)	BB	Solar Panel	VSAT
CKHR	Kef lahmer (Setif)	BB	Solar Panel	VSAT
CKTR	Kantarra (Biskra)	BB	Solar Panel	VSAT
CABS	Abbabsia (Guelma)	BB	AC	VSAT
OJGS	Guires (Relizane)	BB	Solar Panel	VSAT
OKGL	Kef Guellal (Mostaganem)	BB	Solar Panel	VSAT
OTSS	Tessala (Sidi Belabbes)	BB	Solar Panel	VSAT
CSVB	Ain Smara (Constantine)	VBB	AC	VSAT
TTAM	Tamanrasset (Tamanrasset)	VBB	AC	VSAT

Tableau V.1 : Stations du réseau ADSN

Le réseau ADSN est basé sur une transmission par voie satellitaire. Ainsi la centrale de données basée au CRAAG reçoit grâce à ce mode de transmission, l'ensemble des données des stations.



Photo V.4: Station CKHR (Sétif)



Photo V.5 : Sismomètre large bande



Photo V.6 : Système d'acquisition



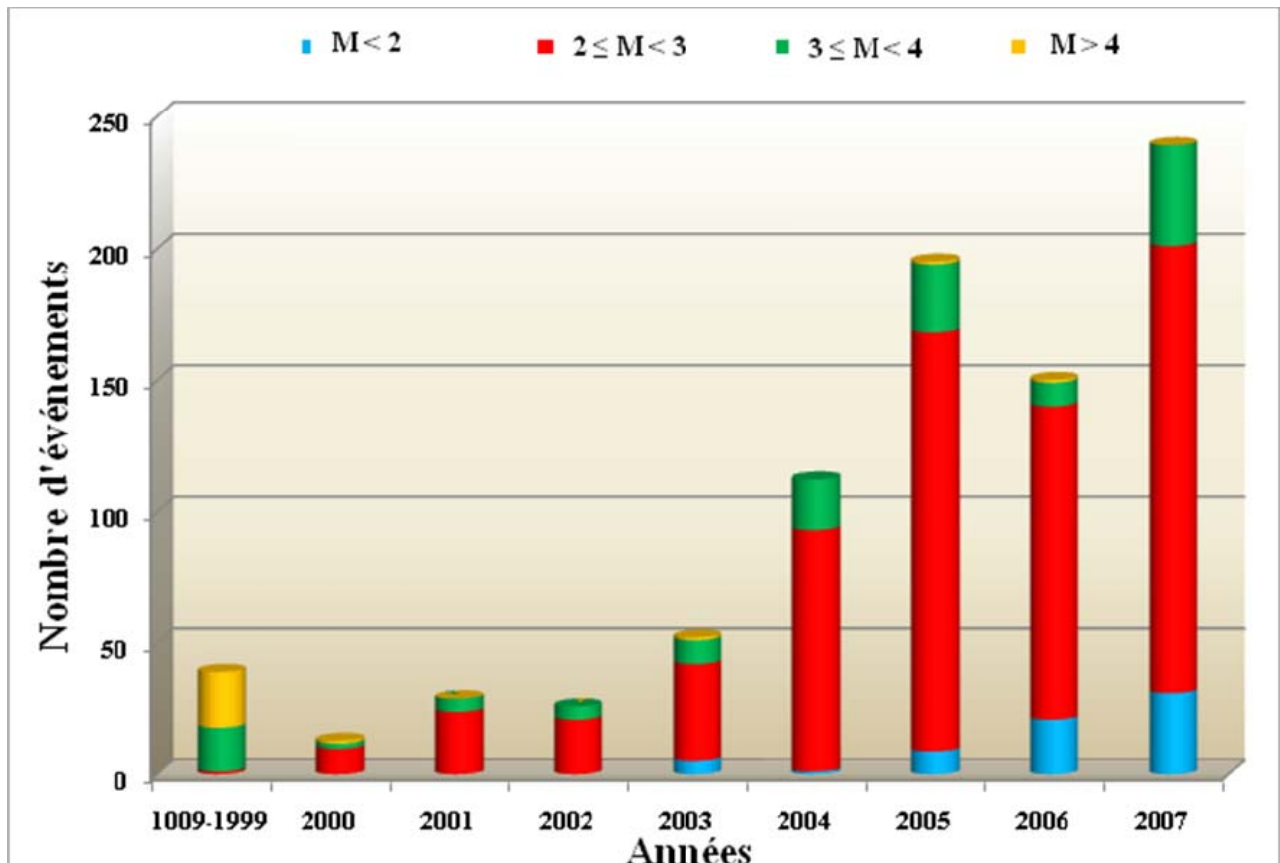
Photo V.7: Transmission par satellite (VSAT) des données de la station vers le Datacenter (Alger).

Ce réseau peut être densifié par des stations portables en cas d'événement sismique important.

V.3. Analyse de la sismicité

V.3.1. Analyse statistique

Pour une meilleure appréciation de l'activité sismique de la région Constantinoise, nous avons rapporté sur l'histogramme matérialisé dans la figure V.1, le nombre d'événements sismiques qui se sont enregistrés jusqu'à Décembre 2007, dans la zone $[36^{\circ}N-37.7^{\circ}N, 6^{\circ}E-8.2^{\circ}E]$. Pour cela, nous avons utilisé la base des données du réseau télémétrie du CRAAG:



Histogramme V.1: histogramme de fréquence des séismes

L'analyse de cet histogramme indique que deux périodes peuvent être distinguées:

❖ **La première période entre 1900-1999** caractérisée:

- Par un nombre peu élevé d'évènements. En effet, seul 39 évènements ont put être recensés durant un siècle. Ces évènements sont distribués comme suit: 20 évènements enregistrés durant 90 ans (1900-1990), 19 évènements durant une période de 10 ans (1990-1999).

- Du point de vue magnitude: nous avons constaté que sur ces 39 évènements, un seul évènement de magnitude inférieure à 3 est mentionné ($M = 2.9$, le 31/12/1998) alors que le reste possède des magnitudes supérieures à 3 ($3 \leq M < 4 \rightarrow 17$ évènements; $4 \leq M < 5 \rightarrow 13$ évènements ; $5 \leq M < 6 \rightarrow 5$ évènements et un seul évènement de $M=6$ le 25/10/1985).

❖ La deuxième période entre 2000-2007 caractérisée par :

- Une augmentation considérable du nombre d'évènement, en rapport à la première période. En effet 816 évènements ont été recensés pour une période de 7 ans, dont 696 ont été enregistrés pendant les 4 dernières années. La plus grande valeur est 239 évènements enregistrés en 2007.

- Du point de vue magnitude: tous les évènements ont une magnitude inférieure à 4, sauf quatre évènements : du 03/06/2000, 20/09/2003, 17/01/2005 et du 26/04/2006 qui ont été générés par les magnitudes : 4.1, 4.8, 4 et 4.2 respectivement.

Nous pouvons interpréter cette différence entre les deux périodes par le niveau de développement du réseau de surveillance. En effet, pour la première période, on peut dire que le réseau, fonctionnant avec peu de stations n'a pu enregistrer que peu de secousses. L'état sécuritaire du pays, entre 1990-1999 a engendré également quelques dommages de quelques stations. Ainsi la situation du réseau a entraîné:

- un ratage des faibles magnitudes ($M < 4$);
- une mauvaise localisation qui a introduit des erreurs;
- une surestimation des magnitudes.

Par contre, pour la deuxième période, l'installation d'un nombre important de stations ainsi qu'une bonne maintenance des installations a permis à toutes les stations de fonctionner à partir de 2000. Ce qui conduit à une bonne couverture sismique du territoire algérien par la localisation des évènements avec le moins possible des erreurs et l'enregistrement des séismes de faible magnitude.

V.3.2. Analyse sismo-tectonique

La répartition des 855 événements enregistrés entre 1900-2007 est représentée sur la carte suivante :

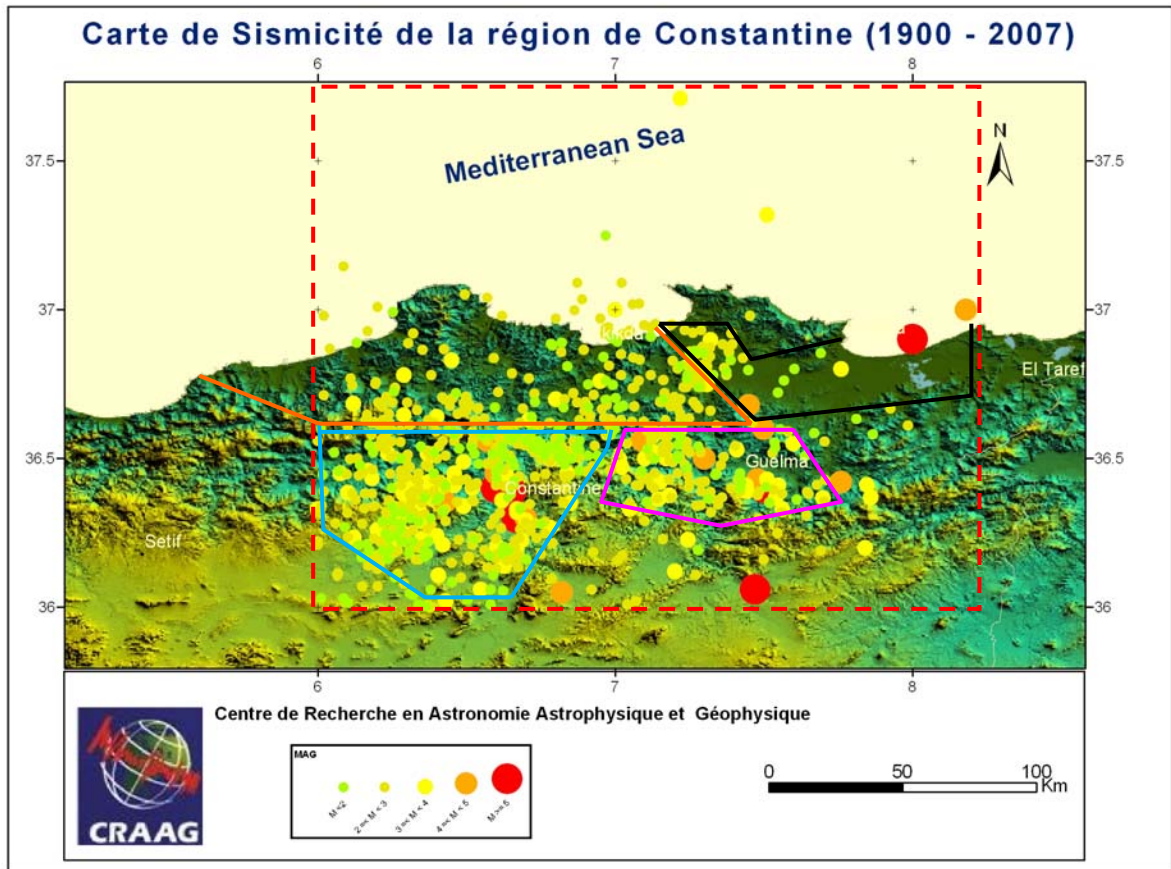


Figure V.3 : Carte de sismicité de la région de Constantine (1900-2007)

- - - La région d'étude [36°N - 37.7°N , 6°E - 8.2°E] ;
- Zone 1 : Petite Kabylie ;
- Zone 2 : Le bassin de Annaba ;
- Zone 3 : Le bassin de Guelma ;
- Zone 4 : Le bassin de Constantine.

On distingue sur cette carte plusieurs zones de sismicité :

Zone 1 : La Petite Kabylie

Dans cette zone, nous avons constaté que la sismicité se localise le long de la frontière entre le domaine externe et le domaine interne du noyau de Petite kabylie. Ce dernier composé de socle métamorphique et de terrains allochtones (Meghraoui, 1988). Ainsi ce bloc semble aséismique et que la sismicité se concentre sur ses abords. Nous pouvons remarquer à partir de la carte précédente, une concentration de sismicité de la partie orientale de cette zone. Ceci est dû au réseau des failles qui existe dont la principale du Djebel Safia (figure V.6), orientée NW-SE, séparant la zone 1 et 2.

Zone 2 : Le bassin de Annaba

C'est un bassin néogènes et quaternaire. La sismicité de cette zone est faible et localisée sur la faille de Djebel Safia (figure V.4) qui sépare les deux zones 1 et 2. Le plus fort séisme connu de la région est celui du 02 décembre 1961, de magnitude $M_s=5.4$.

Zone 3 : Le bassin de Guelma

Le plus fort séisme connu de la région est celui du 10 février 1937 d'intensité maximale VIII MSK et de magnitude $M_s = 5.4$.

Les études géologiques ont menées dans le bassin de Guelma montrent que c'est un bassin Néogène coincé entre deux décrochements et limité à l'est et à l'ouest par une série de failles normales N-S à NNW-SSE (Meghraoui, 1988, Aoudia et al., 2000). Nous notons, particulièrement dans ce bassin les failles de Bouchegouf et de Hammam N'Bailis (Figure V.5). Ces failles affectent les dépôts quaternaires (Vila, 1980). Depuis l'an 2000 nous enregistrons de nombreuses secousses dans ce bassin.

Zone 4 : Le bassin de Constantine : c'est la zone qui nous intéresse dans ce mémoire.

1- La première période : Dans cette région, 3 séismes d'intensité maximale VIII MSK ont frappés la région : le premier est celui du 4 Août 1908 de magnitude $M_s= 5.2$, le deuxième celui du 6 Août 1947 de magnitude $M_s =5.0$ et enfin le troisième du 27 Octobre 1985 de magnitude $M_s = 6.0$. La période de retour (intervalle de récurrence) de ces séisme semble d'environ 39 ans (Bounif et al., 1987).

Le séisme de 06 Aout 1947 : c'est une secousse importante qui a frappée la région de Constantine à 09:45:38 d'une magnitude $M_s =5.0$. L'épicentre macrosismique a été localisé à 36.30°N et 06.67°E au sud-est de la ville. L'intensité maximale (I_0) a été observée à El Khroub de VI-VII MM. Ce choc sismique a été suivi par un nombre important de répliques. Elles étaient d'une dizaine entre le 06 et le 07 Aout. Plusieurs de ces répliques ont été ressenties dans les localités voisines (Ain Smara, El Khroub et Ain Abid) et particulièrement celle du 07 Aout (12h 27 mn) qui a été presque aussi forte que la secousse principale.

Le séisme de 25 Octobre 1985 : Un séisme de magnitude $M_s = 6.0$ (EMSC) et d'intensité maximale VIII (CRAAG, Alger) observée dans une zone située entre El-Khroub et Beni-Yakoub), s'est produit près de Constantine. Les caractéristiques sismiques du choc principal sont illustrées dans le tableau V.3. 288 stations mondiales ont enregistrées cette secousse.

En effet, c'est l'événement le plus important après le séisme d'Al Asnam du 10 Octobre 1980 ($M_s = 7.3$) dans l'Atlas Tellien et le plus important dans cette région Est depuis 1947.

Lors de cette secousse, quelques dommages ont été enregistrés. Les observations sur le bâti ou sur les édifices touchés ont confirmé le déplacement coulissant généré par la structure active. La profondeur du foyer était $h = 13$ km pour un rayon macrosismique $r = 130$ km et $I_0 = VIII$ (Bounif, 1990).

Les ruptures de surface générées par ce séisme ont une longueur totale de 4.5 km et sont apparues en échelon dans trois zones différentes :

Zones	Location	Direction	longueur	« e »	« h »	« v »	mouvement
A	Entre Kef Tassenga et Koudiat Ben Ghrara.	N055°	3.8 km	8 cm	11cm	2-4 cm	Décrochement sénestre
B	Prés du village de Beni Yakoub.	E-W	700 m	18cm	16cm	18cm	Sénestre et dextre
C	Aioun Dardar.	N055°	-	-	-	1m	-

Tableau V.2: Ruptures de surface (Bounif et al, 1987).

e : L'ouverture maximale ; h : Déplacement horizontal maximum ; v : Mouvement vertical.

A : segment principal avec : vecteur de glissement de direction N129° ;

Rejet vertical négligeable (de l'ordre de 10 cm) ;

Largueur variable, entre 5 et 10 m.

B et C : Correspondent à des ruptures de surface secondaire.

Caractéristique sismique :

✓ Choc principal :

Paramètres	Valeurs	Références	Observations
Coordonnées du foyer	H ₀ : 19h34'59.73" Lat : 36.38°N±0.02 Log : 6.71°E±0.02° Prof : 10 km±6	CSEM (Strasbourg)	Location à partir de 288 stations mondiales.
	H ₀ : 19h35'00.30" Lat : 36.46°N±0.07° Log : 6.76°E±0.07° Prof : 10 km	NEIC	Location à partir de 285 stations mondiales.
	Lat : 36.46°N Log : 6.87°E Prof : 10km	HRV	
Magnitude	M _d = 6.0	CRAAG	Suivant les auteurs et les stations utilisées, les magnitudes différentes très sensiblement.
	M _{sz} = 6.0	CSEM	
	M _b = 5.5 (51 obs.) M _{sz} = 5.9 (7 obs.)	NEIC	
Moment sismique (dyne.cm)	M ₀ (CMTS) = 6.2*10 ²⁴	NEIC	
	M ₀ (MB) = 8*10 ²⁴	Papadimitriou et Bezzeghoud	Modélisation des ondes P
	M ₀ (ts) = 1.14*10 ²⁴	Bounif et al. (1987)	A partir des traces de surface
	M ₀ (mr) = 6*10 ²⁴	Bezzeghoud et Bounif (1989)	A partir des meilleures répliques
	M ₀ (I) = 5.2*10 ²⁴	Deschamps et al. (1990)	Inversion des ondes de volume Lp et Cp
Surface de la faille	20*11= 220 km ²		Meilleures répliques
Longueur totale des ruptures de surface	4.5 km	Bounif et al (1987)	
Chute de contraintes	3 bar		C.U.D/W
R surface isoséiste	130 km		Intensité minimale Im=III

Tableau V.3: Caractéristiques sismiques du choc principal (Bounif, 2004).

Le moment sismique $M_0 = \mu a S$ avec μ : module de cisaillement (rigidité) (Nm^{-2}) ~ 32 Gpa dans la croûte ;
 a : glissement moyen (déplacement) (m) ;
 S : surface de rupture (m^2) ;
 M_0 : (Nm). 1Nm=10⁶dyne.cm

✓ Paramètre géométrique du plan de la faille :

Référence	Plan 1			Plan 2		
	φ_1	δ_1	λ_1	φ_2	δ_2	λ_2
Dechamps et al (1990)	217°	84°	19°			
CMT	213°	71°	20°	117°	71°	160°
1	220°	65°	-171°	126°	81°	-25°
2	195°	85°	11°	286°	79°	-175°
3	220°	70°	-148°	118°	60°	-23°
4	205°	80°	-174°	114°	84°	-10°

Tableau V.4: Paramètres géométriques du plan de faille (Dechamps, 1991).

φ : Azimut (Strike) ; δ : Pendage (Dip) ; λ : angle de glissement (Rake) ; (1,2,3 et 4) : mécanismes correspondent aux répliques.

✓ **Distribution des répliques :**

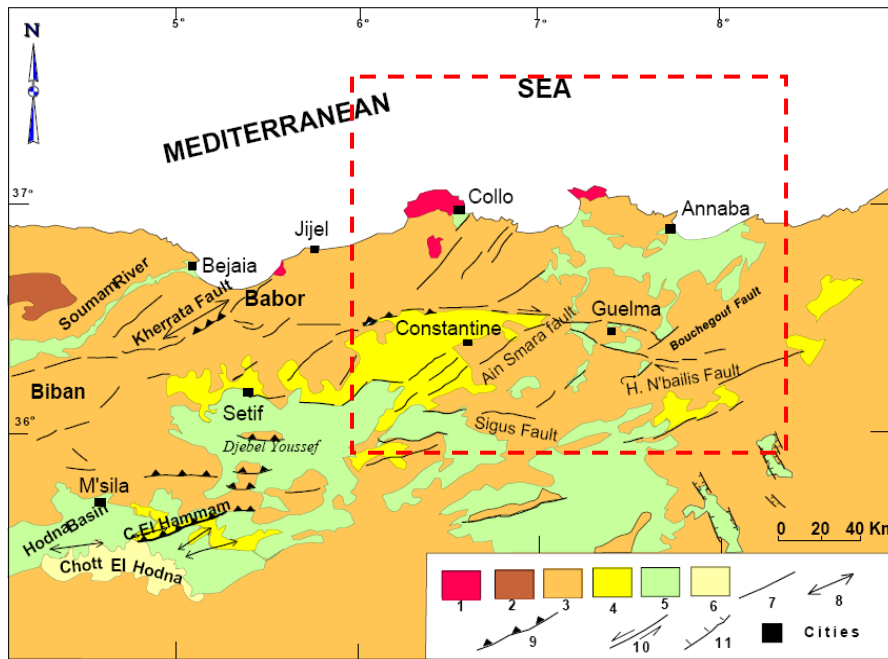
La distribution spatiale des épicentres définit une surface faillée de 30 km de longueur et de 2 km de largeur. Celle-ci est orientée NE-SW. Les foyers sont distribués sur des plans de failles presque verticaux (Bounif, 2004).

L'examen de la distribution des répliques met en évidence trois segments de rupture caractérisés par différentes orientations par rapport à la faille principale (deux orientée 20°N et la troisième 45°N) et par la répartition en profondeur des événements correspondants (Bounif, 2004).

