



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE ou INSTITUT : FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par :

MM. ALI CHERIF Abdelkarim & AHMED BETCHIM Younes

DOMAINE : SCIENCES ET TECHNIQUES

FILIERE : GENIE CIVIL

OPTION : SCIENCES ET TECHNIQUES TOPOGRAPHIQUES

Thème

AUSCULTATION PAR GPS DU SOL DE L'EX. BAC EN
EXCAVATION DE STOCKAGE GNL de GL4Z/ARZEW

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	qualité
DJABALLAH Ahmed	Maitre Assistant A	Président
NAFTI Rédouane	Maitre Assistant A	Examineur
TAIBI Habib	Maitre de Recherche B	Promoteur
GUERROUDJ Abdelhalim	Maitre Assistant A	Co-promoteur

Promotion : Octobre - 2016

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour mener à bien ce travail, qu'il soit béni et glorifié.

Nos remerciements vont particulièrement à nos parents, pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de notre vie.

Nous tenons à remercier chaleureusement notre encadreur Mr. Taibi Habib qui nous a permis de mener à bien ce travail, techniquement et moralement, et notre co-encadreur Mr. GUERROUDJ Abdelhalim.

Nous tenons à remercier tout particulièrement Mr. Kahlouche Salem, Directeur du département de la géodésie spatiale, pour son accueil et sa disponibilité.

Nous voudrions aussi remercier également tous les collègues qui ont contribué à notre étude, particulièrement l'équipe de géodésie pour leur contribution au projet du complexe GL4/Z.

Liste des Figures

<i>Figure I.1: Méthode des alignements.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.2: Méthode du relèvement et d'intersection.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.3: Exemple de radars interférométriques.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.4: Les différents réseaux de mesures géodésiques.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.5: Coordonnées cartésiennes, coordonnées géographiques.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.6: Série temporelle d'un point ausculté.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.7: Série temporelle d'un point ausculté avec des barres d'erreurs.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.8: Série temporelle d'un point ausculté avec des barres d'erreurs fines.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure II.9: Les trois différences.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure II.10: Positionnement absolu (autonome).....</i>	<i>24</i>
<i>Figure II.11: Positionnement relatif.....</i>	<i>26</i>
<i>Figure II.12: Observation en mode stop & Go.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure III.13: bac de stockage souterrain de GNL (GL4/Z- Arzew).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure III.14: Méthodologie d'auscultation.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.15: Schéma du canevas global d'auscultation.....</i>	<i>34</i>
<i>Figure III.16: Schéma, caractéristiques et photo de la borne.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.17: Schéma, caractéristiques et photo des cibles.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.18: Disposition des cibles sur la couronne du bac.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.19: Schéma, caractéristiques des piquets bétonnés.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.20: Disposition des chutes sur le trottoir entourant le bac.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure III.21: Borne avec antenne Ashtech Z-XII3.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure IV.22: Récepteur GPS Ashtech Z-XII3.....</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.23: Antenne Ashtech Z-XII3.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.24: Hauteur d'antenne.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.25 : Menu principal de Winprism.....</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.26 : Réseau de garde.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure IV.27 : Schéma d'évolution horizontale entre 2000-2002.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure IV.28 : Schéma d'évolution horizontale entre 2000-2004.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure IV.29 : Schéma d'évolution horizontale entre 2000-2006.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure IV.30 : les profils en long.....</i>	<i>66</i>

Liste des Tableaux

<i>Tableau III.1 : Calendrier d'observations GPS du réseau de garde.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau III.2 : Calendrier d'observations GPS du réseau de base.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau III.3: Calendrier d'observations GPS du réseau de cibles.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau III.4: Calendrier d'observations GPS du réseau de chutes.....</i>	<i>40</i>
<i>Tableau III.5: Calendrier d'observations GPS du réseau des repères.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau IV.6: les coordonnées des points de rattachement.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau IV.7: les coordonnées en X, Y et Z en UTM pour les années 2000, 2002, 2004, 2006.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau IV.8 : les RMS sur les points observés.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau IV.9 : les déplacements en ΔX, ΔY, et ΔH.....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau IV.10 : Déplacements maximal et minimal en mm.....</i>	<i>56</i>

Sigles et abréviations

<i>Code C/A</i>	<i>Code Approché ou Code Approximatif</i>
<i>Code P</i>	<i>Code Précis ou Code Protégé</i>
<i>CTS</i>	<i>Centre des Techniques Spatiale</i>
<i>DoD</i>	<i>Department of Defence</i>
<i>GDOP</i>	<i>Geometric Dilution of Precision</i>
<i>GLONASS</i>	<i>GLobal Orbiting NAVigation Satellite System</i>
<i>GNL</i>	<i>Gaz Naturel Liquéfier</i>
<i>GPS</i>	<i>Global Positioning System</i>
<i>MNT</i>	<i>Modèle Numérique du Terrain</i>
<i>NAVSTAR</i>	<i>Navigation System by Timing And Ranging</i>
<i>PPM</i>	<i>Part Par Million</i>
<i>PPP</i>	<i>Precise Positioning Point</i>
<i>RINEX</i>	<i>Receiver Independant Exchange Format</i>
<i>RTK</i>	<i>Real Time Kinematic</i>
<i>SPS</i>	<i>Standard Positioning Service</i>
<i>TYRGEONET</i>	<i>TYRrhenian GEOdetic NETwork</i>
<i>WGS84</i>	<i>World Geodetic System 84</i>

Résumé

A cause de l'instabilité de la croute terrestre, toutes les constructions telles que les sites industriels subissent des déplacements et des déformations au cours de la réalisation ou l'exploitation. Vu la nécessité d'un suivi continu pour la surveillance des ouvrages pour assurer leurs sécurité afin d'éviter des pertes en vies humaines ainsi que d'énormes dommages matériels, il est indispensable de faire une auscultation topographique classique ou géodésique (spatiale).

Pour étudier la zone déformée en général et du bac de stockage GP4/Z en particulier, une campagne de mesures GPS a été menée en 2000, dans le cadre de l'auscultation du bac de stockage GP4/Z, les résultats obtenus ont été comparés à ceux issus des différentes campagnes qui ont suivi , L'analyse et l'interprétation des résultats fournis par les trois périodes d'observation pour la surveillance de la déformation du bac et de son voisinage, montrent qu'il y'a des instabilités surfaciques horizontales allant jusqu'à 16 cm et des déplacements verticaux de 25 cm.

ملخص

لسبب عدم استقرار القشرة الأرضية، كل المشاريع الهندسية الكبيرة خاصة المنشأة الصناعية خاضعة للنزوح من مكانها الأصلي و تمر بتشوهات نسبية تكون في مرحلة البناء أو مرحلة العملية للمنشأة. وهنا نرى ضرورة المراقبة الدورية للمشاريع للتأكد من سلامتها حتى نتفادى وقوع خسائر مادية أو بشرية أثناء و بعد نهاية المشروع. ولهذا وجوب ضرورة القيام بما يسمى المراقبة الطبوغرافية تكون إما كلاسيكية أو جيوديزية (GPS) .

من اجل دراسة المنطقة المتضررة عموما و مستودع للتخزين (GP4/Z) خصوصا ، هناك مجموعة من القياسات (GPS) تمت في سنة 2000 التي هي بدورها مرجع لمجموعة من القياسات تأتي بعد، ذلك للوصول لقيمة النزوح أو التشوه بعد مرور مدة زمنية معينة ليتم في الأخير تحليل و فهم النتائج المتحصل عليها والتي أظهرت وجود تحرك أفقي وصل إلى 16سم و هبوط عمودي وصل إلى 25 سم.