✓ **La structure tridimensionnelle de vitesse des ondes "P"**

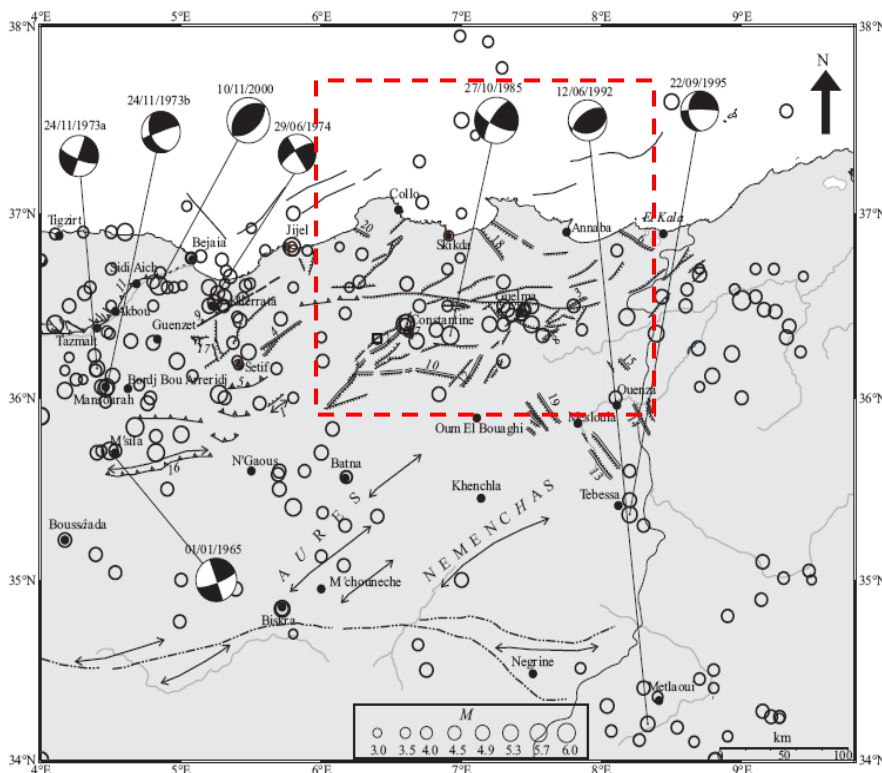
La tomographie sismique de la région source révèle une vitesse 3D de l'onde P à une profondeur de 12 km. Le contraste de vitesse dans la couche supérieure peut être en rapport avec les différentes formations tectoniques. Les plus basses vitesses (3.5 km/s) correspondent aux dépôts Mio-Pliocènes et Quaternaires, les plus hautes vitesses (5.5 km/s) aux nappes Néritique Constantinoises et les nappes Telliennes du Jurassique au Paléogène. L'extension en profondeur des contrastes de vitesse permet de conclure que les nappes sont charriées sur quelques kilomètres (Bounif et Dorbath, 1998).

2- La période récente : Quoique de nombreuses secousses aient pu affecter la région durant ces dernières années, l'événement marquant a été la crise sismique qui a frappé la région de Ain Kerma 10 km Sud-Est la ville de Mila pendant 34 jours du 30 Novembre 2007 au 02 Janvier 2008 (voir l'histogramme VI.1). La plus grande secousse fut enregistrée le 30 Novembre 2007 à 09:44:46, de magnitude $M_d=3.6$. Cette crise est considérée comme une crise sismique induite, provoquée par l'infiltration d'eaux dans les failles (micro-failles) qui se trouvent dans Djebel el Akhal. Ces eaux pompées du barrage principal de Beni-Haroun de la région de Grarem vers le barrage réservoir de Oued Athmania pour alimenter la ville de Constantine et ses environs en eau potable. L'étude de cette crise est l'objectif du chapitre VI de ce mémoire.



- 1) Volcanisme ;
- 2) Paléozoïque ;
- 3) Jurassique-Crétacées et bassin Cénozoïque inférieur ;
- 4) dépôts Néogène post-nappe ;
- 5) dépôts Plio-Quaternaire ;
- 6) dépôts Quaternaire ;
- 7) Faille ;
- 8) Anticlinale ;
- 9) Faille inverse ;
- 10) Faille de décrochement ;
- 11) Faille normale.

Figure V.4 : Carte géologique du Nord-Est Algérien (D'après Kieken, 1962 ; Vila, 1980 et Meghraoui, 1988) (Réf : Harbi et al., 1999)



- A : failles quaternaires alignant des sources actuelles ou à hydrothermalisme actif,
 B : failles plioquaternaires,
 C : Failles inverses,
 D : Pli,
 E : failles offshore,
 F : Flexure sud-atlasique.

- 2) Faille d'Ain Smara,
- 3) Faille de Bouchegouf
- 6) Faille du Cap Rosa,
- 7) Faille de Constantine,
- 8) Faille de Hammam N'Bailis,
- 10) Faille de Sigus,
- 12) Faille de Temlouka,
- 15) Fossé de Taoura,
- 18) Faille de Djebel Safia,
- 19) Fossé de Terraguelt.

Figure V.5 : Carte sismotectonique montrant les différentes failles actives et potentiellement actives (plio-quaternaires) réalisée sur la base des travaux de Vila (1980), Aissaoui (1984), Meghraoui (1988), Boudiaf (1996) et Harbi et al., (1999). (Réf : Harbi et al 2003)

Parmi les failles à l'origine de cette sismicité. Quatre failles actives autour de Constantine et qui sont : **faille Nord Constantinois, faille de Sigus, faille de Tamlouka et faille d'Ain Smara**. Cette dernière produit la majorité des séismes enregistrés dans la région de Constantine (l'analyse de cette faille est dans le chapitre III).

Les deux figures (V.6 et V.7) montrent la différence de la sismicité entre la première et la deuxième période.

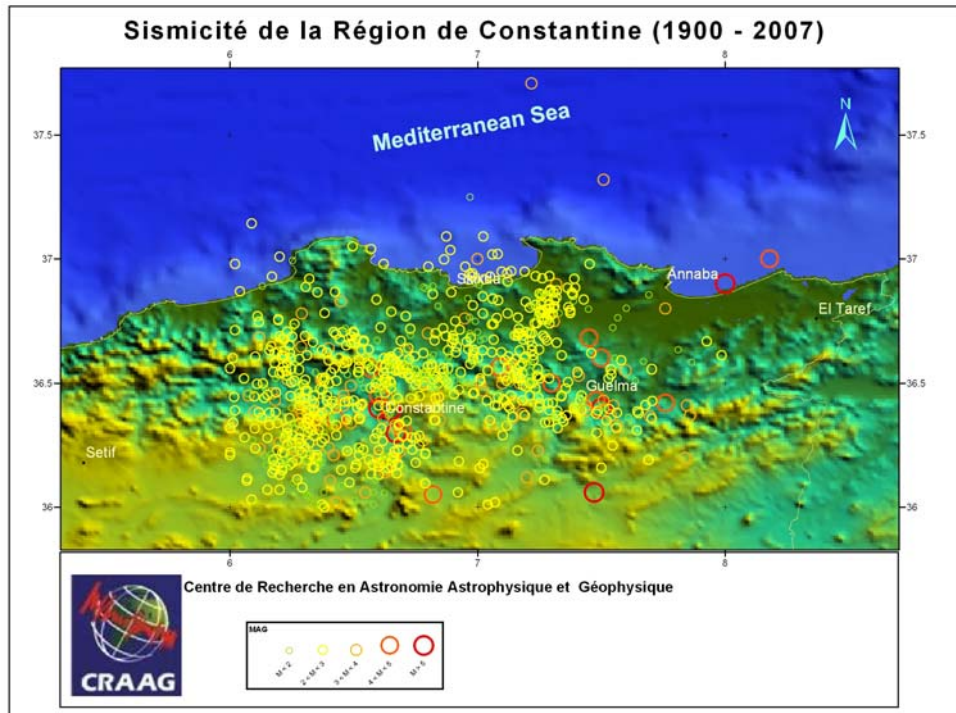


Figure V.6 : Sismicité (1900-2007).

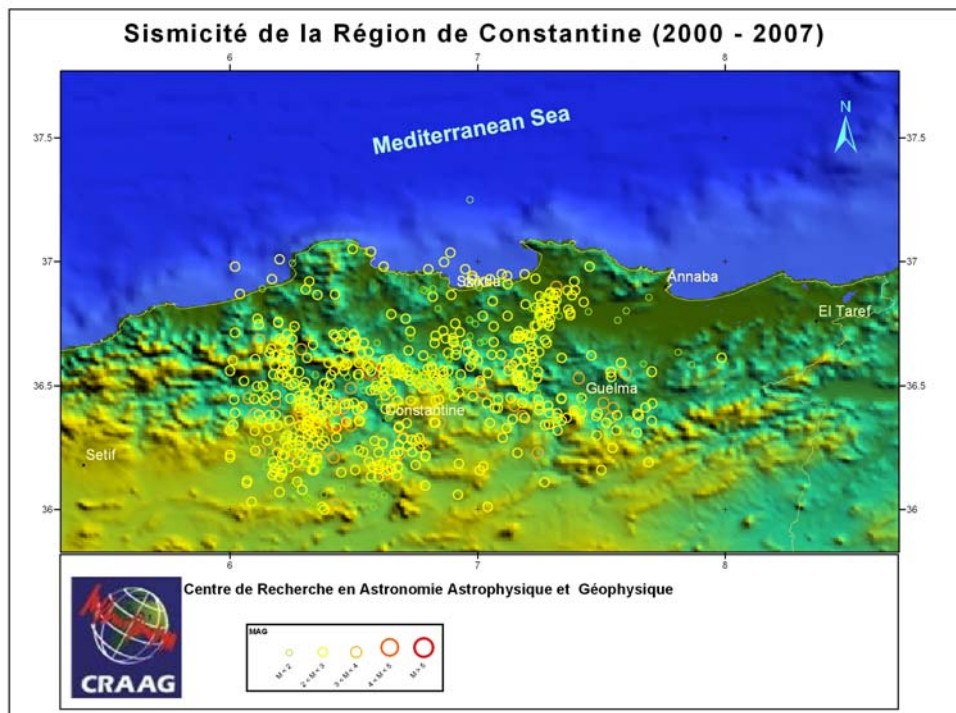


Figure V.7 : Sismicité (2000-2007).

Chapitre VI : Etude de la crise sismique (sismicité induite) de la région d'Ain Kerma (Région de Constantine)

VI.1. Introduction

Le 30 Novembre 2007, une crise sismique se déclencha dans la région de Ain Kerma 10 km Sud-Est de la ville de Mila. Elle débuta par une secousse avec les coordonnées (36.340°N, 06.499°E) de magnitude $M_d = 3.6$ ressentie par les populations des villages situés entre Oued Athmania et les localités avoisinantes le barrage de Beni Haroun (figure VI.1). Cette activité se manifesta dans les jours qui suivirent par des centaines de microsecousses dont parfois des dizaines ressenties lors d'une même journée. Cette activité provoqua ainsi une grande panique auprès des populations de la région. La présence de l'important barrage de Beni Haroun et la proximité des villes de Constantine et de Mila renforça les inquiétudes.

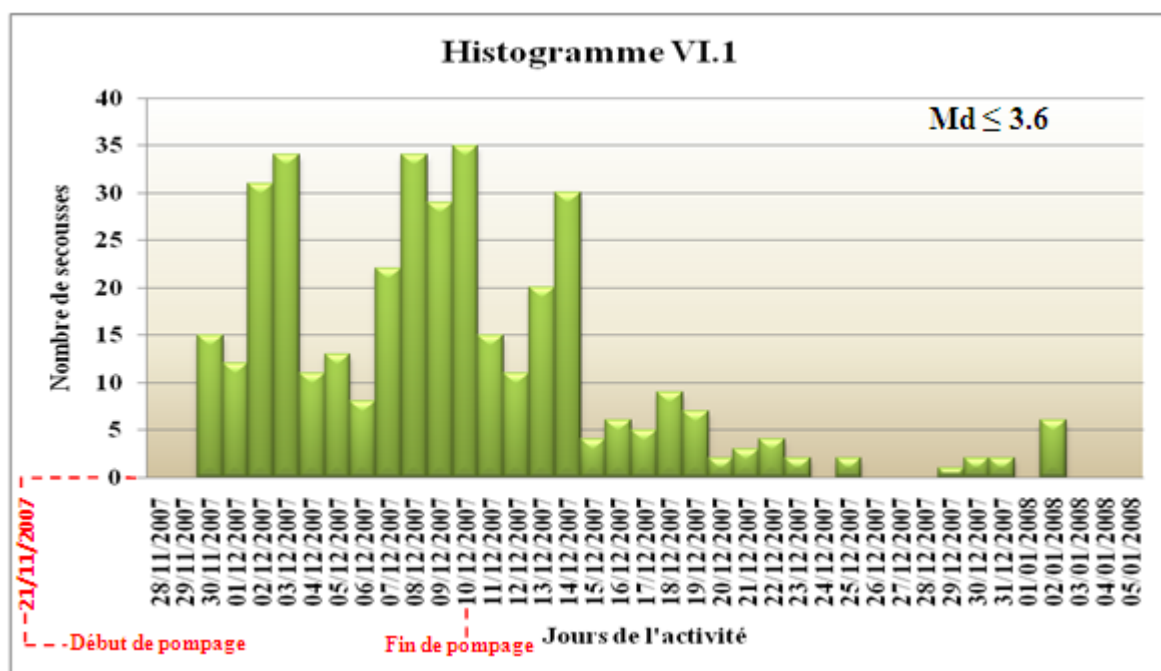
Ainsi, ce phénomène exceptionnel jamais observé en Algérie constituait outre l'aspect risque sismique, une curiosité scientifique, indispensable à comprendre. Plusieurs interrogations se posaient ainsi, quelles étaient les causes de cette sismicité, l'importance, la durée,...

C'est afin de répondre à ces différentes interrogations que m'a été donné l'opportunité de réaliser l'étude sismologique de cet événement exceptionnel s'étant produit dans ma région d'étude. Il faut dire également que pour la première, étaient obtenus dans la région de Constantine, des données digitales fiables pour étudier un événement sismique.

Ce travail s'avérait ainsi complémentaire du travail effectué dans la première partie de mon mémoire montrant ainsi la complémentarité des surveillances par réseau géodésique que par réseau sismologique.

VI.2. Activité sismique enregistrée (30/11/2007 - 02/01/2008)

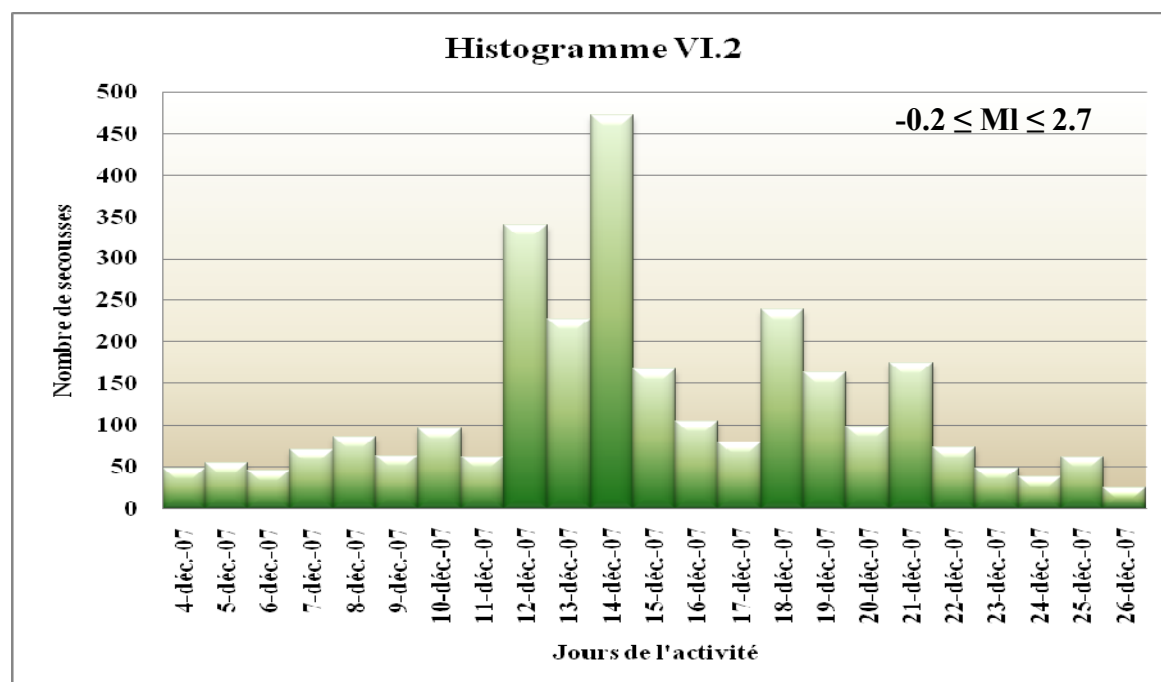
Afin de montrer l'importance de l'activité enregistrée durant cette crise, deux histogrammes indiquent le nombre de secousses qui furent enregistrées par jour, par le réseau télémétré (histogramme VI.1) et par le réseau déployé après le début de la crise (histogramme VI.2).



L’histogramme VI.1 nous montre que l’activité sismique dans cette région a été enregistrée par un réseau régional après 9 neuf jours de pompage, la distribution de secousses s’exprime par deux phases, la première du 30/11 au 14/12/07 se caractérise par un grand nombre de secousses relativement à la deuxième phase (du 15/12/07 au 02/01/08). Une diminution de nombre de secousse importante a été enregistrée après quatre jours depuis l’arrêt de pompage, puis un arrêt définitif de vibration à partir de 03/01/2008. On conclut que cette vibration peut être à un lien directe avec le pompage. La formule de magnitude de durée utilisée par le CRAAG est :

$$Md = - 0.87 + 2.00 \log (d) + 0.0035 D$$

avec d : durée du signal et D : distance du séisme.



L'histogramme VI.2 montre une densité de secousses importante comparé au premier histogramme (pour le jour 14/12 le facteur est égale 15 entre les deux réseaux), car l'enregistrement a été fait par un réseau local. Cet histogramme montre l'influence de nombre de stations d'enregistrement (fig.VI.6).

VI.3. Explication du processus de transfert des eaux

Après le début du déclenchement de cette activité intrigante, nos investigations nous ont révélé que cette activité avait débuté au moment ou était enclenché le transfert des eaux du barrage de Béni-Haroun (région de Grarem) vers le barrage secondaire (réservoir) de Oued Athmania et ceci afin alimenter la ville de Constantine et sa région en eau potable.

Le processus de pompage s'effectua par une méga station se trouvant sur la rive du barrage de Béni-Haroun, ce qui permettait l'acheminement de l'eau vers le barrage de Oued Athmania par le biais de pipes. Lors de ce transfert, l'eau traversait le tunnel du Djebel el Kehel avant d'arriver au barrage de Oued Athmania.

Or il s'avéra que des fuites de cette eau transférée furent constatées au niveau du village d'Ain Tin. Ces fuites dues aux séries des microfailles se trouvant autour du tunnel du Djebel el Akhal (voir la carte géologique figure VI.3). Les responsables du pompage déclarèrent (communication orale Décembre 2007) que 60% des eaux pompées arrivaient au barrage d'Oued Athmania, et que 40% s'infiltraient dans le sous sol.

A partir de 10/12/2007 l'opération de pompage ça dure 20 minutes pour remplir seulement le bassin tampon d'Ain Tin (voir figure VI.1) et les eaux ne traversent pas le tunnel. Le schéma suivant présente ainsi le processus de transfert des eaux entre les deux barrages.