Sommaire

Remerciements.....	I
Liste des Figures.....	II
Liste des Tableaux.....	III
Sigles et abréviations.....	IV
Résumé.....	V
Sommaire.....	VI
Introduction générale.....	1

Chapitre I: Techniques d'auscultation

I.1 Introduction.....	5
I.2 But de l'auscultation.....	5
I.3 Mesures de déplacements (déformations).....	6
I.4 Techniques d'auscultation.....	6
I.4.1 Le fil à plomb et plomb optique.....	6
I.4.2 Le procédé des Alignements.....	7
I.4.3 Méthode des relèvements et intersections combinées.....	7
I.4.4 Méthode de la photogrammétrie.....	8
I.4.5 Auscultation par radar sol.....	8
I.4.6 Procédé géodésique.....	9
I.5 Mouvements de l'ouvrage et de son voisinage.....	10
I.6 Canevas tridimensionnel.....	10
I.7 Analyse des déformations.....	11
I.8 Conclusion.....	13

Chapitre II: Notions fondamentales du système GPS

II.1 Introduction.....	15
II.2 différentes composantes du système GPS.....	15
II.2.1 Segment spatial.....	15
II.2.2 Segment de contrôle.....	16
II.2.3 Segment utilisateur.....	16
II.3 Types de mesures.....	18
II.3.1 Mesure de pseudo-distance (code).....	18
II.3.2 Mesure de phase.....	19
II.4 Combinaison linéaires des mesures de phase.....	19
II.4.1 Les différences.....	19

a) Simple différence.....	20
b) Double différence.....	20
c) Triple différence.....	21
II.4.2 Combinaisons linéaires.....	22
a) Combinaison Ionosphère-Free (L1C).....	22
b) Combinaison Wide-Line (L1-L2).....	22
c) Combinaison Narrow-Line (L1+L2).....	23
d) Combinaison L1&L2C.....	23
II.5 Modes de positionnement par GPS.....	24
II.5.1 Positionnement autonome (absolu).....	24
II.5.2 Positionnement autonome précis (ppp).....	25
II.5.3 Positionnement relatif.....	25
II.6 Modes d'observations GPS.....	26
II.6.1 Le mode statique géodésique.....	26
II.6.2 Le mode statique rapide.....	26
II.6.3 Le mode cinématique.....	27
II.6.4 Le mode semi-cinématique (Stop&Go).....	27
II.6.5 Le mode cinématique en temps réel (RTK).....	28

Chapitre III: Méthodologie d'auscultation du bac de stockage de GNL

III.1 Introduction.....	30
III.2 Présentation du bac de stockage souterrain de GNL.....	30
III.3 Méthodologie d'auscultation géodésique du bac de GNL par GPS.....	31
III.3.1 Implantation du réseau de base.....	31
III.3.2 Implantation du réseau cibles.....	31
III.3.3 Observations et traitement.....	32
III.3.4 Stratégie et processus de déroulement de la mission.....	32
III.3.4.1 Planification de la mission.....	33
III.3.4.2 Configuration du réseau géodésique.....	33
III.3.4.3 Observations sur le terrain.....	38

Chapitre IV: Application

IV.1 Description du récepteur Ashtech Z-XII3.....	43
IV.2 Description de l'antenne Ashtech Z-XII3.....	44
IV.3 Description sommaire du logiciel de traitement Winprism.....	45

IV.3.1 Module PLANNING	45
IV.3.2 Module TRANSFER	46
IV.3.3 Module PROCESS	46
IV.3.4 Module ADJUST	47
IV.4 Traitement et analyse des données GPS	48
IV.4.1 Transfert et contrôle des données	48
IV.4.2 Choix des paramètres de calcul	48
IV.4.3 Processus de traitement	49
a) Présentation du canevas d'appui	49
b) Présentation du canevas géodésique du bac de stockage	50
IV.4.4 Transformation entre WGS84 et Nord Sahara	50
IV.4.5 Résultats et interprétation	51
IV.4.5.1 Résultats obtenus	51
IV.4.5.1 Interprétation des résultats	76
Conclusion générale	78
Bibliographie	81

Introduction générale

Les techniques modernes de construction et de conception permettent la réalisation de grandes structures d'ingénierie telles que les bacs. Ces structures sont constamment sujettes aux déformations et déplacements sous les contraintes des charges internes et externes qui s'exercent sur leurs parois et fondation. Pour s'assurer de leur sécurité, prévenir des détériorations coûteuses, vérifier les critères de la construction et suivre leur comportement général, une évaluation précise de leurs déplacements dans le temps est nécessaire.

Cette évaluation se fait de deux façons distinctes mais complémentaires :

- ✓ Observation ou inspection visuelle des affaissements et des surélévations;
- ✓ auscultation instrumentale.

Ce dernier point se divise en deux grandes parties:

- ✓ Auscultation instrumentale interne en utilisant des appareils fixes;
- ✓ Auscultation externe ou géodésique qui fait l'objet de notre recherche.

Jusqu'à maintenant les auscultations topographiques se font à l'aide d'instruments de mesures classiques (théodolites, distancemètres, niveaux de haute précision, mires, etc.). Cette méthode donne des résultats de très haute précision, meilleure que ± 5 mm en planimétrie et ± 2 mm en altimétrie, mais elle est sujette à d'autres contraintes telles que la séparation des réseaux d'altimétrie et de planimétrie, la réquisition d'un matériel très lourd et la nécessité de longs délais d'exécution, elle est tributaire des conditions météorologiques (vent, neige, froid . . .) ce qui fait d'elle une méthode très dispendieuse.

Le système de positionnement par GPS avec le complètement de sa constellation peut donner des solutions aux lacunes de l'auscultation par mesures conventionnelles, telles que la rentabilité, le court délai d'exécution, la non nécessité d'une inter-visibilité entre les stations et les observations durant les intempéries, etc.

L'objectif du présent mémoire est de réunir toutes les informations acquises, en quantité et en qualité, permettant de déterminer les déplacements horizontaux et verticaux ainsi que le suivi continu du comportement de l'ouvrage et de son voisinage immédiat.

Le présent mémoire est composé de quatre chapitres qui se résument comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation des généralités sur les techniques d'auscultation (but d'auscultation, différents techniques d'auscultation,.....).

Le système GPS et les techniques de mesures, ainsi que les différents modes de positionnements sont présentés dans le deuxième chapitre.

Le troisième chapitre présente la méthodologie d'auscultation du bac de stockage, et les différents travaux réalisés sur le terrain (présentation du bac ; matérialisation des points, observation, ...).

Dans le dernier chapitre on présente notre application, ce chapitre est divisé en deux parties dont la première est consacrée à la description des moyens d'acquisition et de traitement de données tel que le type de récepteur utilisé et le logiciel de traitement (WinPrism), dans la deuxième partie on présente la phase des traitements des données GPS, mesure des déplacements, rattachement, transformations entre le système WGS84 et le système local avec une analyse et interprétation des résultats obtenus.

I.1 Introduction

Le développement de la construction au cours de ces dernières années a conduit une forte spécialisation. Cette spécialisation concerne d'une part les types d'ouvrages dont s'occupe le professionnel de la construction, et l'évolution vers une plus large répartition des tâches dans le projet, la conduite des chantiers, l'auscultation des ouvrages, les essais, l'entretien, d'autre part.

Il manque aussi les bases pour une compréhension mutuelle des différents professionnels impliqués dans un même travail. De telles circonstances peuvent porter préjudice et même mettre en question le bon aboutissement d'un projet.

Pour la détermination de l'état existant, l'ingénieur utilise différentes sortes de moyens, il utilise avant tout ses sens (vue, toucher, ouïe) pour découvrir l'état d'un ouvrage et au cours de ces dernières années, de nombreuses techniques spécifiques pour l'auscultation de l'état existant ont été développées.