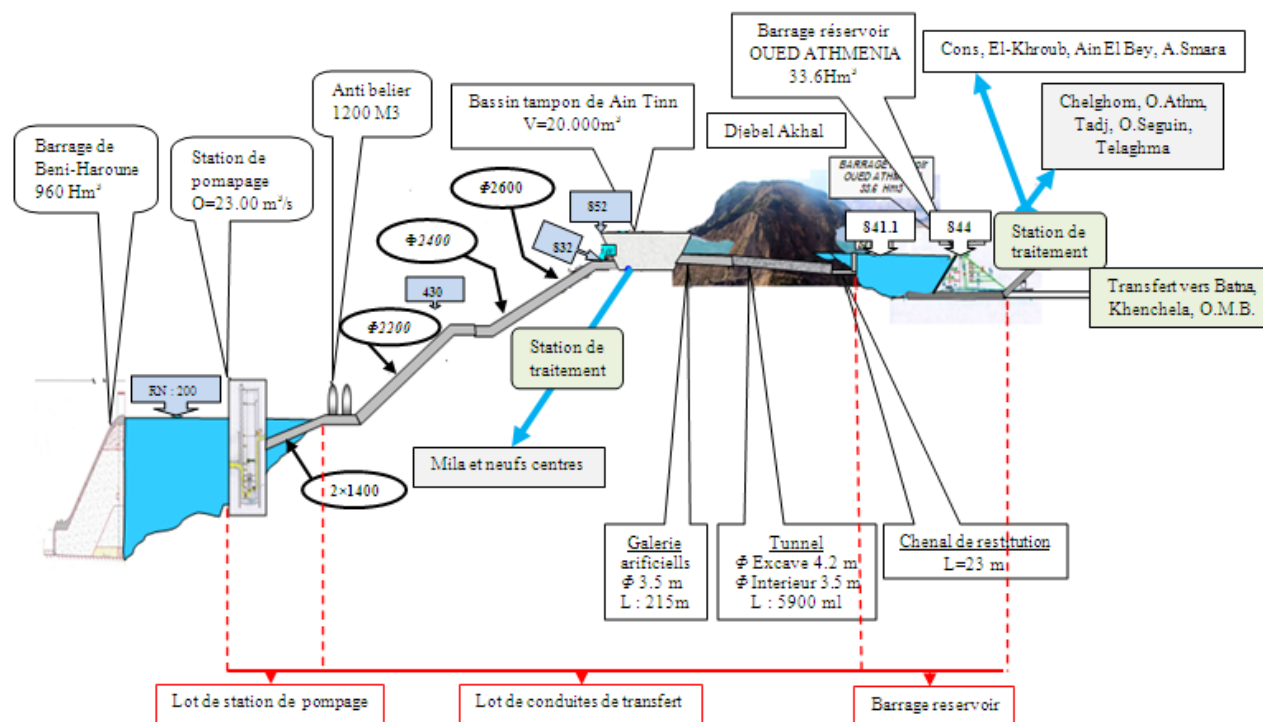


Figure VI.1: Schéma synoptique du projet de transfert des eaux du barrage du BENI-HAROUN



Photo VI.1 : Barrage de Beni-Haroun



Photo VI.2: Méga station de pompage

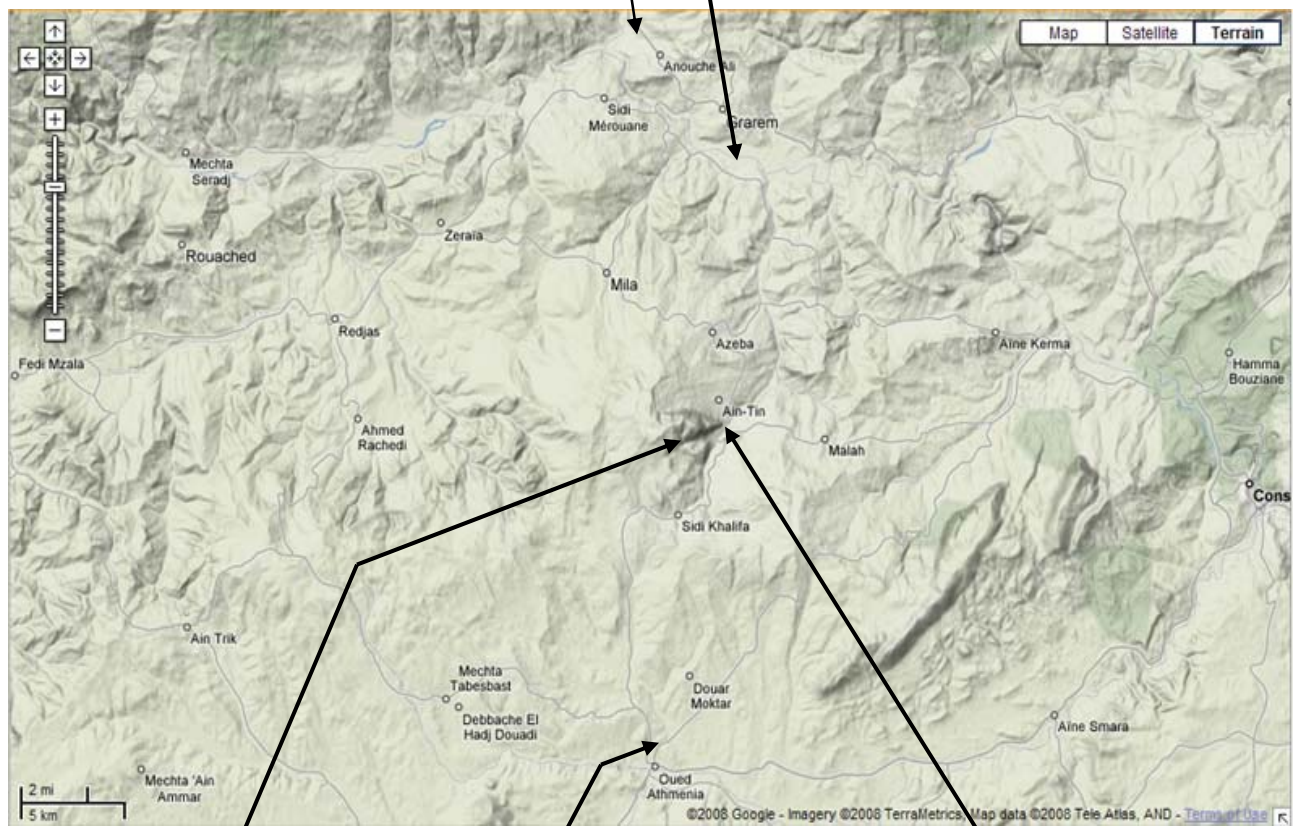


Photo VI.3: Djebel el Akhal



Photo VI.4 : barrage de Oued Athmania



Photo VI.5 : Ain Tin

Figure VI.2 : Transfert des eaux entre les deux barrages.

Après une présentation du contexte de la crise sismique qui a affectée la région, nous présentons dans ces prochains paragraphes les résultats de l'étude sismologique effectuée dans la région à la suite du déclenchement du phénomène.

VI.4. Cadre géologique

La crise sismique s'est produite au Sud Est du Djebel Akhal, situé à l'ouest de la ville Constantine.

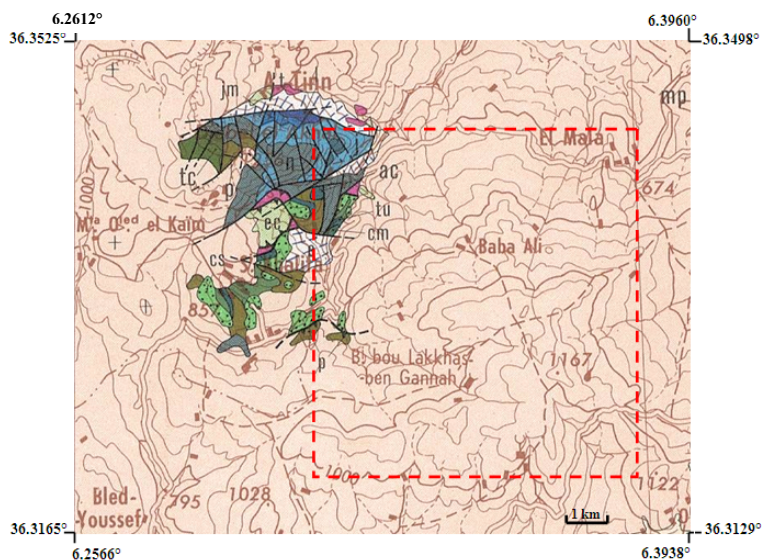


Figure VI.3 : Une partie de la carte géologique de Constantine 1/200 000. (J.-M. VILA, 1977)

La majorité des événements sont concentrés dans le cadre rouge.

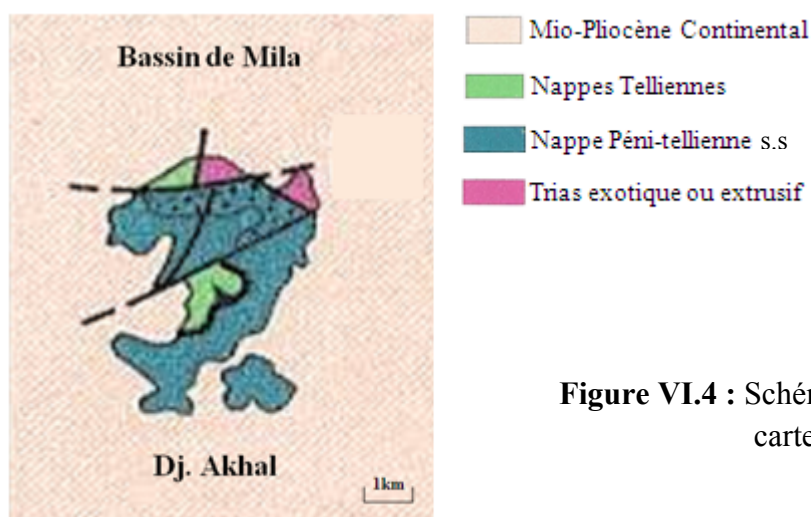


Figure VI.4 : Schéma structural simplifié de la carte précédente.

Le Djebel el Akhal est situé au milieu du Bassin de Mila et constitué de formations Mio-Pliocènes. Ce djebel, formé principalement dans les nappes telliennes laisse apparaître du Trias exotique ou extrusif. Au sein de ce Djebel, il existe nombreuses microfailles de différentes orientations dont les deux principales, s'étendant sur 5 km et orientées E-W, NE-SW (figure VI.4).

VI.5. Phénomène de sismicité induite

On peut distinguer deux sortes de phénomènes des tremblements de terre ou séismes :

- Les tremblements d'origine tectonique qui occasionne le plus de dégâts à la surface de la terre et déforme les fonds marins générant des tsunamis. ce sont les séismes les plus nombreux.
- Les tremblements non tectoniques, soient naturels ou artificiels :

Les séismes volcaniques : Ce sont les séismes naturels non tectoniques les plus fréquents. Ils se produisent en même temps qu'une activité volcanique avec ou non éruption, dû aux mouvements des magmas dans les chambres magmatiques des volcans.

Les séismes provoqués : Ce sont les séismes dus aux explosions. Ces explosions sont de nature très différente et vont des tirs de mines et de carrières aux explosions nucléaires.

Les séismes induits : dus à l'activité de l'homme. Mise en eau de certains lacs-réservoirs de barrages, site d'exploitation de gaz naturel, exploitations minières ont été à l'origine de séismes induits, même dans des régions ayant une activité sismique modérée. Les premières observations concernant les barrages remontent à 1935 où la mise en eau du lac Mead provoqua des petits séismes fréquents de magnitude inférieure à 5 dans les régions du Nevada et de l'Arizona. Les séismes induits sont également observés au voisinage d'exploitations minières, avec l'effondrement de certaines cavités ou "coups de toit". C'est le cas notamment dans les Bouches-du-Rhône avec une sismicité faible mais qui inquiète la population à Gardanne. Des séismes induits sont également observés près des zones de prélèvements d'hydrocarbures. Le gisement de Lacq, dans les Pyrénées Atlantiques, est particulièrement observé, l'extraction du gaz naturel provoquant des nombreux séismes de faible magnitude (inférieure à 4) (réf : Wikipédia, l'encyclopédie libre).

Le cas le plus connu de séisme induit en France par une mise en eau est celui qui s'est produit le 25 avril 1963 au barrage de Monteynard, dont la magnitude était de 4.9. La cause en est vraisemblablement l'infiltration d'eau dans les micro-fractures des roches, ce qui entraîne une diminution de la résistance des roches à la rupture sous la pression d'eau supplémentaire. Ce phénomène peut se produire de même dans le cas d'injection d'eaux polluées (injections et pompages réguliers) dans des puits profonds, les Américains de l'U.S. Geological Survey l'ayant expérimenté en 1969 dans le Colorado. C'est la même chose pour ce qui s'est produit durant l'activité sismique du 30 Novembre 2007, dans la région Constantine.

VI.6. Acquisition des données

VI.6.1. Le réseau sismologique

Afin de suivre l'activité immédiate des évènements, un réseau sismologique temporaire constitué de 8 stations sismologiques portables courte période fût installée dans la région. L'implantation des stations dépendit :

- de la nature géologique des sites choisis (stations posées sur des sols durs),
- de l'environnement humain (stations posées loin de l'activité humaine, dans des sites bien protégés et sécurisés, évitant les routes, les zones industrielles, le ruissellement des eaux, les carrières en activités, etc...),

Le choix des sites s'avère important pour obtenir la meilleure qualité du signal et ainsi optimiser le rapport signal/bruit. Le sismomètre a été donc enfoui verticalement dans le sol, à l'abri du vent, de la pluie et de la curiosité. La Figure (VI.5) représente une station courte période utilisée dans notre étude.

Les caractéristiques des stations portables utilisées sont :

Capteur : Courte période à tri-composante

Fréquence d'échantillonnage : 100 Hz

Numériseur : geoderice DS-4A avec capacité de stockage allant jusqu'à 2 Go

Système de positionnement : GPS

Alimentation électrique : 12 v par un kit de panneau solaire

Interface de contrôle et d'acquisition : RS232 et Ethernet RJ45.

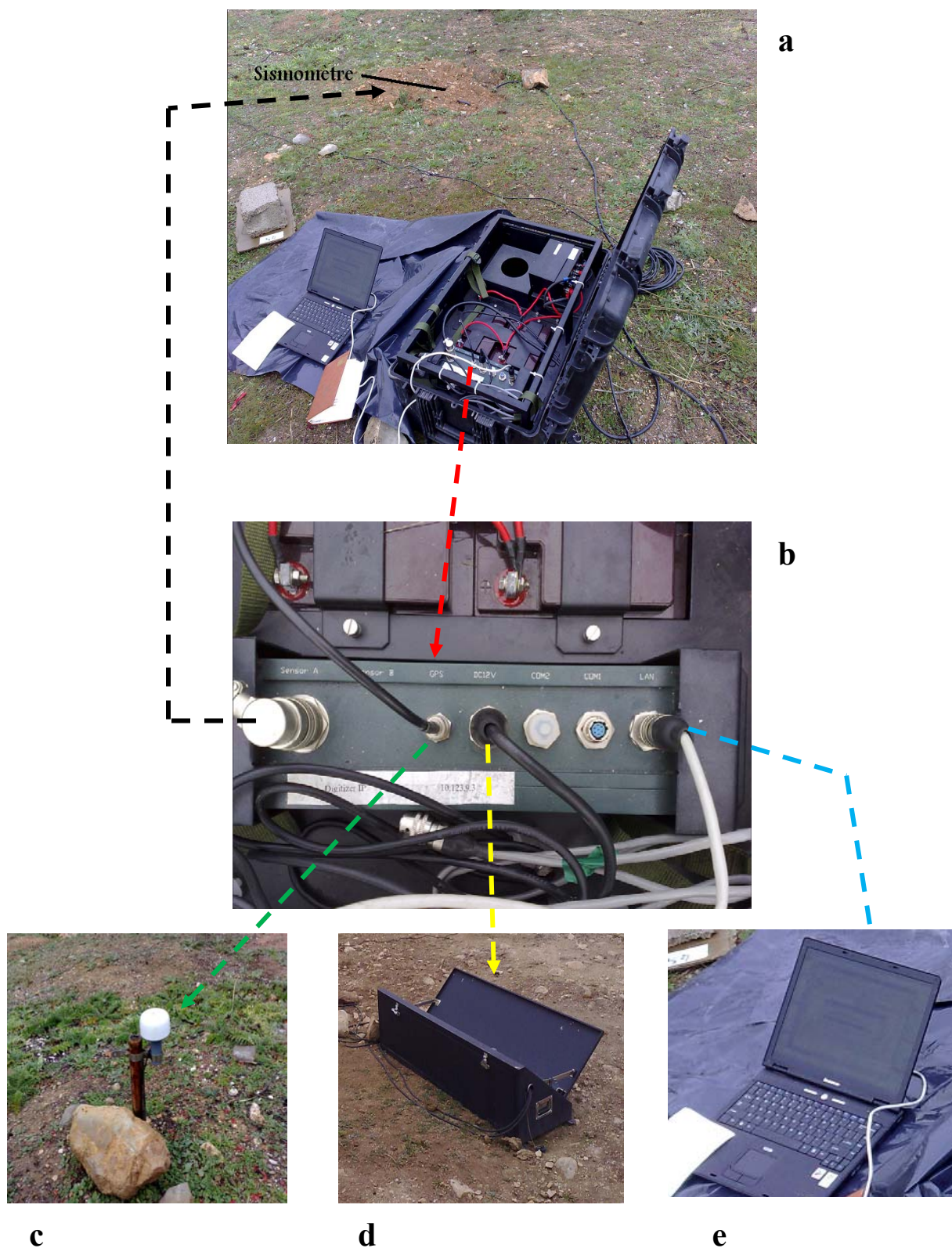


Figure VI.5 : Station sismologique de Oued Athemania (SP03)
 (a) station ; (b) système d'acquisition ; (c) GPS ; (d) panneau solaire ; (e) PC pour téléchargement des données.

En plus du réseau temporaire, 5 stations de réseau ADSN ont participé à cette étude (CSVV, CKTR, CKHR, ATAF et CABS). Ainsi en total, 13 stations ont été utilisées pour cette étude. Le tableau en présente les principales caractéristiques :

Code station	Lieu	Type	Lat (°N)	Log (°E)	Alt (m)	Date d'installation
ATAF	Tarf (M'Sila)	BB	35,8718	4,26570	1040	30/12/2006
CABS	Abbabsia (Guelma)	BB	36,8000	7,47330	345	28/11/2006
CKHR	Kef lahmer (Setif)	BB	36,0171	5,51130	1331	13/12/2006
CKTR	Kantarra (Biskra)	BB	35,2267	5,69020	646	16/12/2006
CSVB	Ain Smara	VBB	36,2716	6,49640	729	24/12/2006
SP01	Ouled Khlouf	SP	35,9983	6,10087	1158	10/12/2007
SP02	Ain Kerma	SP	36,4414	6,43055	770	11/12/2007
SP03	Oued Athmania	SP	36,2343	6,27852	830,780	03/12/2007
SP04	Sidi Khelifa	SP	36,3605	6,29640	1030	11/12/2007
SP05	Ahmed Rachedi	SP	36,3735	6,14199	503,170	04/12/2007
SP06	Ibn Ziad	SP	36,3737	6,46987	602,300	08/12/2007
SP07	Yahia Abderrahmane	SP	36,2297	6,00950	1122,610	04/12/2007
SP10	Grarem Gouga	SP	36,5254	6,2660	434,420	06/12/2007

Tableau VI.1 : Les stations sismologiques utilisées.

SP : Short Period (Courte période); BB : Broadband (large bande) ; VBB : Very Broadband (très large bande).

Remarque :

- Les stations SP sont les 8 stations du réseau temporaire, et les autres cinq stations (BB et VBB) appartiennent au réseau ADSN.

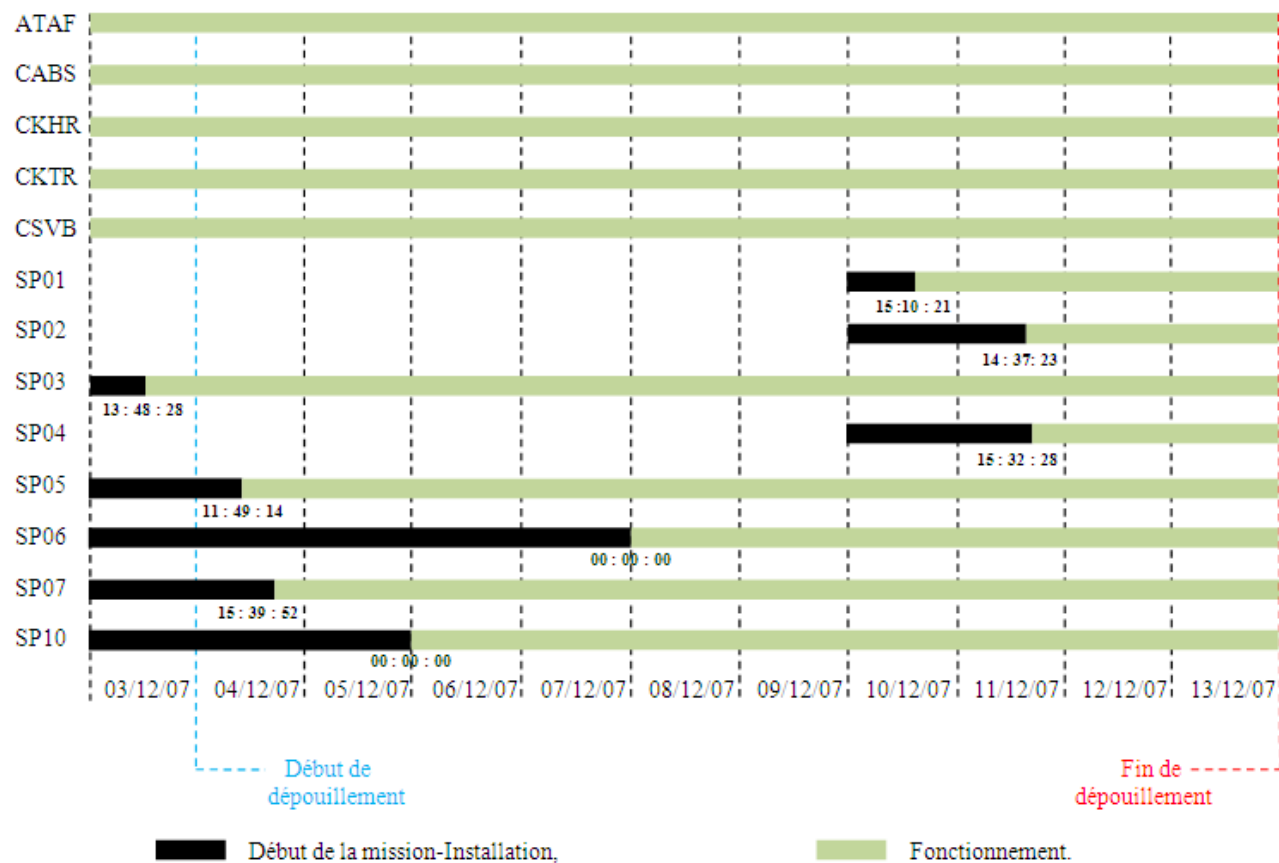
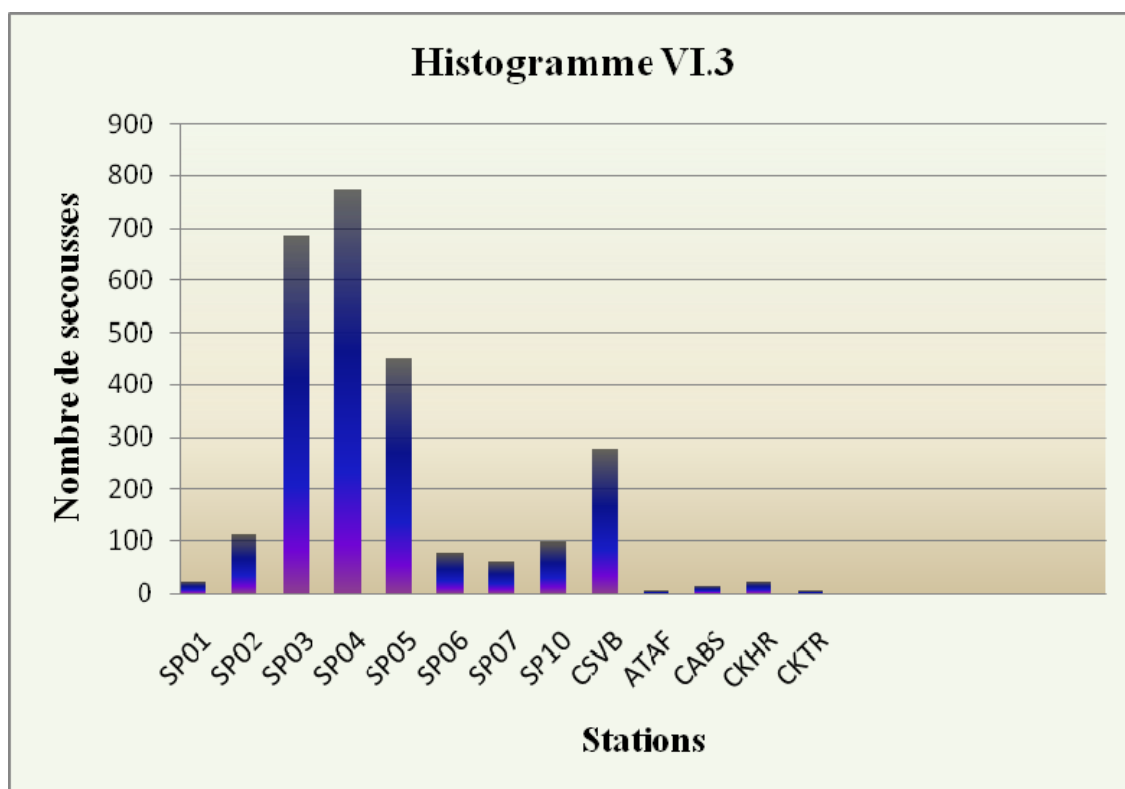


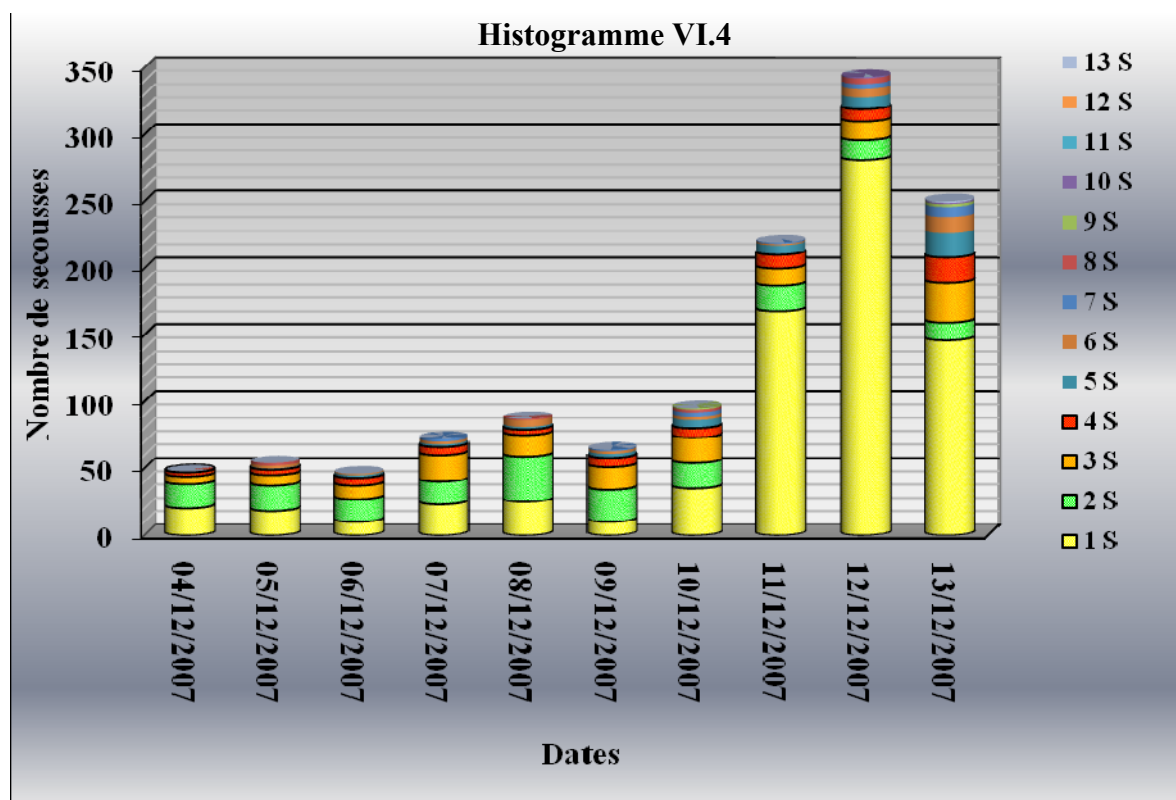
Figure VI.6 : Schéma explicative du fonctionnement des stations.

Les stations du réseau portable sont installées sur deux missions, la première du 03 au 08/12/2007, consacré à l'installation de 5 stations (SP03, 05, 06, 07 et 10), et la deuxième du 10 au 11/12/2007, pour l'installation de 3 stations (SP01, 02 et 04).

Après 10 jours de dépouillement, nous avons 1277 évènements (voir paragraphe VI.6.2.1). La répartition de ces évènements sur les stations se représente sur l'histogramme VI.3. On peut tirer :

- La station SP04 a enregistré la partie la plus grande d'évènements, soit 772 sur 3 jours d'enregistrement (~60% du nombre total d'évènements), autrement dit SP04 a raté 5 évènements seulement, elle est située proche de la zone épiscopentrale.
- Les stations SP03, SP05 et CSVB ont enregistré sur 10 jours respectivement 685 évènements (~54%), 450 évènements (~35%) et 277 évènements (~22%).
- Pour la station SP06 et malgré la courte distance épiscopentrale, elle n'a enregistré que 77 évènements (6%). Elle est trop bruitée (pas loin d'un château d'eau) d'où le signal est illisible. Finalement, cette station est désinstallée le 26/12/07.
- Pour la station SP07 et malgré la longue durée d'enregistrement (10 jours) elle n'a enregistré que 62 évènements (~5%). Elle est relativement loin au zone épiscopentrale, la prouve elle est enregistrée que les évènements grands (enregistrés par 3 stations ou plus).
- SP01 est enregistrée que 23 évènements (~2%), c'est la valeur la plus petite pour les autres stations du réseau portable, elle est la plus loin au zone épiscopentrale.
- Pour les quatre stations du réseau ADSN, ils n'ont enregistré que les évènements relativement importants, car ils ont situées sur des grandes offsets.





S : Station

L'histogramme précédent représente le nombre d'évènements en fonction des jours d'activités en représentant le nombre des stations qui ont enregistrées ces évènements. D'après l'histogramme, la majorité d'évènements sont enregistrées par une seule station, soit 736 évènements sur 10 jours d'enregistrement, dont 579 enregistrés par SP04 (proche à la zone épacentrale). Un seul évènement enregistré par toutes les stations le 13/12/2007. Ce qui implique un nombre important des évènements de faible magnitude. On peut conclure que cette activité est locale sur une petite zone.

Station	Ml minimal	Ml maximal
SP01	0.1	2.3
SP02	-0.2	2.3
SP03	-0.2	2.7
SP04	-0.2	2.3
SP05	-0.2	2.7
SP06	0.3	2.6
SP07	0.5	2.7
SP10	0.5	2.6
CSVB	-0.1	2.7
ATAF	2.0	2.7
CABS	1.5	2.7
CKHR	1.3	2.7
CKTR	0.7	2.7

Tableau VI.2 : Les Ml min et max enregistrés pour chaque stations

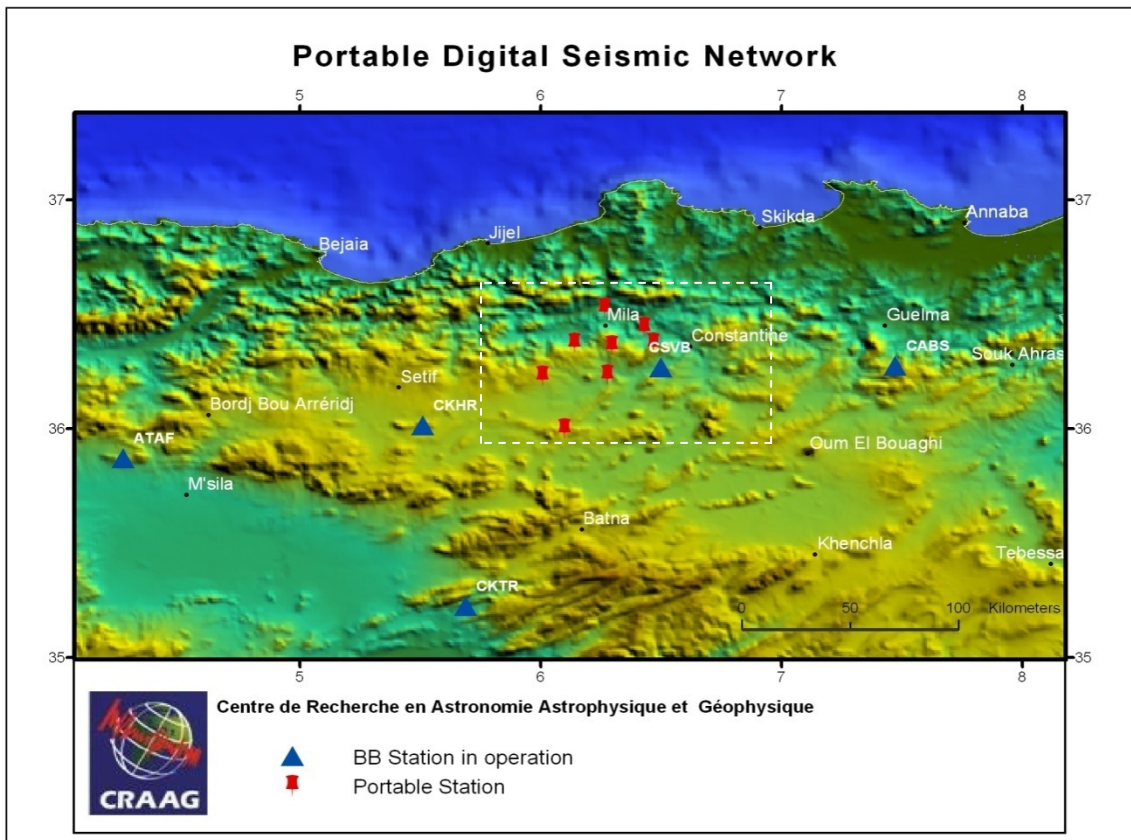


Figure VI.7 : Carte de disposition du réseau utilisé

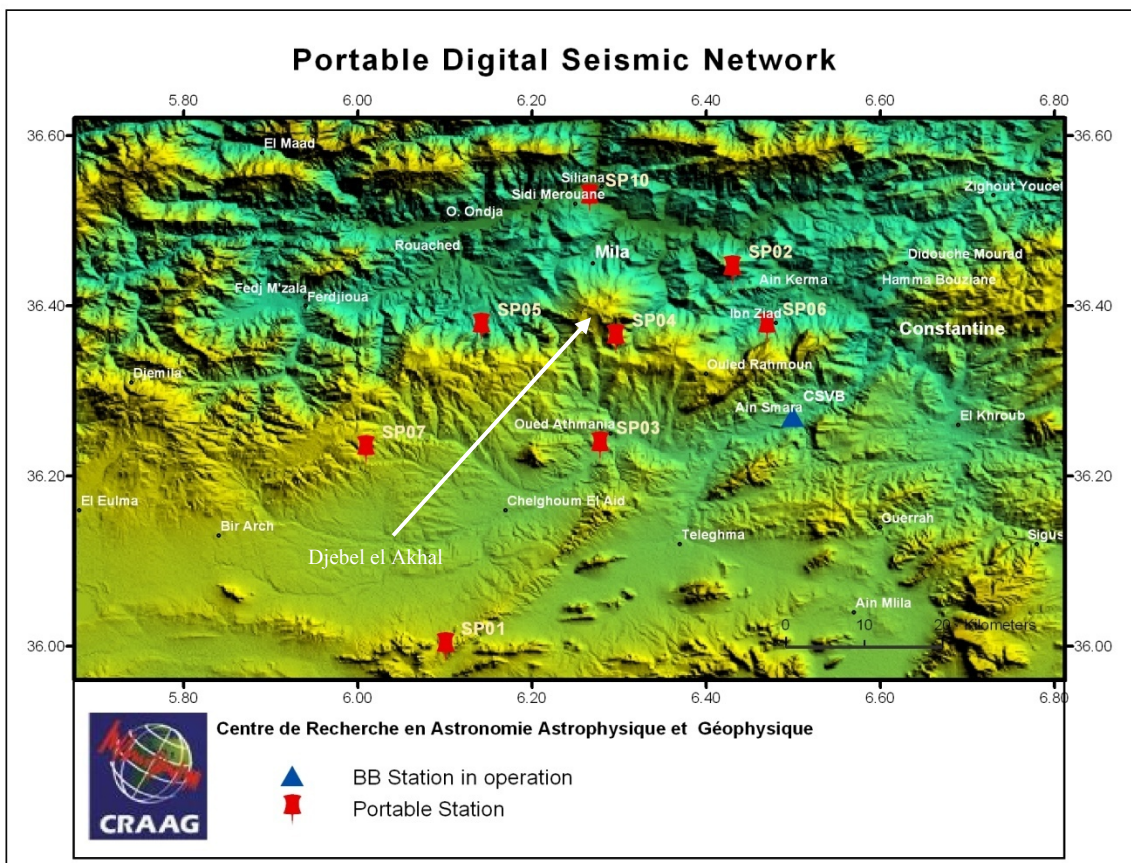


Figure VI.8 : Zoom de la figure précédente

Le réseau sismologique figure (VI.8) a été installé sur une superficie de 60 par 60 km avec une maille d'environ 20 km. Les distances épacentrales étaient en général inférieures à 20 km (sauf SP01 et SP07), afin d'avoir des stations le plus proche possible des foyers sismiques.

Cette disposition permettait donc d'avoir une précision acceptable sur la détermination des hypocentres et leur mécanisme au foyer.

VI.6.2. Détermination des foyers

VI.6.2.1 Dépouillement

Le dépouillement des données n'a été effectué que pour la période allant du 04/12/2007 au 13/12/2007 en raison du nombre important d'événements. Ainsi 10 jours d'enregistrement par station (voir figure VI.6) ont été exploités. D'où 1277 événements ont été analysés.

Pour le dépouillement des signaux, nous avons utilisé le logiciel « msdp », ce dernier se base sur les lois classiques des vitesses par l'intégration du table de Joliate propre de l'Algérie (*Référence de la Table...*).

Nous avons pointé les temps d'arrivée des ondes P sur la composante verticale et les ondes S sur les composantes horizontales et au même temps, nous avons attribué à chaque événement la polarité de la première onde arrivée (La lecture de la polarité se fait sur la composante verticale). Une compression (C) est attribuée à un mouvement vers le haut et une dilatation (D) à un sens de mouvement vers le bas, à chaque phase est attribué un poids allant de 0 (très bonne lecture) à 4 (la phase n'est pas prise en compte). En dernier lieu, on détermine l'amplitude maximale du signal pour calculer la magnitude locale M_L (voir la figure suivante).

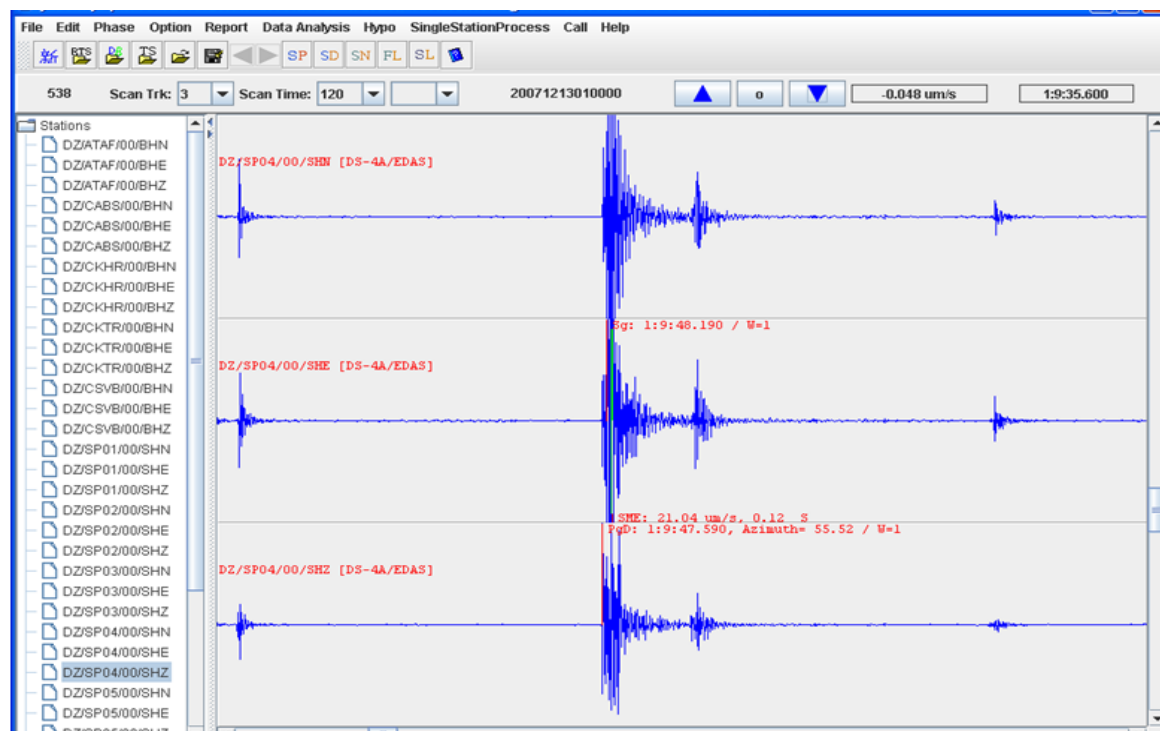


Figure VI.9 : Exemple de dépouillement d'un enregistrement en une station sismologique (SP04) par le logiciel msdp.

$M_L = \log A_{\max} - \log A_0 + c \log \Delta$ avec A_{\max} : Amplitude maximal en mm ; A_0 : Amplitude à 100km ; C : Constante de calibration, Δ : distance.

On obtient à la fin un fichier de sortie représenté dans la figure suivante :

```

Locating Result of Regional Earthquake:
*****
Origin Time   : 2007-12-13      7: 6:34.73
Epicentre    : 36°22.21'      6°19.39'
Magnitude    : 2.3(ML)        0.0(Ms) 0.0(mb)
Focal Depth  : 4.6            Residual : 0.423
Epicentre Accuracy: N/A(km)   Depth Accuracy: N/A
No.   Sname  Phase  Date       Time      t-res  delta  ML    Ms    mb
0     ATAF   Pg     2007-12-13  7: 7:7.56  -0.432 192.91 2.32
0     CABS   PgD    2007-12-13  7: 6:54.03 1.443 103.56 2.50
0     CKHR   PgU    2007-12-13  7: 7:5.58   0.028
0     CKHR   Sg     2007-12-13  7: 6:50.23 1.231 82.75 1.77
0     CKTR   Sg     2007-12-13  7: 6:59.42 0.062
0     CKTR   Pg     2007-12-13  7: 7:0.52 1.761 139.36 1.84
0     CSVB   PgD    2007-12-13  7: 6:36.85 -1.158 19.00 1.91
0     CSVB   Sg     2007-12-13  7: 6:39.85 -0.537
0     SP01   PgU    2007-12-13  7: 6:42.41 -0.172 45.53 2.40
0     SP01   Sg     2007-12-13  7: 6:49.10 0.819
0     SP02   PgU    2007-12-13  7: 6:36.20 -0.839 13.38 2.56
0     SP02   Sg     2007-12-13  7: 6:38.78 0.066
0     SP03   PgU    2007-12-13  7: 6:36.59 -0.802 15.43 2.18
0     SP03   Sg     2007-12-13  7: 6:39.39 0.066
0     SP04   PgU    2007-12-13  7: 6:34.07 -1.114 2.62 3.05
0     SP04   Sg     2007-12-13  7: 6:34.75 -0.762
0     SP05   PgU    2007-12-13  7: 6:36.83 -0.733 16.42 2.38
0     SP05   Sg     2007-12-13  7: 6:39.78 0.162
0     SP06   PgU    2007-12-13  7: 6:38.00 0.926 13.58 2.81
0     SP06   Sg     2007-12-13  7: 6:39.08 0.306
0     SP07   PgD    2007-12-13  7: 6:39.88 -0.322 31.72 2.09
0     SP07   Sg     2007-12-13  7: 6:45.09 0.917
0     SP10   PgU    2007-12-13  7: 6:37.84 0.218 16.76 2.03
0     SP10   Sg     2007-12-13  7: 6:39.75 0.029
*****

```

Figure VI.10 : fichier de sortie du logiciel msdp

t-res : l'erreur sur les temps d'arrivés; Pg : l'onde P directe ; Sg : l'onde S directe

VI.6.2.2 Tri des données

Afin d'obtenir les événements les plus représentatifs et les mieux localisés, nous avons pris les événements enregistrés par 3 stations ou plus. Finalement, ce sont 346 événements.

VI.6.2.3 Traitement des données

Les 346 événements ont été traités en utilisant le programme Hypo71 (Lee & Lahr, 1975). Les coordonnées de l'épicentre, la profondeur du foyer et le temps origine du séisme sont déterminés par ce programme en associant les calculs d'erreurs qui sont:

- L'erreur quadratique moyenne sur le temps d'arrivé (RMS, en seconde).
- L'erreur standard sur la position de l'épicentre (ERH, en km).
- L'erreur standard sur la profondeur du foyer (ERZ, en km).

Le programme calcule aussi, pour chaque séisme, la non-couverture azimutale (GAP, en degré). Pour une utilisation correcte de ce programme, il fallait choisir un modèle de vitesse correspondant aux considérations géologiques de la région.

✓ Choix du modèle de structure (modèle de vitesse)

Nous avons testé de nombreux modèles de vitesse sur 15 événements. Ces événements ont été choisis en se basant sur la qualité du signal (lecture des phases P et S très précise) et sur le nombre des stations couvrant ces événements. Les modèles que nous avons testés ont un nombre de couches qui varie entre 1 et 5 couches et des vitesses (V_p) allant de 3 à 8 km/s. Après test, nous avons opté

pour un modèle de 4 couches avec des vitesses variant entre 4,5 et 8 km/s et des profondeurs allant de 0 à 30km (figure VI.11), avec la valeur du rapport V_p/V_s fixée, est égale 1.70 (Table de Joliate).