Ce travail donne, aux différents professionnels participant à l'auscultation d'un ouvrage, les informations de base sur la technique d'auscultation par GPS.

I.2 But d'auscultation

L'auscultation est l'ensemble des activités techniques mises en œuvre pour acquérir, analyser et interpréter des paramètres de comportement d'un ouvrage et de son voisinage. Permet de suivre les risques liés à l'instabilité des sites naturels, peut prendre des formes d'importance croissante.

Une composante fondamentale de la surveillance est la prise en compte du temps. Suivant les caractéristiques du site, les mécanismes mis en jeu et leur évolution probable, l'influence du temps peut être variable, ce qui conduit à distinguer plusieurs modes de surveillance [J.DURANTHON, 1994] :

- ✓ surveillance périodique pour les phénomènes évoluant lentement ;
- ✓ surveillance permanente discontinue ;
- ✓ surveillance permanente continue, avec un traitement des données en différé ou en temps réel.

Le but recherché est de réunir toutes les informations acquises, en quantité et en qualité, utiles au suivi du comportement régulier de l'ouvrage, de ses fondations et de ses environs, tout en assurant une détection rapide de tout phénomène susceptible de nuire à la sécurité de l'ouvrage.

Pour atteindre ce but, il faut définir les différents types de dispositifs (mesures) et leur implantation apportant une garantie suffisante. En raison, de la spécificité de chaque ouvrage, les dispositifs d'auscultation sont à étudier cas par cas en s'appuyant sur les quelques principes fondamentaux suivants :

- ✓ La précision exigée par le type de l'ouvrage, car les phénomènes mesurés sont souvent de faible amplitude. Par exemple, les vitesses moyennes d'évolution du glissement ou déplacement du terrain;
- ✓ la fréquence des mesures;
- ✓ le bilan économique du projet de surveillance.

I.3 Mesures de déplacements (déformations)

Le but est d'extraire les déplacements horizontaux et verticaux de l'ouvrage et de son voisinage immédiat. Les points de mesure sont situés aux différents niveaux (à l'intérieur de l'ouvrage, sur sa paroi, au niveau du couronnement, à proximité du l'ouvrage, etc....).

I.4 Techniques d'auscultation

Le choix des techniques d'auscultation spécifiques, leurs combinaisons et utilisations pour l'une ou l'autre étape de la recherche, s'effectue selon les critères suivants:

- valeurs recherchées et priorités;
- simplicité des techniques d'auscultation;
- surface couverte par l'information;
- possibilité de corrélation avec d'autres techniques.

Parmi les techniques d'auscultation, nous citons :

I.4.1 Fil à plomb et plomb optique

C'est une manière simple d'auscultation qui consiste à placer un fil à plomb dans un puits foré dans l'ouvrage. On mesure les déplacements du fil par rapport à un repère fixe situé au pied de l'ouvrage. Parmi ces avantages, cette méthode est immédiate et pratiquement sans erreur. Cette méthode présente deux inconvénients [S.AMEUR, 2009] :

- 1- On ne mesure que les déplacements relatifs de la crête par rapport au pied de l'ouvrage. Or il est bien d'affirmer à priori que le pied est parfaitement stable ;

2- L'évolution des déplacements est limitée aux déplacements radiaux.

I.4.2 Procédé des alignements

Cette méthode est utilisée pour les ouvrages qui nécessitent un alignement droit, comme l'alignement d'un ensemble des poteaux successifs ou la crête d'un ouvrage, il est intéressant d'étudier les déformations de l'axe de l'ouvrage (figure I.1). Les objets alignés sur cet axe sont :

- ✓ Un certain nombre de repères ;
- ✓ Une station fixe ;
- ✓ Une ou plusieurs références.

I.4.3 Méthode des relèvements et intersections combinées

A partir de deux points A et B situés sur les berges, on intersecte des repères C, placés sur le couronnement. La mesure est complétée par un relèvement en C sur AB. On obtient donc trois lieux géométriques pour le même repère (figure I.2):

- ✓ Deux lieux d'intersection qui donnent un déplacement.
- ✓ Un lieu de relèvements qui donne un segment capable.

Le problème majeur de ce procédé, c'est l'impossibilité de faire des stations si on ne peut pas stationner sur la structure apparente de l'ouvrage cela limite la mesure des déformations à la crête de l'ouvrage. La méthode n'est pas donc générale.

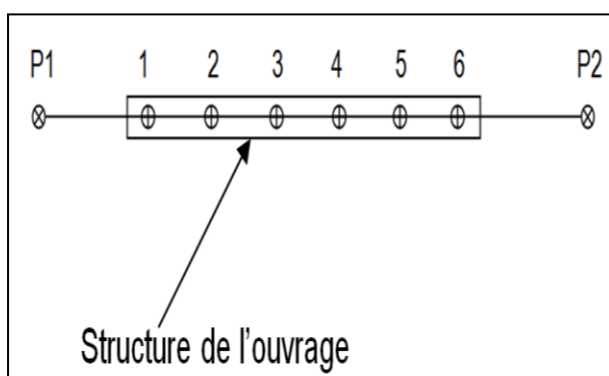


Figure I.1: Méthode des alignements.

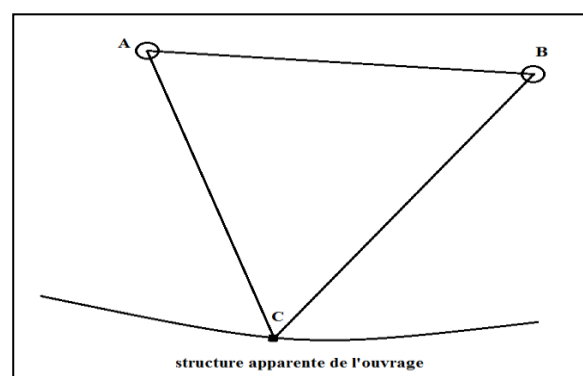


Figure I.2: Méthode du relèvement et d'intersection.

I.4.4 Méthode de la photogrammétrie

Cette méthode est basée sur la comparaison entre deux ou plusieurs relevés photogrammétrique de l'ouvrage en MNT (Modèle Numérique du Terrain) à partir de quelques points fixes (photogrammétrie terrestre), pour extraire les variations planimétriques et altimétriques de l'ensemble de l'ouvrage ausculté. Les avantages principaux d'utilisation de la photogrammétrie sont :

- ✓ Réduction du temps de travail;
- ✓ Obtention simultanée de coordonnées en trois dimensions;
- ✓ Levé et la surveillance d'un nombre important de points de l'ouvrage;
- ✓ L'amélioration de la précision des points.

I.4.5 Auscultation par radar sol

Une ou plusieurs antennes radar sont montées face à la zone à surveiller et enregistrent des images radar successives de la zone. Une image radar contient, pour chaque pixel, une information sur la phase du signal de retour. En comparant les différences de phase par interférométrie entre des paires d'images collectées à des instants différents, on peut calculer le déplacement de chaque pixel entre les deux images dans la direction de la prise de vue [B.AKROUR, 1998].



Figure I.3 : Exemple de radars interférométriques

Les principaux avantages de cette technique sont :

- La mesure sans contact et d'une zone vaste permettant un aperçu global de la zone à mesurer ;
- Pas de nécessité d'accéder sur la zone à ausculter pour matérialiser les points à mesurer ;
- Capteur tous temps (peu influencé par les conditions atmosphériques).

Les principales limitations sont :

- Les déplacements peuvent être interprétés uniquement dans la direction de la mesure ;
- L'appareil est en général positionné dans une zone dite stable. Les logiciels les plus courants ne proposent pas de rattachement à des cibles de référence.
- Appareil onéreux et interprétation immédiate difficile.