Vitesse d'onde P (km/s)	Profondeur (km)
4.5	0
5.5	5
6.5	8
8	30

Figure VI.11 : Modèle de vitesse choisi

Pour l'exécution du programme, nous devons disposer trois fichiers :

TAFIP 0 071213070707.56	
ABSIPDO 071213070654.03	65.58 S 1
KHRIPUO 071213070650.23	59.42 S 1
KTRIP 0 071213070700.52	
SVBIPDO 071213070636.85	39.85 S 1
PO1IPUO 071213070642.41	49.10 S 1
PO2IPUO 071213070636.20	38.78 S 1
PO3IPUO 071213070636.59	39.39 S 1
PO4IPUO 071213070634.07	34.75 S 1
PO5IPUO 071213070636.83	39.78 S 1
PO6IPUO 071213070638.00	39.08 S 1
PO7IPDO 071213070639.88	45.09 S 1
P10IPUO 071213070637.84	39.75 S 1

Figure VI.12 : Fichier de temps d'arrivée PHASHYP (pour un seul évènement).

CNTR 36 26.47N 6 25.83E	
TAF 35 52.30N 4 15.94E1040	1
ABS 36 48.00N 7 28.39E 345	1
KHR 36 01.02N 5 30.67E1331	1
KTR 35 13.60N 5 41.41E 646	1
SVB 36 16.29N 6 29.78E 729	1
PO1 35 59.89N 6 06.05E1158	1
PO2 36 26.47N 6 25.83E 770	1
PO3 36 14.05N 6 16.71E 831	1
PO4 36 21.63N 6 17.78E1030	1
PO5 36 22.41N 6 08.51E 503	1
PO6 36 22.42N 6 28.19E 602	1
PO7 36 13.78N 6 00.57E1123	1
P10 36 31.52N 6 15.96E 434	1

Figure VI.13 : Fichier d'emplacement des stations sismologiques.

1 ère ligne : station centrale (Par la quelle le logiciel commence le calcul) avec coordonnées en (degré et min).

2 ème ligne : Station du réseau sismologique local avec coordonnées (Lat, Long en degré min, et Alti en mètre).

4.5 00.0
5.5 05.0
6.5 08.0
8.0 30.0

Figure VI.14 : Le modèle de vitesse utilisé.
La première colonne correspond à des vitesses.
La deuxième colonne correspond aux profondeurs.

Après le choix du modèle de vitesse, et la préparation des fichiers, le programme est exécuté, on obtient un fichier résultat « hypprt » (figure suivante).

```

-----
YR MO DA  ORIGIN  LAT N  LON W  DEPTH  RMS  ERH  ERZ  GAP  XMAG  FMAG
7-12-13  7 6 33.31 36 21.69  6E19.49  1.69  .37  .51  .79  20

RMSWT DMIN ITR NFM NWR NWS REMK
.43  2.5  6  19  19  11

STA DIST AZM  AN P/S W  SEC+CCOR (TOBS -TCAL -DLY =RES) WT  XMG FMG R INFO
PO4  2.5 269 123 IPU -25.92 .00 .77 .80 .00 -.03 1.26 .229
      S 1-25.24 .00 1.45 1.36 .00 .09 .94 .302
PO2 12.9 46 97 IPU -23.79 .00 2.90 2.92 .00 -.02 1.26 .228
      S 1-21.21 .00 5.48 4.96 .00 .52 .94 .254
PO6 13.1 84 97 IPU -21.99 .00 4.70 2.94 .00 1.76 .00 .000
      S 1-20.91 .00 5.78 5.00 .00 .78 .84 .194
PO3 14.8 197 96 IPU -23.40 .00 3.29 3.32 .00 -.03 1.26 .205
      S 1-20.60 .00 6.09 5.64 .00 .45 .94 .265
PO5 16.5 275 95 IPU -23.16 .00 3.53 3.68 .00 -.15 1.26 .153
      S 1-20.21 .00 6.48 6.26 .00 .22 .94 .185
SVB 18.3 123 95 IPD -23.14 .00 3.55 4.09 .00 -.54 1.26 .233
      S 1-20.14 .00 6.55 6.95 .00 -.40 .94 .276
P10 19.0 344 95 IPU -22.15 .00 4.54 4.23 .00 .31 1.26 .228
      S 1-20.24 .00 6.45 7.19 .00 -.74 .89 .246
PO7 31.9 243 43 IPD -20.11 .00 6.58 6.99 .00 -.41 1.26 .200
      S 1-14.90 .00 11.79 11.88 .00 -.09 .94 .265
PO1 45.1 207 43 IPU -17.58 .00 9.11 9.03 .00 .08 1.26 .195
      S 1-10.89 .00 15.80 15.35 .00 .45 .94 .254
KHR 82.5 243 43 IPU -9.76 .00 16.93 14.81 .00 2.12 .00 .000
      S 1 -.57 .00 26.12 25.18 .00 .94 .39 .046
ABS113.5 64 43 IPD -5.96 .00 20.73 19.43 .00 1.30 .00 .000
      S 1 5.58 .00 32.27 33.03 .00 -.76 .25 .033
KTR138.6 205 43 IP .52 .00 27.21 23.33 .00 3.88 .00 .000
TAF192.8 254 34 IP 7.56 .00 34.25 30.55 .00 3.70 .00 .000

```

Figure VI.15 : Exemple de fichier sortie hypo71

Ce fichier fournit : La date (YR, MO, DA), l'heure origine, les coordonnées (degré et minute), RMS (S), ERH et ERZ (km), la non-couverture azimutale GAP (degré), la distance épacentrale minimale (DMIN), le nombre d'itérations pour atteindre la convergence (ITR) et le nombre de phases P utilisées dans les calculs (NWS).

✓ Tri des données traitées

Après le traitement des 346 événements par l'algorithme Hypo71. Nous avons effectué un tri des résultats en se basant sur les paramètres suivants :

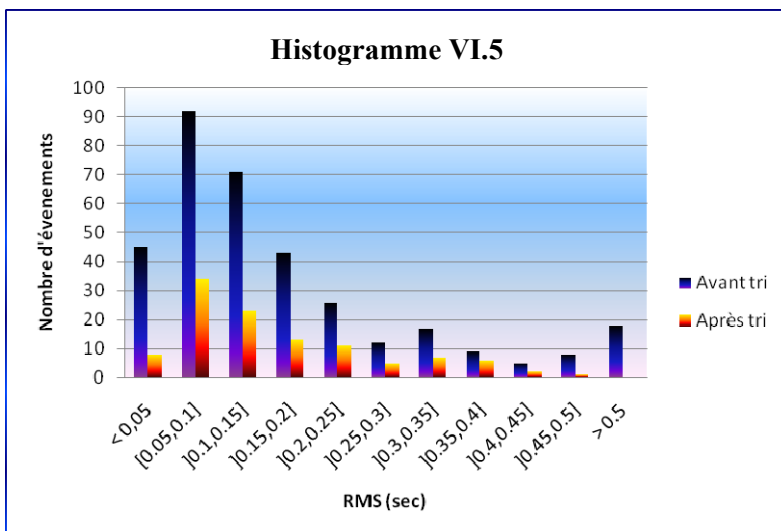
- Erreur quadratique moyenne $RMS \leq 0,5$.
- Erreur standard sur la position de l'épicentre $ERH \leq 2,00\text{km}$.
- Erreur standard sur la position du foyer $ERZ \leq 3,00\text{km}$.

Nous avons pu obtenir en finalité que 110 événements répondant à ces critères.

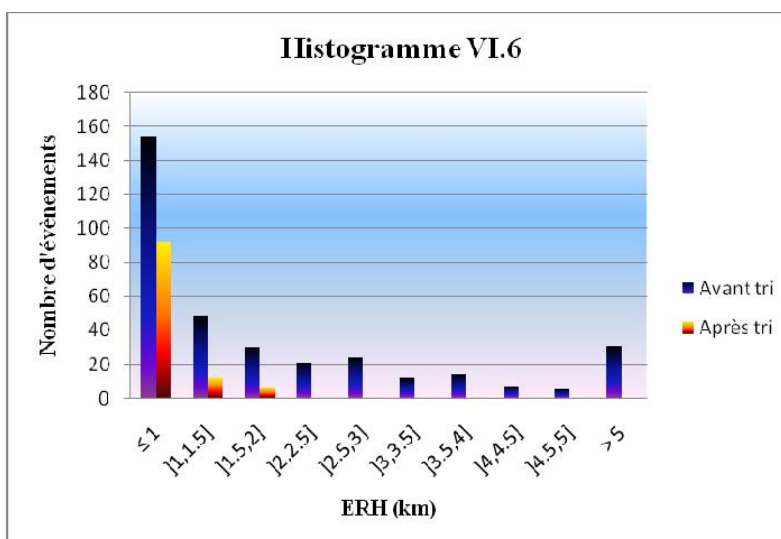
VI.6.2.4. Etude statistique des évènements

Dans ce paragraphe nous avons fait une étude statistique sur notre travail. Les trois premiers histogrammes montrent les erreurs du calcul, essentiellement dus aux lectures des phases et au choix du modèle de vitesse ou non-couverture azimutale de certains évènements.

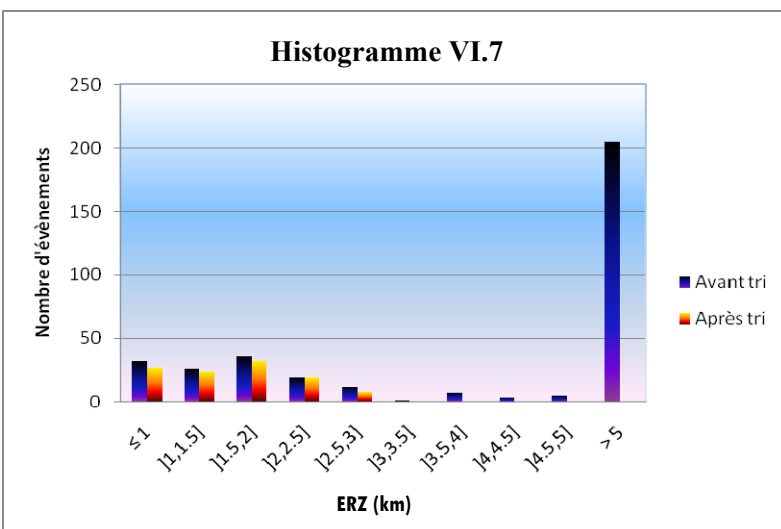
La plus part d'évènements ayant un RMS ≤ 0.5 sec (Tableau VI.3).



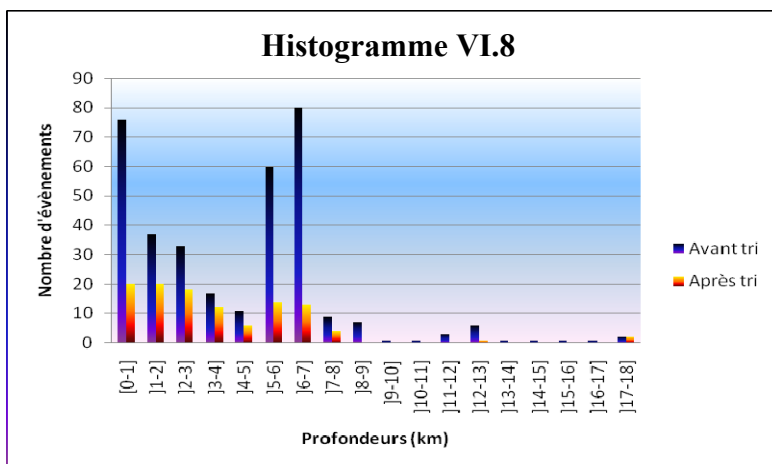
La plus part d'évènements ayant un ERH ≤ 1 km (Tableau VI.3).



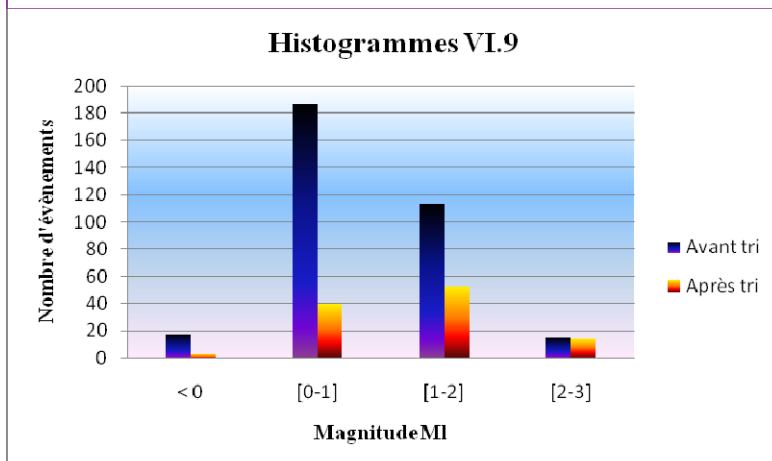
L'importance de cette erreur est due essentiellement à la non-couverture de la zone épiscopentrale (pour la localisation par trois stations) et aussi la faible densité du réseau.



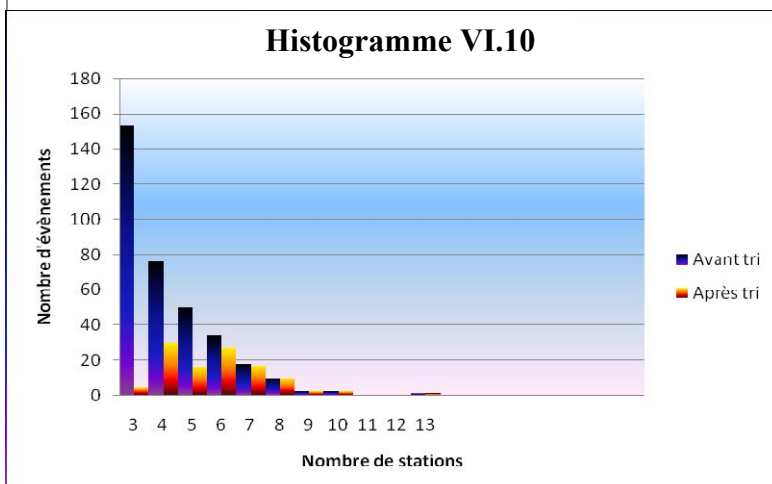
Presque tous les évènements sont produits avec des profondeurs inférieures à 7 km. Ce qui implique une activité superficielle.



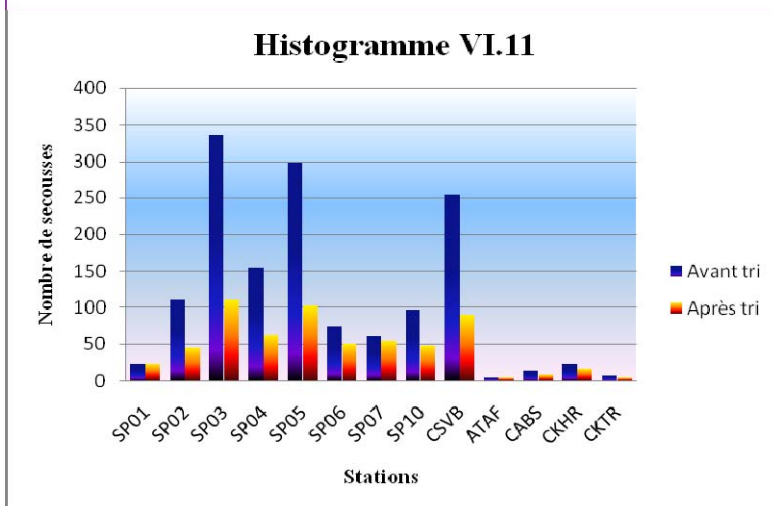
Cette activité est caractérisée par des faibles magnitudes, même des magnitudes négatives dues aux petits évènements produisent dans une petite zone. C'est une activité locale.



Dans cet histogramme, on remarque une grande différence entre les évènements enregistrés par trois stations avant et après le tri. Cette différence due aux erreurs de la localisation, surtout ERZ (voir histogramme VI.7).



La partie la plus grande d'évènements est enregistrée par trois stations (histogramme VI.10). Les stations participées dans l'enregistrement sont : SP03, SP05 et CSVB (entre 04/ et 10/12/07) et SP03, SP04 et SP05 (entre 11 et 13/12/07) (Tableau VI.3).



Histogramme	Avant le tri (346)	Après le tri (110)
VI.5 : Distribution des RMS par tranche de 0.05 seconde.	<ul style="list-style-type: none"> plus de 95% (328) ont un RMS ≤ 0.5 sec, plus de 60% (208) ont un RMS ≤ 0.15 sec et, plus de 40% (137) ont un RMS ≤ 0.1 sec. 	<ul style="list-style-type: none"> Tous les évènements un RMS ≤ 0.5 sec, plus de 38 % (42) d'entre eux ont un RMS ≤ 0.1.
VI.6 : Distribution des ERH par tranche de 500 m.	<ul style="list-style-type: none"> plus de 67% (232) ont un ERH ≤ 2 km, plus de 44% (154) ont un ERH ≤ 1km. 	<ul style="list-style-type: none"> Tous les évènements un ERH ≤ 2 km, plus de 83% (92) ont un ERH ≤ 1km.
VI.7 : Distribution des ERZ par tranche de 500 m.	<ul style="list-style-type: none"> plus de 36% (125) ont un ERZ ≤ 3 km, plus de 59% (205) ont un ERZ > 5 km. 	<ul style="list-style-type: none"> Tous les évènements ont un ERZ ≤ 3km.
VI.8 : Distribution des profondeurs en fonction du nombre d'évènements	<ul style="list-style-type: none"> Du 04 au 10/12/2007, plus de 74% d'évènements entre 5 et 7 km (~6km), Du 11 au 13/12/2007, plus de 40% d'évènements entre 0 et 1 km. 	<ul style="list-style-type: none"> Plus de 97% (107) ont une profondeur ≤ 7 km. ~53% des évènements ont une profondeur ≤ 3 km.
VI.9 : Distribution des magnitudes en fonction du nombre d'évènements	<ul style="list-style-type: none"> Plus de 5% de magnitude $Ml < 0$, Plus de 54% de $0 \leq Ml < 1$, Plus de 33% de $1 \leq Ml < 2$, Plus de 04% de $2 \leq Ml < 3$, 	<ul style="list-style-type: none"> Plus de 3% de magnitude $Ml < 0$, Plus de 36% de $0 \leq Ml < 1$, Plus de 48% de $1 \leq Ml < 2$, Plus de 13% de $2 \leq Ml < 3$,
VI.10 : Distribution en fonction du nombre de stations	<ul style="list-style-type: none"> Plus de 44% d'évènements enregistrés par 3 stations, et cette portion décroît en fonction du nombre de stations ajoutées. 	<ul style="list-style-type: none"> Plus de la moitié d'évènements sont enregistrés par 4 et 6 stations de 28% et 25% respectivement, On remarque qu'à partir de 7 stations, le nombre d'évènements est le même avant et après le tri.
VI.11 : Distribution en fonction de la station	<ul style="list-style-type: none"> SP03 $\approx 97\%$ total d'évènements SP05 $\approx 86\%$; CSV B $\approx 73\%$; SP04 $\approx 45\%$. 	<ul style="list-style-type: none"> Ces stations enregistrée au moyenne $\sim 33\%$ de celles avant le tri.

Tableau VI.3: Statistiques.

A partir de cette étude statistique, nous pouvons conclure ce qui suit :

- ✓ Cette activité est locale, se montre sur le nombre important des évènements de faible magnitude (histogramme VI.9) enregistrés par un petit nombre des stations proches aux épïcètres (histogrammes VI.4, VI.10 et VI.11).
- ✓ Cette activité est superficielle, s'apparaît sur la majorité des évènements ayant des profondeurs ≤ 7 km (histogramme VI.8).
- ✓ Comme l'activité est locale, la plus part des évènements sont enregistrés par trois stations (histogramme VI.10 et VI.11) situent Sud-Ouest de la zone épïcétrale (figure VI.8), donc nous avons une non-couverture de la zone épïcétrale du coté Nord-Est. Cette situation conduite à une augmentation dans ERZ (histogramme VI.7). Ainsi, nous pouvons expliquer la grande différence entre les évènements enregistrés par trois stations avant et après le tri (histo VI.10).
- ✓ Les évènements triés consistent $\sim 32\%$ de celles avant le tri. C'est-à-dire, parmi 346, nous avons éliminé 236 évènements par les conditions des erreurs (RMS $\leq 0,5$, ERH $\leq 2,00$ km et ERZ $\leq 3,00$ km).

V.7. Etude des événements sismiques

L'étude des événements nécessite une représentation dans l'espace et dans le temps afin d'estimer la direction du faille et ses dimensions. Dans le temps, notre étude est limitée sur l'étude statistique (histogrammes VI.1, VI.2 et VI.4), à cause de la courte période de dépouillement (10 jours).

VI.7.1. Distributions spatial des évènements

Les cartes ci-dessous ont été réalisées avec le logiciel GMT.

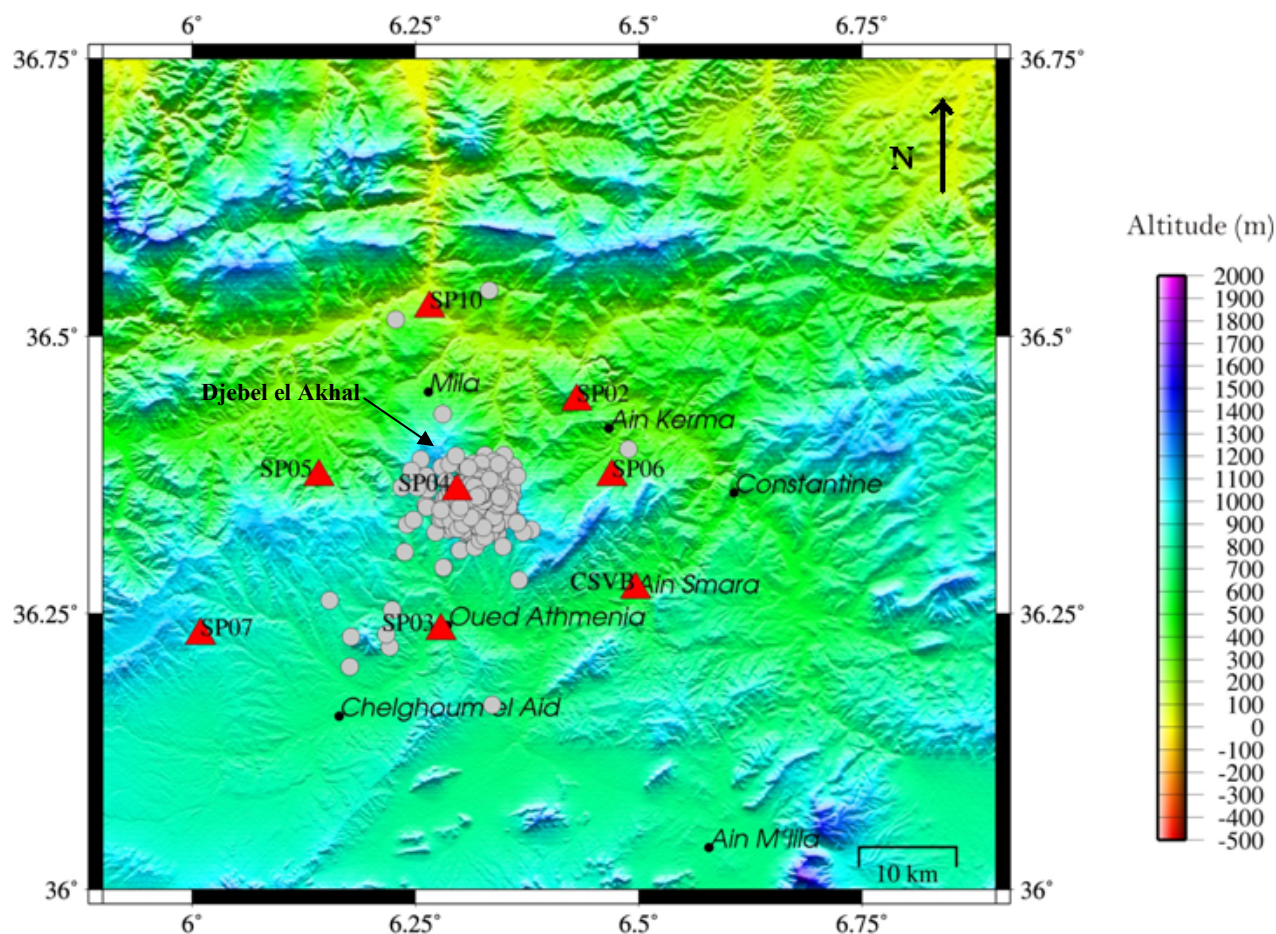


Figure VI.16 : Distribution spatiale des évènements avant le tri

La figure ci-dessus montre la distribution des événements avant le tri (346 événements), où la plus part des événements sont concentrés dans un diamètre de 7 km près de Djebel el Akhal. On peut constater que le réseau portable a une bonne couverture azimutale, entourant l'activité, mais seulement pour les événements relativement grands (enregistrés par toutes les stations).

La station SP04 étant localisée près de la zone épiscopentrale, elle aura été celle ayant enregistré le maximum de secousses (histogramme VI.3).

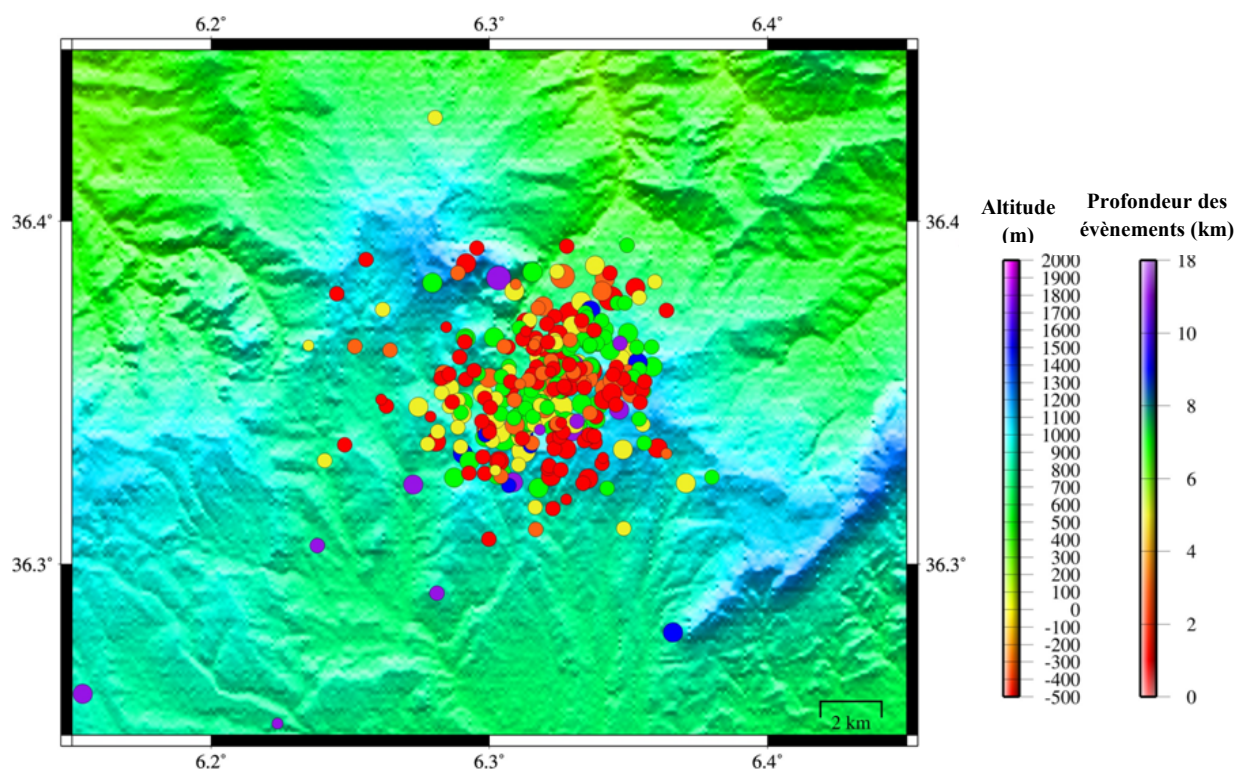


Figure VI.17 : Distribution des hypocentres

La figure VI.17 montre la distribution des évènements en fonction de la profondeur. On remarque que les évènements se sont produits entre 1 et 18 km, et la plus part se sont produits avec des profondeurs inférieures à 7 km (histogramme VI.8 ; tableau VI2). C'est une crise superficielle.

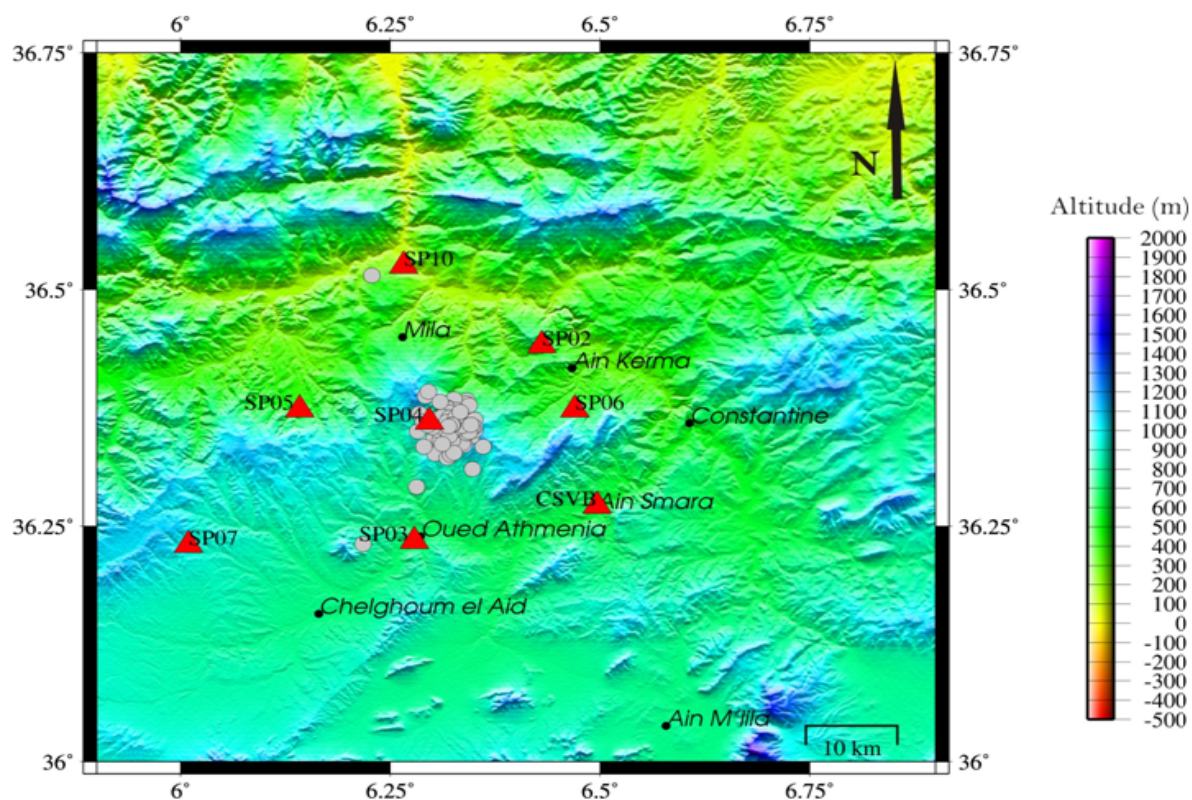


Figure VI.18 : Distribution des évènements triés.

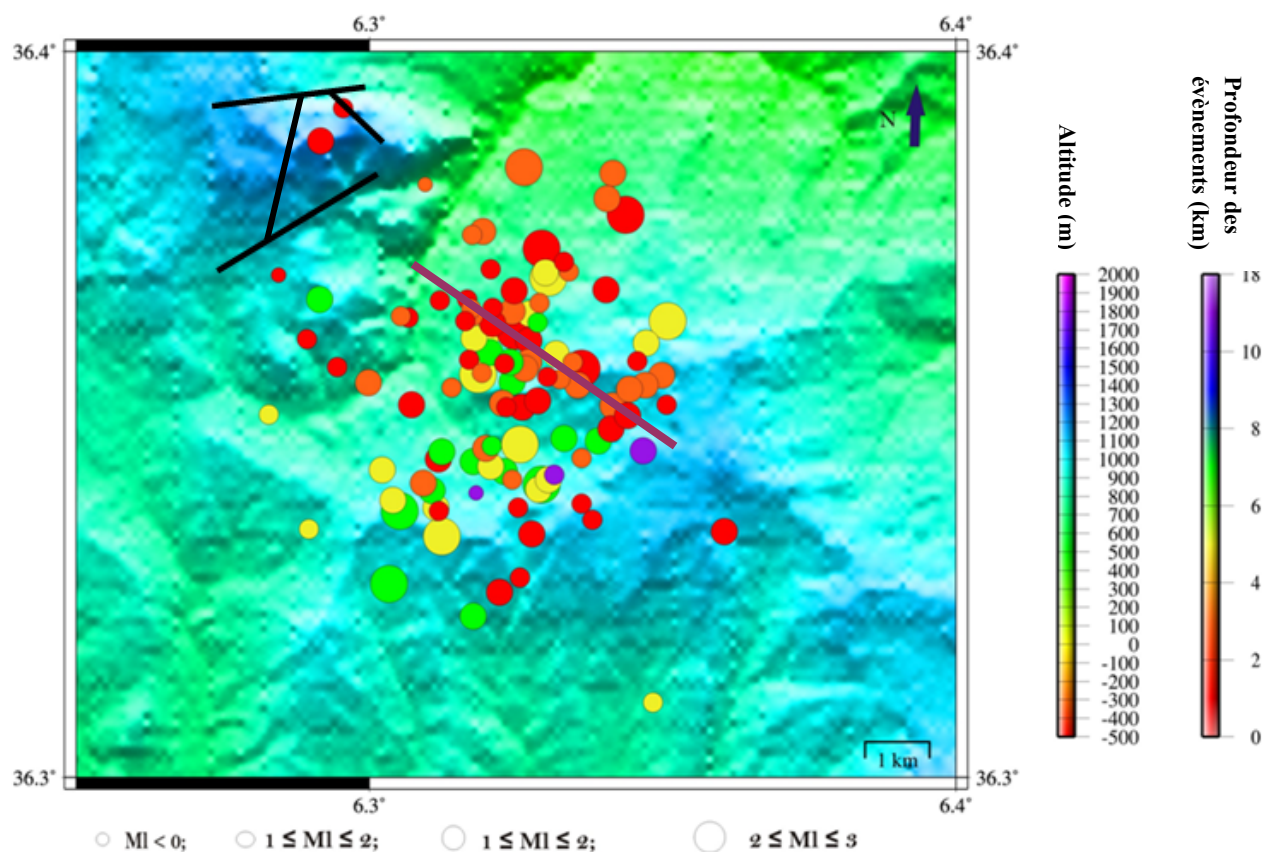


Figure VI.19 : Zoom sur les événements triés

- Les failles illustrées dans la carte géologique (figure VI.4).
- Faille probable d'azimut $\sim 120^\circ$.

D'après cette carte on constate que la distribution des événements en profondeur est aléatoire et ne suit pas un ordre organisé du rouge vers le violet d'où une difficulté pour l'interpréter. Par conséquent cette situation accepte plusieurs propositions pour identifier le plan du faille principale.

L'interprétation peut montrer plusieurs segments de petites failles secondaires épousées une faille principale qui ont jouées en même temps. C'est la raison qu'on a procédé l'analyse suivante :

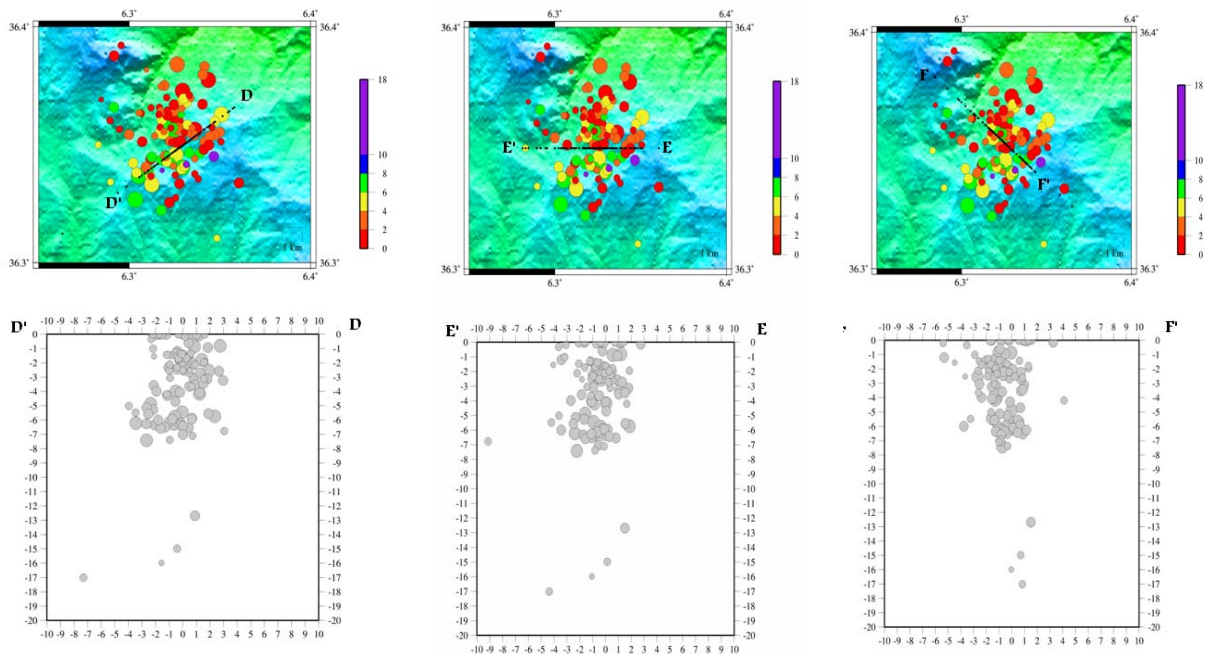
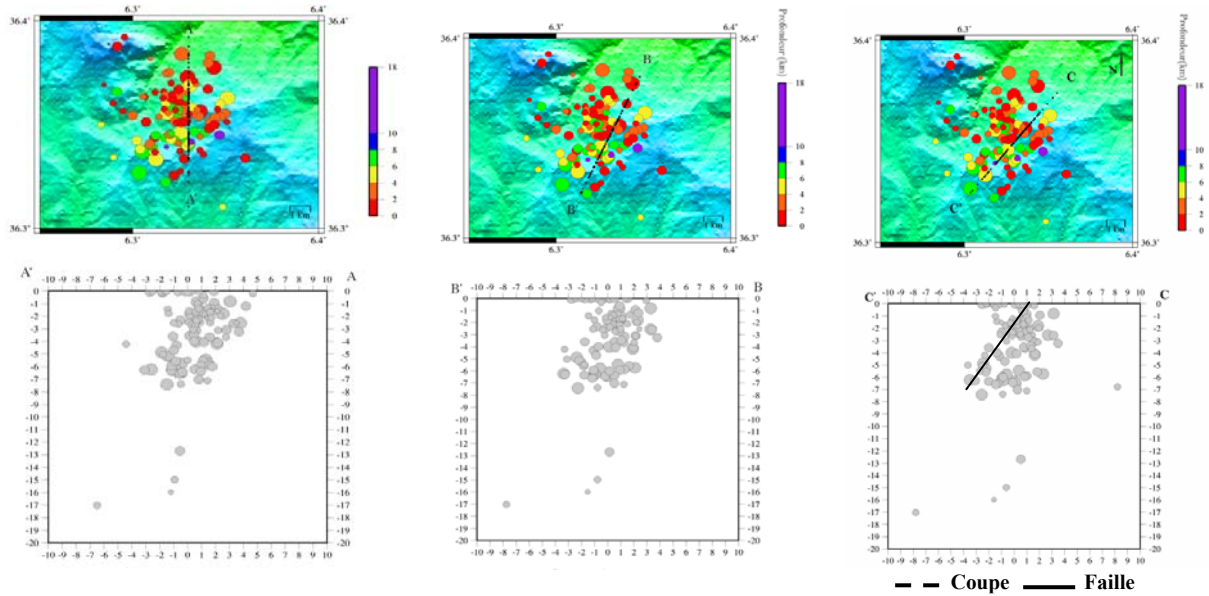
- Négligence des événements ayant des profondeurs supérieur à 3 km, car 40% d'événements les mieux localisés (enregistrés entre 11 et 13/12/2007 où toutes les stations fonctionnes) sont produits entre 0 et 1 km de profondeur, Ainsi que $\sim 53\%$ d'événements triés ayant des profondeurs ≤ 3 km (voir l'histogramme VI.8 et le tableau VI.3). L'alignement des points rouges les plus remarquables sont suivant la direction $\sim N120^\circ$.
- Comparaison des solutions focales (figure VI.28) a montré que les trois mécanismes 1, 2 et 6 sont les mieux comparables et contient un nombre de polarités le plus élevé en comparant aux autres mécanismes (la solution 1 possède 11 polarités, 2 possède 9 polarités et 6 possède 8 polarités). Ces solutions montre une faille d'azimut moyenne $\sim 120^\circ$ (Tableau VI.4).

Cependant à travers cette analyse, une faille de direction prépondérante N120 aurait joué entraînant le déplacement en cascade des autres petites failles.

La relocalisation des événements en utilisant les données de tous les jours d'enregistrements peut améliorer ce résultat.

VI.7.2. Distribution des foyers en profondeur

La distribution en profondeur des hypocentres est nécessaire pour l'estimation du pendage et de la dimension du plan de faille qui a généré le choc principal. A cet effet, nous avons établi six coupes de différents azimuts. Le choix de l'emplacement des coupes est basé sur la répartition horizontale.



Les figures VI.19 et VI.22 montrent un plan de faille caractérisé par :

- Azimut : 120° ;
- Pendage : 57° ;
- Plongement : sud-ouest.

VI.7.3. Mécanismes au foyer

Un mécanisme au foyer permet de déterminer le type de faille qui est à l'origine du séisme, l'orientation de cette faille et la direction de glissement des deux blocs. Cela permet donc de savoir la nature convergente, divergente ou coulissante du mouvement associé.

Nous avons utilisé les polarités des ondes P repérées sur la composante verticale de chaque station. On a choisi 10 solutions (1 seul évènement avec 11 polarités et un autre avec 9 polarités ; 6 évènements avec 8 polarités et 2 évènements avec 7 polarités). Pour tracer les mécanismes, nous avons utilisé la projection de la demi-sphère inférieure. Nous les avons tracés à l'aide de logiciel SPHERA. En préparant des fichiers d'entrées (Date, nom de la station, Azimut et AN) de ce logiciel pour chaque station (figure VI.26). Après le calcul nous avons déterminé les paramètres azimuth, pendage et glissement pour les plans nodaux.

7-12-13	0706	33.31		1
SP04	269.	123.	1	
SP02	46.	97.	1	
SP06	84.	97.	1	
SP03	197.	96.	1	
SP05	275.	95.	1	
CSVB	123.	95.	-1	
SP10	344.	95.	1	
SP07	243.	43.	-1	
SP01	207.	43.	1	
CKHR	243.	43.	1	
CABS	64.	43.	-1	

Figure VI.26 : Fichier d'entrée pour SPHERA.

- La répartition spatiale des 10 mécanismes est représentée sur la figure (VI.27).
- Les 10 solutions focales sont illustrées sur la figure (VI.28) dont : Les polarités sont représentées par des cercles en noir pour les compressions et des cercles vides pour les dilatations.
- Les paramètres de ces solutions focales sont indiqués dans le tableau (VI.4).