I.4.6 Procédé géodésique

Pour déterminer les déplacements planimétriques et altimétriques, il est préférable d'utiliser les mesures géodésiques. À partir des techniques de positionnement terrestre ou spatial, on peut d'établir un réseau géodésique précis et homogène, couvrant toute la zone d'étude. La méthode de réitération des observations à des époques différentes sur le même réseau, permettre de déceler les mouvements apparus pendant ces époques. Il s'agit de faire une comparaison entre les données obtenues à différentes époques sur le réseau lui même pour déduire les déformations subies par ce réseau au cours du temps.

Les points qui sont à l'intérieur de la zone d'étude sont utilisés pour déterminer les déplacements relatifs, est suffisant dans le cadre de la surveillance courante. L'évolution des déformations et des valeurs de déplacements absolues sont requis dans le cas d'un comportement particulier. A cet effet, le système propre à l'ouvrage (réseau cibles) est complété par un espace de référence (réseau d'auscultation). Ce dernier est surveillé par un espace de référence étendu (réseau de base).

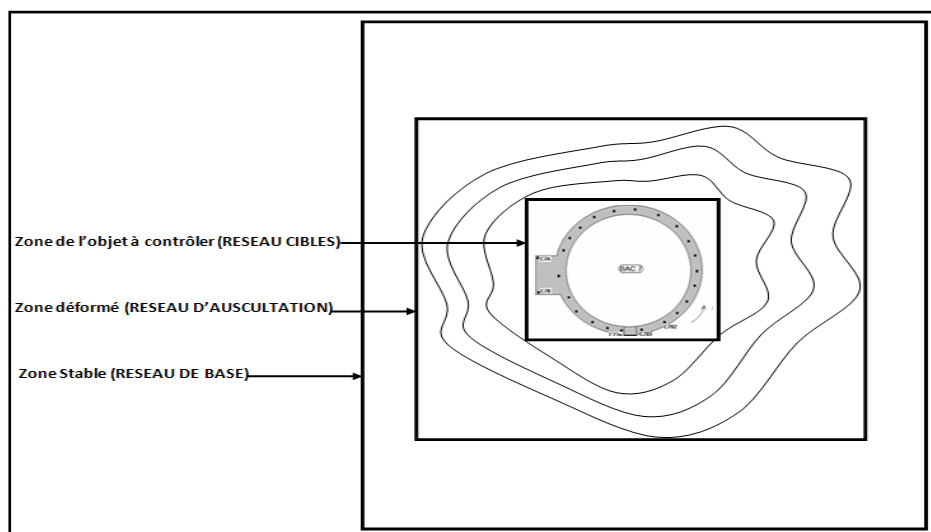


Figure I.4 : Les différents réseaux de mesures géodésiques

En géodésie, on peut déterminer les différents déplacements planimétriques et altimétriques par rapport à un réseau de référence composé de plusieurs stations. Cette technique présente l'avantage de déterminer des déplacements absolus.

I.5 Mouvements de l'ouvrage et son voisinage

L'évaluation des mouvements des réseaux d'auscultation et de cibles repose sur la détermination des vecteurs de déplacement et des tenseurs de déformations.

Un réseau est un ensemble de points physiquement liés à la croûte terrestre, dont on décrit la position définie par des coordonnées exprimées dans un système géodésique unique. On différencie certains types de réseau, à savoir :

- ✓ **Canevas planimétrique (bidimensionnel)** : il est établi par des techniques terrestres qui reposent sur la mesure d'angles horizontaux et de distances (triangulation, polygonation, cheminement, etc.).
- ✓ **Canevas altimétrique (unidimensionnel)** : ensembles de points matérialisés de façon durable par des repères déterminés (en altitude) par nivellement direct ou nivellement indirecte.
- ✓ **Canevas tridimensionnel** : il est réalisé par des techniques spatiales qui sont basées sur des mesures satellitaires, comme le GPS qui fait parti, aujourd'hui, de la panoplie des outils dédiés aux travaux géodésiques et topographiques.
- ✓ **Canevas photogrammétrique** : il est établi par des techniques de photogrammétrie aérienne et terrestre qui consiste, à partir des mesures effectuées sur des clichés de photographies stéréoscopiques, à déterminer les coordonnées des points en s'appuyant sur un petit nombre de points connus en position et sur les photographies.

Dans notre étude d'auscultation, nous avons utilisé le canevas tridimensionnel.

I.6 Canevas tridimensionnel

Ce canevas est basé sur l'utilisation des observations issues des satellites artificiels plus évoluées et plus précises, permet de donner la position tridimensionnel cartésiennes (X, Y, Z) ou géographiques (λ , ϕ , h) de tout objet situé sur ou au voisinage de la surface terrestre à n'importe quel moment et n'importe quel lieu indépendamment des conditions météorologiques. En effet, les impératifs de développement économique et l'existence des outils performants, comme le GPS,

rendent nécessaire la maîtrise et la mise en œuvre de ces nouvelles techniques et leur application aux travaux de mise en place de canevas géodésiques spécifiques (auscultation d'ouvrage et de site industriels, surveillance sismique, réseaux géodésiques et cadastraux, etc.).

Le système GPS fournit un positionnement précis tridimensionnel dans le système géodésique mondial WGS84 et il offre des performances beaucoup plus intéressantes que les techniques classiques compte tenu des critères suivants :

- ✓ Délais d'exécutions très courts ;
- ✓ Fiabilité des résultats (canevas d'appui précis et homogène) ;
- ✓ Système tout temps et continu ;
- ✓ Absence des contraintes d'intervisibilité ou de répartition géométrique ;
- ✓ Positionnement en temps réel.

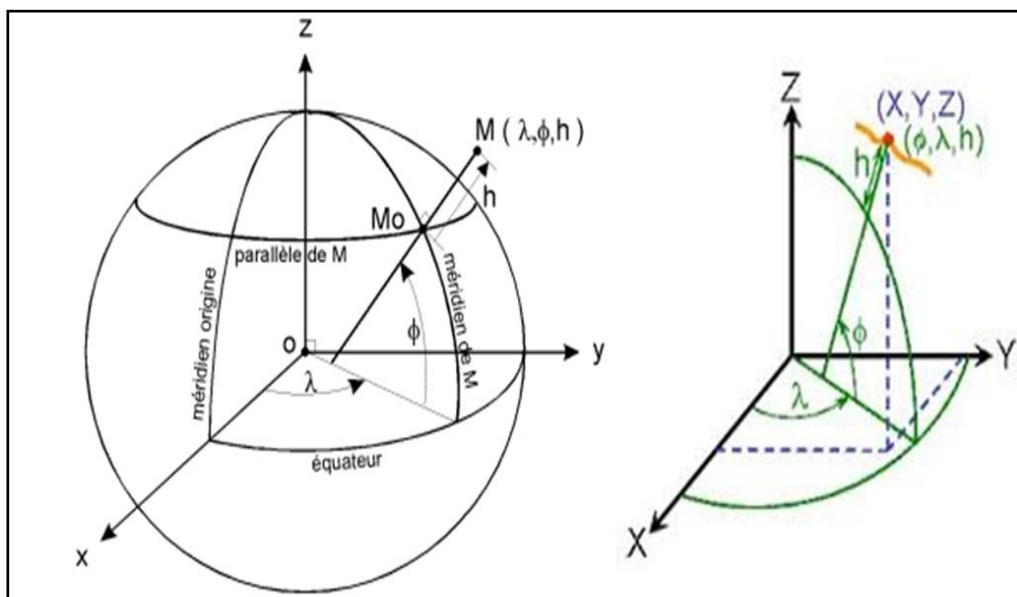


Figure I.5 : Coordonnées cartésiennes, coordonnées géographiques

La technique GPS exige que les stations doivent être choisies sur des sites assez dégagés (pas d'obstructions du signal, bonne configuration géométrique des satellites, minimisation de l'effet du multi trajet, etc.).