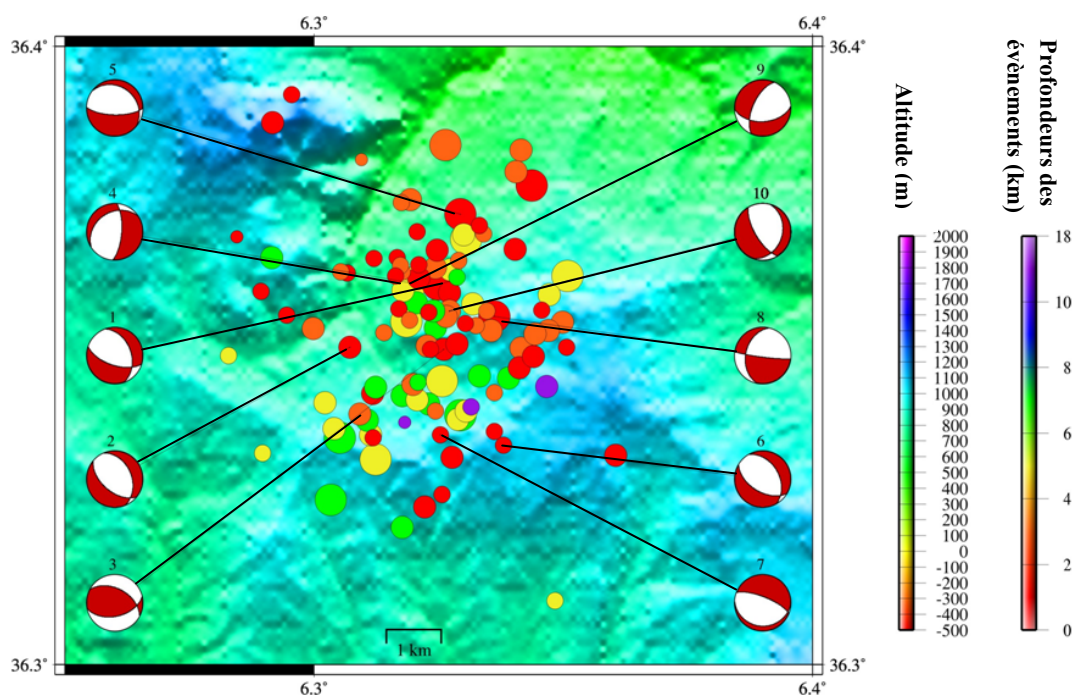


Figure VI.27 : Distribution spatiale des 10 mécanismes au foyer.

On remarque que la solution 3 est associée à une faille inverse avec une petite composante décrochante. Cela peut être dû au déplacement d'un bloc chevauchant un autre.

Tous les autres mécanismes aux foyers sont associés à des failles normales (mécanisme 7 purement normale, le reste, mécanismes normaux avec des petites composantes de décrochement).

Ces mécanismes aux foyers prouvent l'existence d'effondrements pouvant être expliqué par l'infiltration des eaux à travers les failles existantes dans le tunnel.

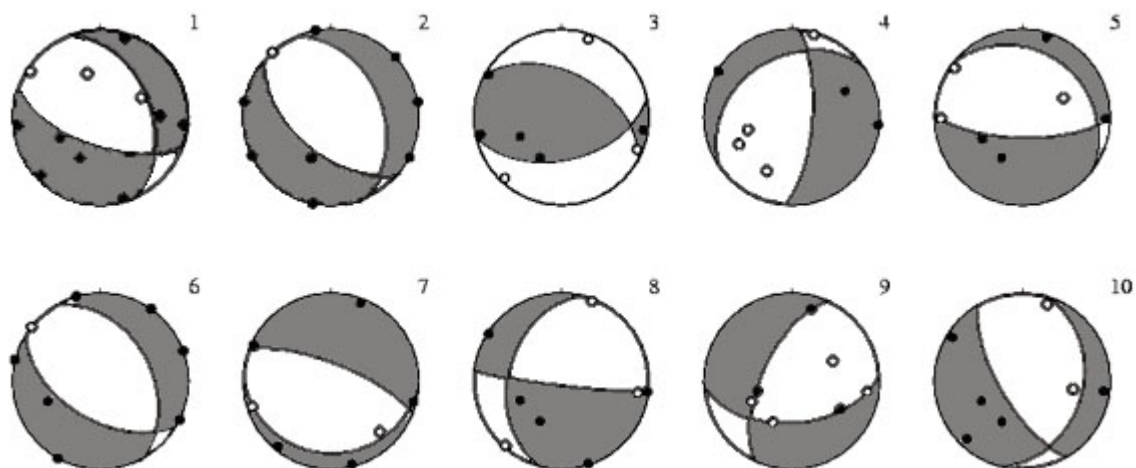


Figure VI.28 : Représentation des 10 solutions focales.

N	Date	Heur (h:mn:s)	Lat (°)	Log (°)	Dep (km)	MI	Plan 1			Plan 2		
							Str	Dip	Rake	Str	Dip	Rake
1	13/12/07	07:06:33.31	36.36150	6.32483	1.69	2.3	108.5	61.5	-120.9	340.0	41.1	-46.5
2	12/12/07	18:51:33.10	36.35133	6.30717	0.00	1.4	129.9	53.9	-107.4	337.9	39.6	-67.7
3	13/12/07	02:01:53.08	36.35100	6.32600	1.80	1.1	77.4	46.8	61.1	298.0	48.1	119.8
4	05/12/07	23:04:55.58	36.36167	6.31950	5.45	2.0	4.0	69.8	-114.5	236.9	31.4	-41.5
5	10/12/07	21:56:07.59	36.37283	6.32933	1.80	2.3	91.1	70.0	-104.7	308.7	24.6	-55.0
6	12/12/07	23:29:01.91	36.33550	6.33800	0.02	0.7	120.9	52.9	-109.0	330.6	41.1	-66.7
7	12/12/07	23:30:19.14	36.33717	6.32533	1.43	0.4	92.5	18.0	-108.2	291.5	72.9	-84.2
8	13/12/07	13:31:14.13	36.35633	6.33617	0.86	2.0	97.1	85.1	-51.1	193.2	39.2	-172.2
9	05/12/07	02:34:18.47	36.36167	6.31950	4.00	2.7	86.6	49.8	-38.9	204.2	61.3	-132.6
10	12/12/07	16:00:45.29	36.35717	6.32717	2.24	1.0	16.3	30.5	-47.1	149.2	68.2	-11.9

Tableau VI.4 : Paramètres des 10 solutions focales.

Les paramètres des solutions focales (1), (2) et (6) sont respectivement :

- Azimuts : 108.5°, 129.9° et 120.9° avec un moyenne de ~120° (119.77°) ;
- Pendages : 61.5°, 53.9° et 52.9 avec un moyenne de ~57° (56.1°).

VI.8. Conclusions

Cette partie de ce mémoire a été consacrée à l'étude de la crise sismique qui a touché la région d'Ain Kerma.

Au travers l'analyse de l'ensemble des éléments d'informations recueillies et de l'analyse de la sismicité induite, il en ressort que :

- Un phénomène de sismicité induite été généré près de Djebel el Akhal, dans la région de Ain Kerma

- Cette sismicité induite s'est localisée au niveau du Djebel el Akehal

- La sismicité induite dans cette région a été provoquée par l'opération de transfert d'eau entre les deux barrages (Béni-Haroun et Oued Athmania) de la région.

- Les eaux ayant pénétré dans le tunnel du Djebel el Akhal (parois du tunnel non isolées) se sont infiltrées dans le sous-sol entraînant la réactivation des différents accidents de ce Djebel. Cette réactivation s'est faite entre la surface et la profondeur de 18 Km (la plus part des évènements ont une profondeur inférieur à 7km).

- Plusieurs segments de failles qui ont joué en même temps.

- La sismicité s'est matérialisée par un nombre important de secousses (1277 sur 10 jours d'enregistrements).

- Le réseau sismologique déployé ainsi que les stations du réseau ADSN en place ont permis une bonne localisation de cette crise (pour les évènements relativement grands, sont enregistrés au moins par 7 stations).

- La magnitude des évènements n'a pas dépassé la magnitude $M_d = 3.6$. La profondeur des secousses étant généralement faible, la population a ressenti fortement les effets de cette crise (le phénomène d'explosion exprimé par des ondes sonores).

- Les mécanismes aux foyers de cette crise ont montré que l'injection d'eau a entraîné des effondrements de blocs repris par les failles délimitant ces blocs, Ces effondrements se sont matérialisés par le rejeu de failles normales. Cependant à travers l'analyse sismologique, une faille de direction prépondérante N120 aurait rejoué entraînant le déplacement en cascade des autres petites failles.

- Cette sismicité induite s'est arrêtée avec la fin de l'opération de transfert des eaux entre les deux barrages.

- Cette étude montre que des crises sismiques peuvent être générées par l'activité humaine.

Conclusion générale

Ce mémoire consacré à la surveillance sismique de la région de Constantine, représente le premier du genre pour la région, En effet, à part les travaux de sismicité historique ou ceux consacrés au séisme qui a frappé la région de Constantine en Octobre 1985, aucun autre manuscrit ne s'est attardé sur la surveillance et l'activité sismique de la région. Ce travail se base donc sur une approche combinée de la géodésie et de la sismologie, deux disciplines complémentaires pour approcher l'activité sismique.

Le premier volet de ce mémoire est dédié à la mise en place du premier réseau géodésique de surveillance dans la région. Basé sur la technologie GPS, ce réseau a pour objectif de surveiller la faille d'Ain Smara à l'origine du séisme de Constantine en 1985, Ce mémoire montre la complexité à mettre en place ce genre de réseau en raison de la situation sécuritaire que vit le pays, En effet, les points géodésiques choisis doivent en plus des critères techniques de sélection, absolument se situer dans des endroits sécurisés.

Les points mis en place lors des campagnes effectuées sont ainsi les premiers points de référence dans la région. Les traitements effectués sur ces premières mesures montrent toute la difficulté à quantifier des mouvements de l'ordre du millimètre. En effet la technologie GPS basé sur le trajet d'ondes à travers les couches atmosphériques, nécessite une connaissance parfaite de ces phénomènes pour obtenir une grande précision dans les mesures.

La domestication des différents logiciels de traitement t.q. ASHTEC Solution ne suffit également pas à obtenir les précisions requises. Il est bien entendu que la stabilité des sols sur lesquels sont implantés les récepteurs, les durées des temps de mesure ainsi qu'une excellente connaissance des différents paramètres affectant les mesures est absolument nécessaire.

Tout cela ne peut donc s'obtenir qu'avec une remesure des points avec une périodicité de 6 mois. La précision du mm pourrait être ainsi atteinte, permettant ainsi d'obtenir des informations **sur la déformation** dans la région mais aussi de comprendre les mécanismes à l'origine de cette déformation,

Ces mesures seront d'autant plus importantes si un événement sismique venait à se produire pour la quantification des mesures cosismiques et post sismiques.

On ne peut parler de surveillance sismique d'une région sans aborder le volet sismologique.

Le deuxième volet de ce mémoire est consacré à l'analyse de la sismicité enregistrée grâce à la mise en place des réseaux sismologiques sur le territoire national,

Un des résultats remarquables est cette meilleure connaissance de cette activité en rapport avec l'activité historique. En effet comment comparer les quelques événements mentionnés par les catalogues antérieurs avec la centaine d'événements qui se produisent dans la région par année.

Ainsi la région Est Algérienne apparaît comme la plus active de la région Nord Algérienne puisque $\frac{3}{4}$ des événements sismiques en Algérie se produisent dans la région. D'autre part, on peut constater que cette sismicité ne touche pas les différentes régions est de la même façon. On peut dire par exemple que la région du bassin de Annaba reste assez calme au contraire de la région du bassin de Guelma, des Aurès ou de la région frontière des massifs de Petite Kabylie. Cette région de Petite Kabylie apparaît d'ailleurs comme un noyau asismique. La région de Constantine apparaît quant à elle très sismique puisque de nombreux événements se produisent sur la partie Nord ou sur la partie sud de la ville.

En terme de magnitude les événements sismiques qui se produisent sont en général de faible magnitude, faiblement ressentis par la population quoique en général superficiels.

La crise sismique qui s'est produite durant le mois de Décembre 2007 et qui a touché la région de Ain Kerma est venue se superposer à l'activité sismique naturelle, habituellement connue.

En effet, cette crise a permis d'aborder **pour la première fois en Algérie le phénomène de sismicité induite généré par l'être humain**. Elle a permis de voir comment une erreur technologique pouvait avoir des conséquences en générant une activité sismique dans une région où se situe la deuxième ville du pays et le plus grand barrage d'Algérie.

L'analyse de la sismicité induite nous a démontré comment un réseau de failles pouvait être activé. Fort heureusement, ce phénomène est resté localisé et n'a pas engendré de séisme avec une magnitude significative. Ce phénomène a conduit en revanche à l'affolement de la population.

Il a fallu ainsi l'arrêt du pompage pour également permettre l'arrêt de l'activité sismique. Quelles conséquences aurait pu avoir cette activité anormale sur le reste du réseau de failles de la région. La réponse serait dans la secousse qui s'est produite tout récemment dans la région et qui n'a pas de lien avec le transfert des eaux.

Il faut également signaler que le réseau de failles de la région d'Ain Kerma constitue ainsi la deuxième structure active mise en évidence dans la région après celle d'Ain Smara mis en évidence après le séisme de 1985.

Si d'autres études mentionnent l'existence d'autres structures actives dans la région telle que les failles de Temlouka ou de Sigus, seule la surveillance sismique de ces structures permettra de confirmer ou d'infirmier l'existence de ces failles mais aussi de connaître leurs caractéristiques (longueur, largeur, profondeur...)

Ce mémoire représente une des premières contribution à la connaissance de l'aléa sismique et à la réduction du risque de la région de Constantine, L'existence d'une sismicité importante indique laisse supposer de la possibilité d'événements modérés à forts dans la région, C'est pour cela que ce travail devra être poursuivi afin de mieux connaître les différentes structures actives de la région, de mieux évaluer l'aléa sismique d'autant plus que la ville de Constantine est affecté par les phénomènes de glissements de terrain.

Ce travail doit être accompagné par une meilleure évaluation de la vulnérabilité du bâti d'autant que Constantine abrite une Casbah dont les édifices menacent effondrement à tout moment.

Références

1. Aissaoui, D. Les structures liées à l'accident sud-atlasique entre Biskra et le Djebel Manndra, Algérie: Evolution géométrique et cinématique, Thèse de 3^{ème} cycle, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France, **1984**.
2. Albarello .D, E. Mantovani, D. Babbucci et C. Tamburelli. Africa-Eurasia kinematics: main constraints and uncertainties. *Tectonophysics*, 243 : 25-36, **1995**.
3. Aoudia, A., F. Vaccari, P., Suhadolc & M. Meghraoui. Seismogenic potential and earthquake hazard assessment in the Tell Atlas of Algeria. *JOSE*, 4: 79-88, **2000**.
4. Argus .D .F, R. G. Gordon, C. DeMets et S. Stein. Closure of the Africa-Eurasia-north America plate motion circuit and tectonics of the Gloria fault. *J. Geophys. Res.*, 94 : 5585-5602, **1989**.
5. *Ashtech* Solution –Guide utilisateur- 188p, **2003**.
6. Ayadi, A., et al. (2003). Strong Algerian earthquake strikes near capital city, *EOS Trans. AGU*, 84(50), 561-568, **2003**.
7. Bacha Wahab, Amina Bougrine. Application du GPS a la surveillance du système d failles Thénia-Zemmouri. *Mémoire de fin d'étude (ingénieria)*, université U.S.T.H.B. **2003**.
8. Benhallou .H, Ferrer .A et Roussel .J. Catalogue des Séismes Algériens de 1951 à 1970. *Institut de Météorologie et de Physique du Globe de l'Algérie (I.M.P.G.A)*. Université d'Alger, Alger, pp.198, **1971**.
9. Bounif .A, Haessler .H & Meghraoui .M. The Constantine (northeast Algeria) earthquake of October 27, 1985: surface ruptures and aftershock study. *Earth and Planetary Science Letters*, 451-460, **1987**.
10. Bounif, M .A. Etude sismotectoniques en Algérie du nord : contribution à l'étude d'un tronçon de la chaîne tellienne à partir des répliques du séisme de Constantine du 27/10/1985. *Thèse de magister*, USTHB, Alger, 155p, **1990**.
11. Bounif, M .A & Dorbath, C: Three dimensional velocity structure and relocated aftershocks for the 1985 Constantine, Algeria ($M_s = 5.9$) earthquake. *Annali di Geofisica*, Vol. 41, N.1, April 1998, pp. 93-104, **1998**.
12. Bounif, M .A. Contribution à la sismogénèse : Etude détaillées des mécanismes de rupture au nord de l'Algérie. *Thèse de Doctorat d'état*, USTHB, Alger, **2004**.
13. Calais .E, J-M. Nocquet, F. Jouanne et M. Tardy. Current strain regime in the western Alps from continuous GPS measurements, 1996-2001. *Geology*, 30 : 651-654, **2002**.
14. Crétaux .J .F, L. Soudarin, A. Cazenave et F. Bouillé. Present-day tectonic plate motions and crustal deformations from the DORIS space system. *J. Geophys. Res.*, 103 : 30167-30181, **1998**.

15. DeMets .C, R. G. Gordon, D. F. Argus et S. Stein. Current plate motions. *Geophys. J. Int.*, 101: 425-478, **1990**.
16. DeMets .C, R. G. Gordon, D. F. Argus et S. Stein. Effect of recent revisionsto the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. *Geophys. Res. Letters*, 21: 2191-2194, **1994**.
17. Deschamps .A, Bezzeghoud .M & Bounif .A. Seismological study of the Constantine (Algeria) earthquake (27 October 1985), in *Seismicity, Seismotectonics and Seismic Risk of the Ibro-Maghrebian Region*, edited by J. Mezcua and A. Udias., Monografia n°8, *Instituto Geografico National*, Madrid, p 163-173, **1991**.
18. Déverchère .J, Yelles .K & Calais .E. Active deformation along the Algerian Margin (MARADJA cruise): Framework of the May 21, 2003, Mw-6.8 Boumerdes earthquake, *Eos Trans. AGU*, 84(46), Fall Meet. Suppl., Abstract S42E-0216, **2003**.
19. Dimitrov .D et Lammali .K. Surveillance géodésique des mouvements de l'écorce terrestre dans la région d'Ech Chélif. *Bull. Soc. Greece*. Vol XXIII/1, page 243-257, **1989**.
20. Dufour Jean-Phillippe. Introduction à la géodésie, *Paris Hermès science Publication*, **2001**.
21. Durand Delga Michel. Mise au point sur la structure du Nord-Est de la BERBERIE. *Bull. Serv. Carte Géol., Agérie, N. S.*, 39 : 89-131, **1969**.
22. Grandjean .A. Séismes d'Algérie de 1940 à 1950 inclus, *Ann. Inst. phys. Globe, Strasbourg*, 3ème partie, Géophysique, VII, 83 (Le Puy), **1954**.
23. Harbi .A, Maouche .S & Ayadi .A. Neotectonics and associate seismicity in the Eastern TellianAtlas of Algeria” *Journal of Seismology* 3: 95–104, **1999**.
24. Harbi .A. Analyse de la sismicité et mise en évidence d'accidents Actifs dans le Nord-Est Algerien. *Thèse de magister*, USTHB, Alger, **2001**.
25. Harbi Assia, Maouch Said & Benhallou Hadj. Re-appraisal of seismicity and seismotectonics in the north-eastern Algeria Part II: 20th century seismicity and seismotectonics analysis. *Journal of Seismology* 7: 221–234, **2003**.
26. Henri-Marcel DUFOUR et Claude Boucher. Géodésie” *Encyclopedia Universalis* –France Guttiféralles - volume 8, 431-437.
27. Hée .A. Catalogue des séismes algériens de 1850 à 1911, *Ann. Inst. Phys. Globe, Strasbourg*, 6, 41-49, Strasbourg, **1950**.
28. Jean Aubouin .Méditerranéen. *Encyclopedia Universalis* –Libye Mesures- volume 11, Pages : 1030-1032.
29. Jolivet .L. La déformation des continents, exemples régionaux. *Collection enseignement des Sciences*, Hermann, Paris, France, **1997**.
30. Kreemer .C et W. E. Holt. A no-net-rotation model of present day surface motion. *Geophys. Res. Letters*, 28: 4407-4410, **2001**.

31. Lammali .K, Bezzeghoud .M, Oussadou .F, Dimitrov, & Benhallou .H. Postseismic deformation at El Asnam (Algeria) in the seismotectonic context of north-western Algeria. *Geophys. J. Int.*, pp. 597-612, **1997**.
32. Maghraoui .M. Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie (paléosismologie, Tectonique active et synthèse seismotectonique). *Thèse de Doctorat d'état*, université de Paris sud, Orsay, France. **1988**.
33. Mokrane .A, A. Ait Messaoud, A. Sebai, A. Ayadi & M. Bezzeghoud. Les séismes en Algérie de 1365 à 1992. *Publication du CRAAG, Département ESS*, Alger-Bouzaréah, **1994**.
34. McKenzie .D .P. Active tectonics of the Mediterranean region. *Geophys. J. R. Astron. Soc.*, 30: 109-185, **1972**.
35. Nocquet .J-M. Mesure de la deformation crustale en europe occidentale par géodésie spatiale. *Thèse de Doctorat*. Université de Nice Sophia-Antipolis, UFR Sciences, **2002**.
36. Nocquet .J.-M et E. Calais. Geodetic Measurements of Crustal Deformation in the Western Mediterranean and Europe. *Pure appl. geophys.* 161, 000–000, **2004**.
37. Nocquet .J.-M et E. Calais. Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996–2001. *Geophys. J. Int.* 154, 72–88, **2003**.
38. Pagarete .J, Kasser .M et Ruegg .J-C. Evaluation et représentation des erreurs sur les déformations d'un réseau géodésiques : utilisation de la méthode de Monté Carlo. *Bul. Géod.* 64, pp. 63-72, **1990**.
39. Paul Correia. Guide pratique du GPS. *Edition Eyrolle 61*, bd Saint-Germain 75240 Paris, **2005**.
40. Rothé .J .P. Les séismes de Kherrata et la sismicité de l'Algérie, *Bull. Serv. Cart. Geol. Algérie*, 4 ème série, Géophysique, N. 3, **1950**.
41. Roussel J. () Les zones actives et la fréquence des séismes en Algérie 1716-1970, *Bull. Soc; Hist. Natur. Afrique du Nord.*, 64 (3), 2pp. 11-227, **1973**.
42. Sella .G .F, T. H. Dixon et A. Mao. Revel: A model for recent plate velocities from space geodesy. *J. Geophys. Res.*, **2002**.
43. Villa .J .M. La carte géologique (1/200 000) de Constantine et sa notice, réalisée en 1977 et publiée par le Ministère de l'industrie et de l'énergie, direction des mines et de la géologie, service de la carte géologique de l'Algérie, **1977**.
44. Vigny Christophe. GPS : de la Tectonique à la sismologie. Habilitation à diriger des recherches. Université Paris 7, D. Diderot, **2006**.
45. Villa Jean Mari. La chaîne alpine d'Algérie Orientale et des confins algéro-tunisiens. *Thèse Université*, Université P. et M. Curie-Paris, **1980**.
46. Yelles Chaouche .A.K, A. Deramchi, A. Ferkoul & K. Aoulaiche. Les séismes en Algérie de 1992 à 2001. *Publication du CRAAG, Département ESS*, Alger-Bouzaréah, **2002**.