I.7 Analyse des déformations

L'amplitude des déformations auxquelles on souhaite accéder est de l'ordre du millimètre. Les résultats obtenus par l'auscultation sont principalement des séries temporelles de coordonnées des points mesurés.

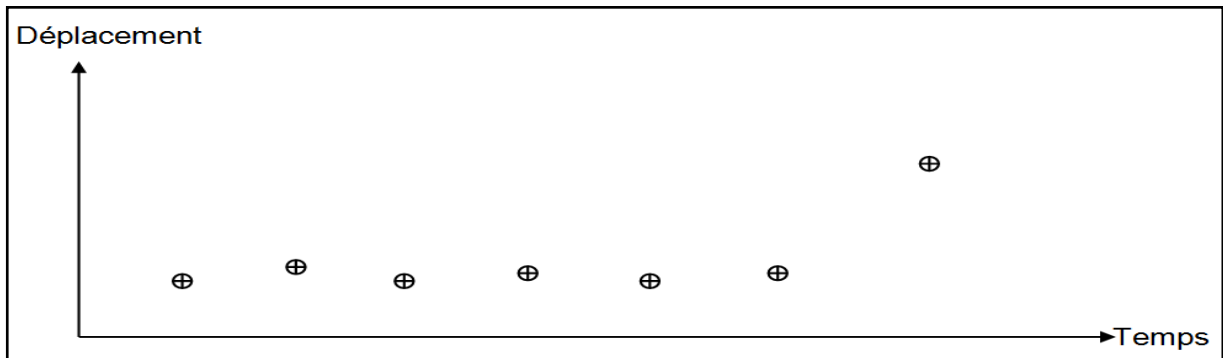


Figure 1.6 : Série temporelle d'un point ausculté

La figure 1.6 représente de manière simplifiée la position d'un point en fonction du temps. Bien que l'on puisse supposer que le dernier point montre une déformation, il est impossible de le vérifier. Il faut donc regarder les précisions sur les coordonnées calculées.

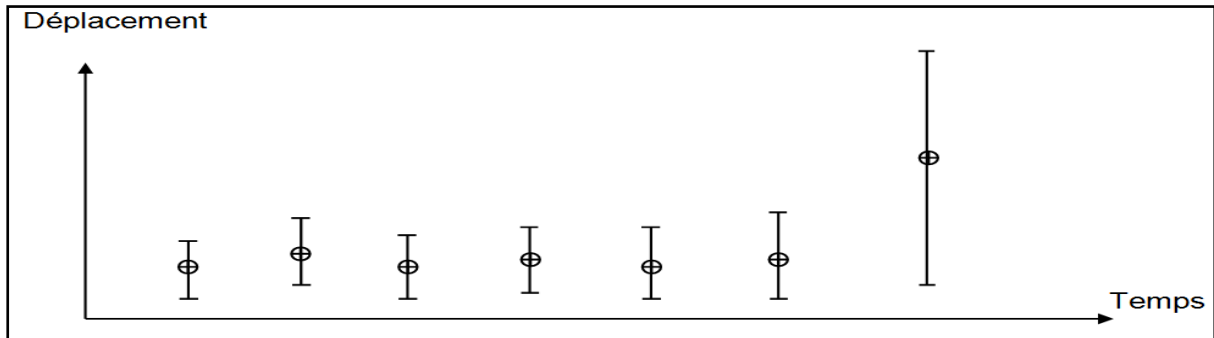


Figure 1.7 : Série temporelle d'un point ausculté avec des barres d'erreurs

La figure 1.7 reprend les points de la figure 1.6 en y ajoutant des barres d'erreurs importantes. Si l'on regarde le dernier point, on peut observer qu'au vu de la barre d'erreur importante le point ne montre pas une déformation mais plutôt une erreur dans la mesure.

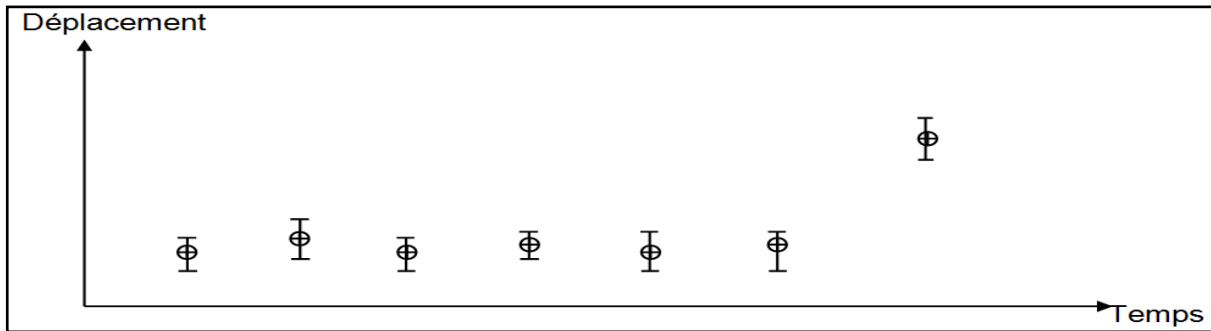


Figure 1.8 : Série temporelle d'un point ausculté avec des barres d'erreurs fines

La figure 1.8 reprend les points de la figure 1.7 et on remplace les barres d'erreurs par des barres d'erreurs plus fines. Si l'on regarde le dernier point, on peut observer qu'au vu de la barre d'erreur affinée le point montre une déformation.

Ceci confirme qu'il est nécessaire d'améliorer la précision des résultats et pas uniquement leur exactitude.

1.8 Conclusion

Il n'existe pas de méthodologie générale d'auscultation applicable à tous les ouvrages d'art. Le choix de la méthode d'auscultation est en fonction de la nature des désordres constatés. On a l'habitude de distinguer les investigations selon qu'elles s'intéressent au matériau ou à la structure :

- ✓ apprécier l'état ou les propriétés des matériaux en place, (matériaux constitutifs de l'ouvrage et/ou des terrains avoisinants) ;
- ✓ analyser le mode de fonctionnement réel de la structure ou d'un de ses éléments, à vide et/ou sous chargements.

Le pré-diagnostic permet de s'orienter vers des méthodes d'auscultation du matériau ou de la structure, mais assez souvent, ces deux natures d'investigations existent dans une même campagne d'auscultation.

II.1 Introduction

Le système NAVSTAR (Navigation System by Timing And Ranging), aussi appelé GPS (Global Positioning System) est un système de positionnement par satellites conçu, mis en service et maintenu par la NGA service de l'US DoD (Ministère de la Défense des Etats-Unis), déclaré opérationnel le 08 décembre 1993 [F.Duquenne, 2005].

Il fournit instantanément des informations de position, de vitesse et de temps rapidement et avec précision à n'importe quel endroit sur la terre, n'importe quelle heure et par n'importe quelles conditions météorologiques.

Le système GPS a été développé pour le remplacement du système de positionnement Transit qui présente une couverture satellitaire insuffisante et une précision faible en navigation.

Il offre un champ d'applications très vaste dans les domaines de : l'établissement des réseaux géodésiques, détermination du géoïde, navigation maritime, auscultations des ouvrages d'art....etc. il importe donc aux utilisateurs de comprendre quelles techniques qui leur permettent d'atteindre la précision souhaitée.

II.2 Différentes composantes du système GPS

Le système GPS est composé de trois segments principaux :

- ✓ Le segment spatial (space segment) ;
- ✓ Le segment de contrôle (contrôle segment) ;
- ✓ Le segment utilisateur (user segment).