47. Yelles-Chaouche .A .K, H. Djellit and M. Hamdache. The Boumerdes-Algiers (Algeria) earthquake of May, 21st, 2003 (Mw 6.8). *CSEM Lett.*, 20, 1–3, **2003**.
48. Yelles .K, K. Lammali, A. Mahsas, E. Calais & P. Briole. Coseismic deformation of the May 21st, 2003, Mw = 6.8 Boumerdes earthquake, Algeria, from GPS measurements. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L13610, doi:10.1029/2004GL019884, **2004**.

Sites Internet :

- [1] : [http:// www.Ib.refer.org/sammunch/ch2-5.htm](http://www.Ib.refer.org/sammunch/ch2-5.htm);
- [2] : [http:// renag.unice.fr/regal/PERSO/JMN](http://renag.unice.fr/regal/PERSO/JMN) ;
- [3] : http://recherche.ign.fr/theses_geodesie.html.

Liste des figures

Partie I :

Figure I.1 : Situation de la Méditerranée.....	05
Figure I.2: Condition cinématique à la frontière de plaques Afrique/Eurasie.....	07
Figure I.3 : Carte tectonique de la Méditerranée.....	08
Figure I.4: Sismicité du Bassin Méditerranéen.....	10
Figure I.5 : Synthèse cinématique en Europe-Méditerranée occidentale et centrale.....	11
Figure I.6 : Carte schématique du réseau de surveillance utilisé pour l'évaluation des mouvements horizontaux et verticaux 1981.....	13
Figure I.7 : Le déplacement cosismique d'après le modèle « Best-Fit ».....	14
Figure II.1 : Géoiïde terrestre	18
Figure II.2 : Ellipsoïde géodésique.....	19
Figure II.3 : Modélisation de la surface terrestre.....	19
Figure II.4 : Vecteurs g et n	20
Figure II.5 : Principe de l'interférométrie à très longue base –VLBI.....	22
Figure II.6 : Principe général de la technique SLR.....	23
Figure II.7 : Constellation de satellites.....	24
Figure II.8 : L'évolution des satellites GPS.....	25
Figure II.9 : Répartition des antennes et des stations de contrôle.....	26
Figure II.10 : Sphère de positionnement.....	28
Figure II.11 : Coordonnées géocentriques et géographiques.....	28
Figure II.12 : Principe de mesure GPS par code.....	29
Figure II.13 : Comparaison entre signal reçu et signal du récepteur sur la porteuse.....	30
Figure II.14 : Interprétation géométrique de la mesure de phase.....	31
Figure II.15 : Les différences de mesures.....	33
Figure II.16: Représentation du DOP.....	34
Figure II.17 : Les sources d'erreur GPS.....	34
Figure II.18 : Notion de pression et de contrainte.....	35
Figure II.19 : Représentation du tenseur de contrainte.....	35
Figure II.20 : Représentation du tenseur de déformation.....	36
Figure II.21 : Recherche des failles par l'installation d'un réseau géodésique.....	39
Figure II.22 : Déplacement d'une station GPS au cours du temps suivant sa proximité d'une faille décrochante.....	40
Figure III.1: Schéma structural simplifié de la carte géologique de Constantine 1/200 000.....	42
Figure III.2: Coupe (1) interprétative au carte 1/200 000.....	42
Figure III.3 : Situation des ruptures de surface et la carte géologique correspondante.....	44
Figure III.4 : La distribution des répliques de séisme de 25 Octobre 1985.....	45
Figure III.5 : Sismicité historique 1850-2006.....	47
Figure III.6 : Carte de Sismicité d'Ain Smara.....	48
Figure III.7 : Carte de la faille d'Ain Smara.....	49
Figure IV.10 : Fiche de station GPS.....	56
Figure IV.11 : La partie supérieur du fichier d'observation «o».....	57
Figure IV.12 : Plateforme du logiciel Ashtech Solution.....	58
Figure IV.13 : Notre réseau avec point de Contrôle : SMRA.....	59
Figure IV.14 : le réseau après le traitement.....	59
Figure IV.15 : Le réseau après ajustement.....	60
Figure IV.16 : Fixation de le point de contrôle BOUZ/aux points IGS.....	61
Figure IV.17 : Rapport sur le résumé du projet.....	61
Figure IV.18 : Rapport sur position des points.....	63
Figure IV.19 : 19 points du réseau.....	63

Partie II

Figure V.1 : Réseau Algérien de Surveillance et d'Alerte Sismique	66
Figure V.2 : Algerian Digital Seismic Network (ADSN).....	67
Figure V.3 : Carte de sismicité de la région de Constantine (1900-2007).....	71
Figure V.4 : Carte géologique du Nord-Est Algérien.....	75
Figure V.5 : Carte sismotectonique.....	75
Figure V.6 : Sismicité (1900-2007).....	76
Figure V.7 : Sismicité (2000-2007).....	76
Figure VI.1 : Schéma synoptique du projet de transfert des eaux du barrage du BENI-HAROUN.....	79
Figure VI.2 : Transfert des eaux entre les deux barrages.....	80
Figure VI.3 : Une partie de la carte géologique de Constantine 1/200 000.....	81
Figure VI.4 : Schéma structural simplifié.....	81
Figure VI.5 : Station sismologique de Oued Athemania (SP03).....	84
Figure VI.6 : Schéma explicative du fonctionnement des stations du réseau temporaire.....	85
Figure VI.7 : Carte de disposition du réseau utilisé.....	88
Figure VI.8 : La partie encadrée de la carte précédente.....	88
Figure VI.9 : Exemple de dépouillement d'un enregistrement.....	89
Figure VI.10 : Fichier de sortie pour le logiciel msdp.....	90
Figure VI.11 : Modèle de vitesse choisi.....	91
Figure VI.12 : Fichier de temps d'arrivée PHASHYP (pour un seule évènement).....	91
Figure VI.13 : Fichier d'emplacement des stations sismologiques.....	91
Figure VI.14 : Le modèle de vitesse utilisé.....	91
Figure VI.15 : Exemple de fichier sortie hypo71.....	92
Figure VI.16 : Distributions spatial des évènements avant le tri.....	96
Figure VI.17 : Zoom de la distribution des évènements.....	97
Figure VI.18 : Distribution des évènements triés.....	97
Figure VI.19 : Zoom sur les évènements triés.....	98
Figure VI.20 : Coupe A0.....	99
Figure VI.21 : Coupe A25.....	99
Figure VI.22 : Coupe A40.....	99
Figure VI.23 : Coupe A55.....	99
Figure VI.24 : Coupe A90.....	99
Figure VI.25 : Coupe A130.....	99
Figure VI.26 : Fichier d'entrée pour SPHERA.....	100
Figure VI.27 : Distribution spatiale des 10 mécanismes au foyer.....	100
Figure VI.28 : Représentation des 10 solutions Focales.....	101

Liste des photos

Partie I :

Photo II.1 : Antenne AX 1202.....	26
Photo II.2 : Récepteur Leica GRX 1200.....	26
Photo III.1 : Trace en surface pour le segment S_1 , dans Djebel Felten.....	43
Photo III.2 : Trace en surface pour le segment S_1 , dans Djebel Ouled Salem.....	43
Photo IV.1 : Site récupéré.....	51
Photo IV.2 : point en bon état, 618 (Ouled Salem).....	51
Photo IV.3 : L'accès du point (609) est difficile.....	52
Photo IV.4 : Tests pour choisir une station permanente.....	52
Photo IV.5 : RX1200.....	52
Photo IV.6 : La station permanente.....	54
Photo IV.7 : Boulon monumenté.....	54
Photo IV.8 : Station GPS.....	55
Photo IV.9 : Antenne LEIAT504.....	55

Partie II :

Photo V.1 : La station analogique régionale de Constantine.....	67
Photo V.2 : Numérisation du signal analogique de la station de Constantine.....	67
Photo V.3 : les trois composantes de sismomètre de la station CASM.....	67
Photo V.4 : Station CHKR (Sétif).....	68
Photo V.5 : Sismomètre large bande.....	68
Photo V.6 : Système d'acquisition.....	68
Photo V.7 : Transmission par satellite (VSAT) des données de la station vers le Datacenter.....	68
Photo VI.1 : Barrage de Beni-Haroun.....	80
Photo VI.2 : Méga station de pompage.....	80
Photo VI.3 : Djebal el Akhal.....	80
Photo VI.4 : barrage de Oued Athmania.....	80
Photo VI.5 : Ain Tin.....	80
Photos: (a) station ; (b) système d'acquisition ; (c) GPS ; (d) panneau solaire ; (e) PC pour téléchargement des données	84

Liste des tableaux

Partie I :

Tableau I.1 : Paramètre d'Eluer du mouvement relatif Afrique/Europe.....	06
Tableau I.2 : Paramètre source du modèle « Best-Fit ».....	14
Tableau II.1 : Ellipsoïdes géodésiques.....	19
Tableau II.2 : Composants des signaux émis par le satellite.....	26
Tableau II.3 : Données de navigation.....	27
Tableau II.4 : Lignes de basses.....	29
Tableau II.5 : Type de positionnement.....	32
Tableau III.1 : Liste des séismes important survenus dans la région de Constantine.....	46
Tableau IV.1 : Points géodésiques INCT existants dans la région d'étude.....	51
Tableau IV.2 : Première campagne d'observation : avril 2007.....	53
Tableau IV.3 : Coordonnées des stations d'observations GPS pour la campagne avril 2007.....	53
Tableau IV.4 : Déroulement de la mission.....	55
Tableau IV.5 : Caractéristiques des matériels GPS utilisés au niveau de chaque station ainsi que la chronologie des sessions y afférentes, mission Constantine-Janvier 2008.....	56
Tableau IV.6 : Les points du réseau IGS.....	60

Partie II :

Tableau V.1 : Stations du réseau ADSN	68
Tableau V.2 : Ruptures de surface.....	73
Tableau V.3 : Caractéristiques sismiques du choc principal.....	73
Tableau V.4 : Paramètres géométriques du plan de faille.....	74
Tableau VI.1 : Les stations sismologiques utilisées.....	85
Tableau VI.2 : Les Ml min et Max enregistrés pour chaque stations.....	87
Tableau VI.3 : Statistiques.....	95
Tableau VI.4 : Paramètres des 10 solutions focales.....	101

Liste des histogrammes :

Histogramme V.1: Histogramme de fréquence des séismes.....	69
Histogramme VI.1 : Nombre de secousses en fonction des jours, enregistré par le réseau télémétrie.....	78
Histogramme VI.2 : Nombre des évènements en fonction des jours, enregistré par le réseau utilisé dans notre étude.....	78
Histogramme VI.3 : Nombre des évènements enregistrés par chaque station.....	86
Histogramme VI.4 : Nombre des évènements en fonction des jours d'activités en représentant le nombre des stations qui ont enregistrées ces évènements.....	87
Histogramme VI.5: Distribution des RMS par tranche de 0.05 seconde.....	93
Histogramme VI.6 : Distribution des ERH par tranche de 500 m.....	93
Histogramme VI.7 : Distribution des ERZ par tranche de 500 m.....	93
Histogramme VI.8 : Distribution des profondeurs en fonction du nombre d'événements.....	94
Histogramme VI.9 : Distribution des magnitudes en fonction du nombre d'événements.....	94
Histogramme VI.10 : Distribution en fonction du nombre de stations.....	94
Histogramme VI.11 : Distribution en fonction du nombre de stations.....	94

Liste des abréviations

Code station

GPS

ANBD : Ain Abid
ANBY : Ain El Bey
ANML : Ain Mila
SMRA : Ain Smara
BNBS : Ben Badis
BSBT : Bordj Sabath
CSTN : Constantine
DDCH : Didouche Mourad
GARH : El Guerrah
KHRB : El Khroub
IBZD : Ibn Ziad
LBCH : Lambliche
MILA : Mila
ATHM : Oued Athmania
OSGN : Oued Seguin
OHBA : Ouled Hebeba
ORHN : Ouled Rahm
SGUS : Sigus
ZIYF : Zigout Youcef
CAGL : CAGLIARI
EBRE : ROQUETES
NOT1: NOTO
RABT: RABAT
SERF: SAN FERNANDO
BOUZ : Bouzaréah

Sismologique

CMER : Merouana	} 2 stations fixes	} Réseau régional C : Constantine
CGLM : Guelma		
CASM : Ain Smara	} 8 stations du réseau télémetrie	
CDFR : Bouaffroune		
CAEH : Ain el Ouahch		
CTEI : Dj-Teioualt		
CKHR : Kef-Lehmer		
CMAH: Dj-Manchoura		
CABS: Abbabsia		
CKFL: Kef-Lekhel		

ATAF: Tarf	}	Réseau ADSN
CABS: Constantine ABBABSIA		
CKHR: Constantine KEF-LEHMER		
CKTR: Constantine KANTRA		
CSVB: Constantine SMARA VERY BROADBAND		
EMHD : Mahouada		
OJGS: Oran Guires		
OTSS: Oran Tessala		
OKGL : Oran Kef Guellal		
TTAM : Tamanrasset TAMAnrasset		

SP01, 02, 03, 04, 05, 06, 07,10 : Short Period —→ Réseau portable
 SNC: Seismic Network Center
 ADSN: Algerian Digital Seismic Network
 REALSAS : Réseau Algérien de Surveillance et d'Alerte Sismique

Organismes mondiaux

CGS : Centre Génie Sismique
 CNES : Centre National d'Études Spatiales
 CRAAG : Centre de Recherches en Astronomie, Astrophysique et de Géophysique Alger, Algérie.
 CSEM : Centre Sismologique Euro-Méditerranéen, Strasbourg, France
 EMSC: European Mediterranean Seismological
 EUREF-EPN : réseau européen
 IGN : Institutio Geografico Nacional de Espana
 IGS: International GPS Service
 INCT: Institute National de Cartographies et de Télédétection
 ITRF : International Terrestrial Reference Frame
 GRGS : Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale
 GRL: Geophysical Research Letters
 HRV : Harvard University, Cambridge, Massachusette
 NEIC: National Earthquake Information Center, USA
 RGP : Réseau GPS Permanents français
 SINEX : Solution Independent Exchange format

Géodésie

WGS84: World Geodetic System of 1984
 ECEF: Earth-Centered, Earth-Fixed.
 VLBI: Very Long Baseline Interferometry
 LLR: Lunar Laser Ranging
 SLR: Satellite Laser Ranging
 GNSS : Global Navigation Satellite System
 DORIS: Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated from Satellite
 NAVSTAR GPS: NAVigation System by Timing and Ranging – Global Positioning System
 PPS: Precise Positioning Service
 SPS: Standard Positioning System
 SA: Selective Availability
 SS : Space Segment
 SV : Space Vehicle
 CS: Control Segment
 MCS: Master Control Station

C/A: Coarse/Acquisition ou Clear/Access
P : Précise ou Private
DGPS : Différentiel GPS
DOP : Dilution Of Precision
H, V, T, P et GDOP : Horizontal, Vertical, Time, Position et Geometric DOP
USER: User Equivalent Range Error
PPM : Partie par million
RINEX : Receiver INdependent EXchange
GMT: Generic Mapping Tools Graphics

Paramètres

Hypo71/

LAT : Latitude
LON : Longitude
DEP : Profondeur
RMS : L'erreur quadratique moyenne
ERH : L'erreur standard de l'épicentre
ERZ : L'erreur standard de la profondeur focale
GAP : Grande séparation azimutale entre les stations
DIMIN: Distance épicentrale Minimale
ITR : Nombre d'itérations pour atteindre la convergence
NWS : Nombre de phases P utilisées dans les calculs
STA : Stations
DIST : Distances épicentrales
AZM : Azimut
AN : Angle d'incidence

SPHERA/

Strik : Azimut
Dip : Pendage
Rake : Glissement

Générales/

I0 : Intensité
M : Magnitude
MI : Magnitude locale
Mw: Magnitude du moment sismique
Md : Magnitude de durée
Ms : Magnitude des ondes de surfaces
Mb : magnitude des ondes de volumes
MMI : Modified Mercalli Intensity
MSK : Medvedev-Sponheuer-Karnik
P : Ondes de volume longitudinal
S : Onde de volume transversal
Pl : Plongement

Résumé

La région de Constantine comme toutes les régions de l'Atlas Tellien s'expose à un des risques majeurs, c'est le risque sismique, dû à la déformation tectonique causé par la convergence entre les deux plaques Africaine et Eurasienne. La plupart des séismes enregistrés dans cette région sont liés à l'activité de la faille d'Ain Smara, citons le séisme de 25 Octobre 1985. Afin de suivre les mouvements et la déformation de cette faille et pour comprendre son cinématique, un réseau GPS de 19 stations ont été installées autour d'elle (c'est le premier volet de ce mémoire). Ce travail est réalisé seulement durant la première campagne de mesure qui s'est déroulée pendant 10 jours du 14 au 24 Janvier 2008. Chaque station composée d'un récepteur (Leica GRX 1200 pro) adjoint d'antenne (Chockring AT504 ou MOBILE AX1202), une batterie permet de faire face aux coupures d'électricité. Les stations ont été observées pendant 4 à 5 jours avec une session de 24 heures à une cadence de 30 secondes et un angle de coupure des observations de 15°. Pour la station permanente d'Ain Smara on prend 10 jours d'observation. Le logiciel *Ashtech Solution* est le programme utilisé dans le cadre de ce mémoire pour le traitement des données qui donne des résultats de l'ordre du 1 à 1,5 cm de précision. Ces données seront très utiles dans l'avenir lorsqu'en fait d'autres mesures chaque 6 à 8 mois, mais il faudra retraiter par des logiciels scientifiques comme GAMIT et Il est demandé de prendre en considération les paramètres (les éphémérides,...) éliminant les erreurs sur le positionnement. Ainsi que cette première mesure des positions, est importante en cas de secousse significative pour la mesure des déformations cosismiques.

Lors du travail de GPS, une activité sismique a frappé le 30 Novembre 2007 la région de Ain Kerma Nord-Ouest de la ville de Ain Smara (c'est le deuxième volet de ce mémoire). Cette activité est considérée comme une activité sismique induite provoquée par l'infiltration des eaux dans les failles (micro-failles) qui se trouvent dans Djebel el Akhal. Ces eaux pompées du barrage principal de Beni-Haroun de la région de Grarem vers le barrage secours de Oued Athmania pour alimenter la ville de Constantine et sa région en eau potable. Afin de suivre l'activité immédiate des événements sismiques, un réseau sismologique temporaire constitué de 8 stations sismologiques portables courtes périodes a été installé autour de cette activité. Le dépouillement des données a été effectué pour la période allant du 04/12/2007 au 13/12/2007 pour les 8 stations du réseau portable et 5 stations Large Bande du réseau ADSN. Environ 1277 événements ont été exploités sur 10 jours d'enregistrement. Nous n'avons pris en considération que les événements enregistrés par 3 stations ou plus. Finalement, nous avons obtenu 346 événements. Le traitement se fait à l'aide du programme Hypo71 pour un modèle de 4 couches ayant des vitesses variant entre 4,5 et 8 km/s et des profondeurs allant de 0 à 30km. Après l'exécution du programme, on fait un tri selon les conditions suivantes: $RMS \leq 0,5$; $ERH \leq 2,00km$ et $ERZ \leq 3,00km$. En finalité, nous avons obtenu que 110 événements répondant à ces critères. L'étude de ces événements montre que cette activité est locale sur un périmètre de 7 km, se montre sur le nombre important des événements de faible magnitude. La distribution des événements montre que plusieurs segments de failles qui ont joué en même temps, et que la plus part sont produits avec des profondeurs inférieurs à 7km, c'est une crise superficielle. Les mécanismes aux foyers de cette crise ont montré que l'injection d'eau a entraîné des effondrements de blocs repris par les failles délimitant ces blocs, Ces effondrements se sont matérialisés par le rejet de failles normales. Cependant à travers l'analyse sismologique, une faille de direction prépondérante N120 aurait joué entraînant le déplacement en cascade des autres petites failles. Cette étude montre que des crises sismiques peuvent être générées par l'activité humaine.

) GPS .1985 25
 10 19 ()
 Leica) .() 2008
 (Chockring AT504 MOBILE AX1202) (GRX1200 pro
 30) 30 24 5 4
 « Ashtech Solution » .°15 ()
 . 1.5 1
 GAMIT (8 6)

.2007 30 GPS
 04 8
 .ADSN 5 () 2007 13
 346 10 1277
 4 () Hypo71
 : 30 0 / 8 4.5
 .RMS ≤ 0.5 ; ERH ≤ 2.00 km ; ERZ ≤ 3.00 km
 110
 7