II.2.1 Segment spatial

Le segment spatial GPS se compose d'une constellation de satellites transmettant des signaux de radio à usagers. Les Etats-Unis s'engagent à maintenir la disponibilité d'au moins 24 satellites GPS opérationnels, 95% du temps depuis 1994. Actuellement, la constellation comprend 32 satellites opérationnels avec une meilleure couverture dans la plupart des régions du monde [GPS.gov, 2014]. Cette constellation satellitaire est répartie dans 6 plans orbitaux quasi-circulaires décalés de 60° entre eux, avec une inclinaison de 55° par rapport à l'équateur.

II.2.2 Segment de contrôle

Le secteur de contrôle au sol gère le système de satellites sur une base permanente. Ce segment pilote et surveille le système grâce à 5 stations de contrôle au sol et 10 stations de poursuite GPS servant de référence à la constellation [GPS.gov 2014].

Les stations de surveillance enregistrent en continu les signaux GPS sur les fréquences L1 et L2, effectuent des mesures météorologiques et envoient les données à la station maîtresse située à Colorado Springs.

La station principale de Colorado Springs centralise toutes les informations provenant des autres stations et qui procède au calcul quotidien des éphémérides et des paramètres correctifs d'horloge, prédits et envoyés aux stations de transmission qui retransmettent les informations du message GPS aux satellites.

II.2.3 Segment utilisateur

Le secteur utilisateur représente l'ensemble de tous les utilisateurs (récepteurs) civils et militaires du système GPS. Les récepteurs sont capables de mesurer les signaux émis par les satellites et d'en déduire par calcul les solutions de position, de vitesse et/ou de temps. Presque tous les appareils de poursuite GPS se composent des mêmes éléments de base : une antenne et un récepteur.

Un récepteur doit être capable de :

- Sélectionner plusieurs satellites parmi ceux qui sont visibles et acquérir les signaux GPS correspondants ;
- Poursuivre les satellites sélectionnés (tracking) ;
- Extraire le message de navigation et calculer les solutions de position/temps.

Il existe trois types de récepteurs :

- Récepteurs monofréquence qui enregistrent les signaux de la fréquence L1 ;
- Récepteurs bi-fréquence qui enregistrent les signaux des fréquences L1 et L2 (pour corriger l'effet ionosphérique).
- Récepteurs triple-fréquence qui enregistrent les signaux des fréquences L1, L2, et L5.

Signal GPS

Les signaux GPS sont émis en permanence par les satellites de la constellation en direction de la surface de la terre et dérivés une fréquence fondamentale $f_0 = 10.23$ MHz, à partir de laquelle l'émetteur génère deux ondes porteuses :

$L_1 = 10,23 \text{ Mhz} \times 154 = 1575,42 \text{ Mhz}$, avec une longueur d'onde $\lambda_1 = 19,03 \text{ cm}$;

$L_2 = 10,23 \text{ Mhz} \times 120 = 1227,60 \text{ Mhz}$, avec une longueur d'onde $\lambda_2 = 24,40 \text{ cm}$.

Après la modernisation du GPS, chaque satellite GPS diffusera un troisième signal L_5 de fréquence $f_5 = 1176,45 \text{ Mhz}$ et de longueur d'onde $\lambda_5 = 25,40 \text{ cm}$.

Ces fréquences L_1 et L_2 sont modulées par des codes pseudo-aléatoires avant d'être envoyées vers la terre :

- Le code C/A (Code Approché ou code Approximatif) : code civil non classifié accessible à tout utilisateur, et modulé à 1.023 MHz ($f_0/10$), transmis uniquement par la porteuse L_1 . Nommé ainsi par le SPS (Standard Positioning Service).
- Le code P (Code Précis ou code Protégé) : code militaire de fréquence identique à la fréquence fondamentale, l'accès n'est accessible qu'aux utilisateurs autorisés, module les deux ondes porteuses L_1 et L_2 . Nommé ainsi par le PPS (Precise Positioning Service).

Message de navigation

Il est composé d'une suite de 1500 bits réparties sur 5 blocs de 300 bits chacun, transmis à la fréquence de 50 Hz avec une durée de 30 secondes, et contient les informations relatives à la constellation GPS [Jean-Baptiste Henry] :

- Le temps GPS, défini par le numéro et le temps de semaine ;
- Les éphémérides, comprenant les paramètres utiles au calcul de la position du satellite émetteur à une dizaine de mètres près ;
- Les almanachs, contiennent les informations que les éphémérides, à une précision moindre, et concernent l'ensemble de la constellation ;
- Les coefficients d'un modèle mondial de correction ionosphérique ;
- Des informations sur l'état de la constellation ;

II.3 Types de mesures

II.3.1 Mesure de pseudo-distance (code)

Le principe consiste à déterminer en temps réel la distance géométrique entre le satellite et le récepteur qui permet d'établir instantanément la position grâce aux satellites GPS, par la connaissance du temps de parcours du signal émis par le satellite jusqu'à son arrivée à un récepteur sur la terre et la vitesse de propagation qui presque égale à la vitesse de la lumière dans le vide.

La mesure de pseudo-distance nécessite la connaissance des codes pseudo-aléatoires (C/A et P), et la comparaison des codes transmis par le satellite et leur réplique générée par le récepteur.

L'équation d'observation de pseudo-distance est donnée par :

$$P_r^s = \rho_r^s + d\rho + C (dt^s - dt_r) + d_{ion} + d_{trop} + \varepsilon_p + \varepsilon_{mp}$$

Où :

$$\rho_r^s = \sqrt{(X_r - X^s)^2 + (Y_r - Y^s)^2 + (Z_r - Z^s)^2}$$

P_r^s : Pseudo distance entre le récepteur **r** et le satellite **s** (m).

ρ_r^s : Distance géométrique entre le récepteur **r** et le satellite **s** (m).

$d\rho$: Erreur d'orbite (m).

d_{ion} : Retard ionosphérique (m).

d_{trop} : Retard troposphérique (m).

ε_{mp} : Erreur due au multi-trajet (m).

ε_p : Erreur due au bruit du récepteur (m).

dt_r : Décalage de l'horloge récepteur/ temps référence GPS (s)

dt_s : Décalage de l'horloge satellite/ temps référence GPS (s)

C : Vitesse de la lumière dans l'atmosphère (m /s).

II.3.2 Mesure de phase

La mesure de phase s'exploite directement sur les deux ondes porteuses L1 et L2, dont le principe consiste à mesurer la différence entre la phase du signal du satellite reçu à l'instant t_s et la phase du signal générée par le récepteur à l'instant t_r .

Le problème consiste à déterminer l'ambiguïté N qui est le nombre entier inconnu de cycles de l'onde porteuse (L1 et L2) entre le satellite et le récepteur au moment de la première mesure. Il est indispensable de fixer cette ambiguïté.

L'équation d'observation de phase est :

$$\phi = \rho + d\rho + c(dts - dtr) + dtrop - dion + \varepsilon_{p\phi} + \varepsilon_{m\phi} + N \cdot \lambda$$

Où :

ϕ : Mesure de phase en (m).

ρ : distance satellites récepteurs en (m).

$d\rho$: Erreur d'orbite (m).

$\varepsilon_{m\phi}$: Erreur de multi-trajet sur la phase (m).

$\varepsilon_{p\phi}$: Bruit du récepteur de la mesure de phase (m).

λ : Longueur d'onde de la porteuse en (m)

N : Ambiguïté entière (nombre de cycles)

$dion$: Retard ionosphérique (m).

$dtrop$: Retard troposphérique (m)

II.4 Combinaison linéaires des mesures de phase

II.4.1 Les différences

L'utilisation des différences (simple, double ou triple) des observations de phase dans les traitements, permet d'éliminer certaines erreurs liées aux horloges (satellite et récepteur), de réduire d'autres (effets troposphériques, ionosphériques, erreur orbite) et d'améliorer la précision.

a) Simple différence

C'est la différence de mesure de phase entre deux récepteurs observant simultanément le même satellite. Cette différence permet d'éliminer le décalage d'horloge satellite, et de réduire l'influence des autres erreurs.

Les récepteurs i et k observent le même satellite j au même instant t, et on forme la simple différence :

$$\Delta\phi_{ik}^j = \phi_i^j - \phi_k^j = \Delta\rho_{ik}^j + \Delta d\rho_{ik}^j + C\Delta dtr_{ik}^j + \Delta dtrop - \Delta dion + \Delta\varepsilon_{p\emptyset} + \Delta\varepsilon_{m\emptyset} + \lambda\Delta N_{ik}^j$$

Après la différentiation, les erreurs spatialement corrélées (erreur d'orbite et effet de l'atmosphère) sont réduites, l'erreur de l'horloge du satellite est éliminée, alors que les erreurs non corrélées (ou indépendantes) sont amplifiées. L'erreur de l'horloge du récepteur persiste toujours et elle est couplée à une nouvelle inconnue qui est l'ambiguïté N, ce qui explique que la différence simple est rarement utilisée.

b) Double différence

La double différence est la technique la plus utilisée dans la plupart des logiciels. C'est la différence de deux simple différences à un instant donné entre deux satellites et deux récepteurs. Elle permet d'éliminer les erreurs d'horloges des récepteurs, de réduire les effets atmosphériques et des orbites.

Les stations i et k observent les mêmes satellites j et l au même instant t, la double différence devient :

$$\begin{aligned}\nabla\Delta\phi_{ik}^{jl} &= \Delta\phi_{ik}^j - \Delta\phi_{ik}^l = (\phi_i^j - \phi_k^j) - (\phi_i^l - \phi_k^l) \\ \nabla\Delta\phi_{ik}^{jl} &= \nabla\Delta\rho_{ik}^{jl} + \nabla\Delta d\rho_{ik}^{jl} + \nabla\Delta dtrop - \nabla\Delta dion + \nabla\Delta\varepsilon_{p\emptyset} + \nabla\Delta\varepsilon_{m\emptyset} + \lambda\nabla\Delta N_{ik}^{jl}\end{aligned}$$

Pour le même récepteur, l'erreur d'horloge des différents canaux est la même, elle peut donc être éliminée en effectuant la différence entre deux satellites. Donc, la double différence de phase de la porteuse est l'observation la plus utilisée pour le positionnement relatif précis.

c) Triple différence

C'est la différence entre deux doubles différences rattachées à la même constellation mais à des instants différents. Cette méthode permet d'éliminer les ambiguïtés entières de la phase.

La triple différence est d'ailleurs un des moyens efficaces de détection des sauts de cycles. Par contre cette relation n'est pas utilisée dans les programmes de calculs

car les équations qui en résultent forment un système dont les équations sont trop corrélées [C. ERICKSON, 1993].

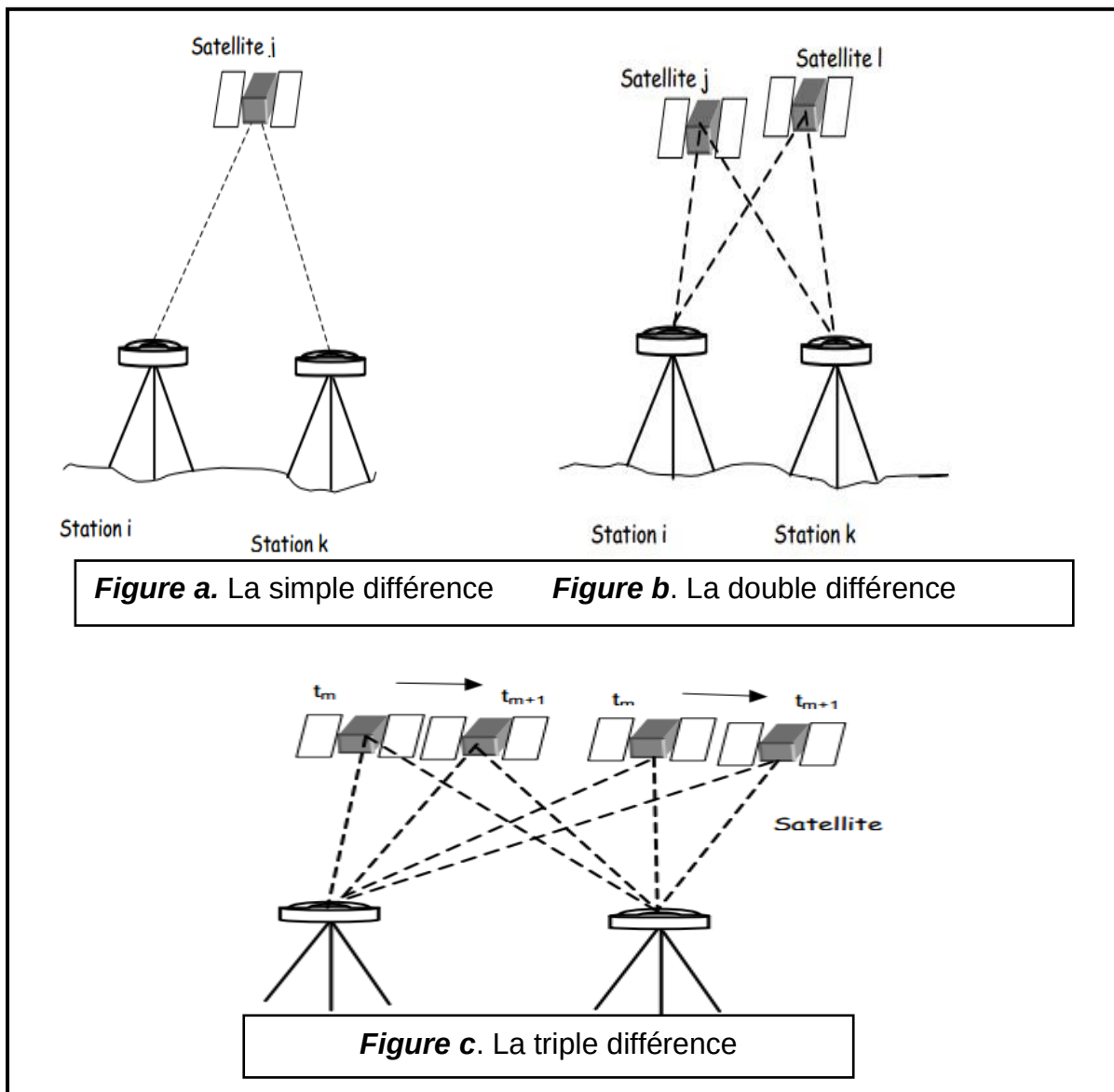


Figure II.9 : Les trois différences

II.4.2 Combinaisons linéaires

La combinaison de deux mesures de phase ϕ_1 et ϕ_2 permet de construire de nouveaux observables GPS qui peuvent être utilisées en fonction de l'application envisagée et des conditions d'observation.

Une combinaison linéaire des deux observations de phase peut être définie comme suit [F.Duquenne, 2005] :

$$\phi = n_1 \phi_1 + n_2 \phi_2$$

Où n_1, n_2 sont des nombres arbitraires. Ceci s'exprime aussi en fonction des fréquences f_1 et f_2 par :

$$\phi = n_1 f_1 t + n_2 f_2 t$$

D'où la fréquence de la combinaison : $f = n_1 f_1 + n_2 f_2$

Et sa longueur d'onde : $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{c}{n_1 f_1 + n_2 f_2}$

Les combinaisons fréquemment utilisées dans les logiciels GPS sont :

a) Combinaison Ionosphere-free (L1C)

Les coefficients n_1 et n_2 sont respectivement $\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$ et $\frac{-f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$

D'où :

$$\phi_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \phi_2$$

Les observations de phase ϕ sont exprimées en mètre.

Cette combinaison corrige l'effet ionosphérique, et donne une combinaison non entière des ambiguïtés [F.Duquenne, 2005]. Elle est très utilisée pour la détermination des grands réseaux.

b) Combinaison Wide-Lane (L1-L2)

La combinaison linéaire Wide-Lane (exprimée en cycle) est décrite de la manière suivante :

$$\phi_{L1-L2} = \phi_1 - \phi_2$$

$$\phi_{WL} = \frac{f_1}{f_1 - f_2} \phi_1 - \frac{f_2}{f_1 - f_2} \phi_2$$

Combinaison dont la longueur d'onde est relativement grande (plus de quatre fois la longueur d'onde des signaux porteurs) et est utilisée pour la résolution et la fixation des ambiguïtés à leurs valeurs entières exactes.

Si nous considérons que la double différence de la mesure de phase entre les récepteurs (k et l) et les satellites (i et j), et négliger les sources d'erreurs dans l'équation d'observation de phase, la combinaison linéaire de Wide-Lane peut être formulée comme suit :

$$\phi_{kl, L1-L2}^{ij} = \rho_{kl, L1-L2}^{ij} + N_{kl, L1-L2}^{ij}$$

Avec :

$\rho_{kl, L1-L2}^{ij}$: Terme relatif à la géométrie ;

$N_{kl, L1-L2}^{ij} = N_{kl, L1}^{ij} - N_{kl, L2}^{ij}$: Ambiguïté de Wide-Lane.

$\lambda_{L1-L2} = \frac{c}{f_1 - f_2} = 0,862 \text{ m}$ Longueur d'onde de Wide-Lane.

L'inconvénient de cette combinaison est qu'elle augmente le bruit de mesure.

c) Combinaison Narrow-Lane (L1+L2)

La combinaison linéaire Narrow-Lane (exprimée en cycle) est décrite de la manière suivante :

$$\phi_{L1+L2} = \phi_1 + \phi_2$$

Utilisant l'équation d'observation de phase exprimée en cycle, on obtient :

$$\phi_{kl, L1+L2}^{ij} = \rho_{kl, L1+L2}^{ij} + N_{kl, L1+L2}^{ij}$$

Avec :

$N_{kl, L1+L2}^{ij} = N_{kl, L1}^{ij} + N_{kl, L2}^{ij}$: Ambiguïté de Narrow-Lane.

$\lambda_{L1+L2} = \frac{c}{f_1 + f_2} = 0,107 \text{ m}$ Longueur d'onde de Narrow-Lane.

La combinaison de Narrow-Lane est utilisée dans le traitement de très courtes bases où la fixation des ambiguïtés devient possible. Elle est moins bruitée que L1, tandis que l'effet de l'ionosphère est amplifié (multiplié par un facteur de 1,28).

d) Combinaison L1&L2C

"L1&L2C" assemble l'emploi de la combinaison Ionosphère-Free "L1C" avec la résolution des ambiguïtés "L1&L2" (L1&L2 est une option de traitement offerte par certains Logiciels tel que Winprism, dans laquelle les observations L1 et L2 sont considérées comme des mesures indépendantes) [A.HAMICI, et al 2014].

La combinaison "L1&L2C" est recommandée pour le traitement des lignes de base de l'ordre de 30 km, toute fois elle peut être utilisée pour des lignes de base allant jusqu'à 100 km en cas de faible activité ionosphérique.

II.5 Modes de positionnement par GPS

II.5.1 Positionnement autonome (absolu)

Dans ce mode de positionnement, l'utilisateur muni d'un seul récepteur, en temps réel, mesure la distance entre son récepteur et plusieurs satellites à l'aide des codes

C/A ou P générés par les satellites. Les éphémérides du satellite transmises par le message permettent de calculer sa position dans un repère terrestre à l'instant de l'observation [MEHIMMEDETS.S, 2003]. Trois satellites sont donc nécessaires pour obtenir un point intersection des trois sphères, mais en réalité quatre satellites sont indispensables afin de tenir compte de l'erreur de synchronisation de l'horloge du récepteur avec le temps de référence du GPS.

Ce type de positionnement est peu précis de quelques mètres, voire quelques dizaines de mètres. L'intérêt de cette méthode est la possibilité d'exploiter en temps réel les mesures du code et l'obtention d'une position instantanée. Son utilisation principale est la navigation terrestre ou maritime.

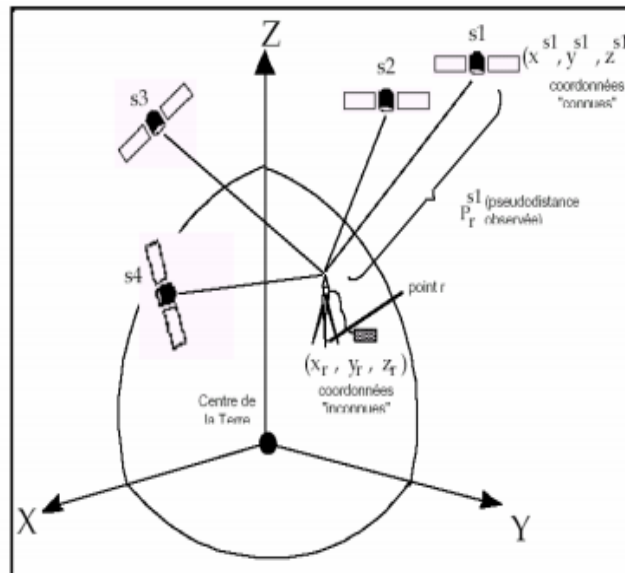


Figure II.10 : Positionnement absolu (autonome)

II.5.2 Positionnement autonome précis (PPP)

Le PPP est une méthode qui effectue la détermination de position précise à l'aide d'un seul récepteur GPS, grâce aux mesures de phases et de code en post traitement. Il consiste alors à déterminer les orbites précises des satellites GPS ainsi que les corrections d'horloge des satellites avec une précision équivalente au centimètre [C.MILCENT, 2013].

Ces données peuvent être appliquées pour réduire évidemment les erreurs dans les orbites des satellites GPS et les horloges, les deux sources d'erreur les plus importantes dans le positionnement par GPS. Le principe de PPP est :

- ✓ Utilise des modèles précis des horloges satellites dans le traitement ;
- ✓ Estime l'erreur horloge récepteur dans la solution obtenue par moindres carrés;
- ✓ Utilise les deux types de mesures (de phases et de pseudo-distances).

II.5.3 Positionnement relatif

Le positionnement relatif est défini par la présence d'au moins deux récepteurs GPS observés simultanément les mêmes satellites afin déterminer les coordonnées précises d'un point. Le principe de ce mode est que les coordonnées d'un récepteur en un point inconnu sont établies relativement à celles d'un récepteur en un point connu dans un système de référence mondial WGS84.

Le résultat est le vecteur entre les deux récepteurs qu'on appelle la ligne de base.

Soient deux stations (i connue et j inconnue) :

Déterminer (j) par rapport à (i).

Calcul du vecteur de la ligne (ij) :

$$\vec{B}_{i \rightarrow j} = \begin{bmatrix} X_j - X_i \\ Y_j - Y_i \\ Z_j - Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta X_{ij} \\ \Delta Y_{ij} \\ \Delta Z_{ij} \end{bmatrix}$$

Ce mode est utilisé pour les applications de géodésie et de mesures précises car la précision obtenue est de l'ordre du millimètre.

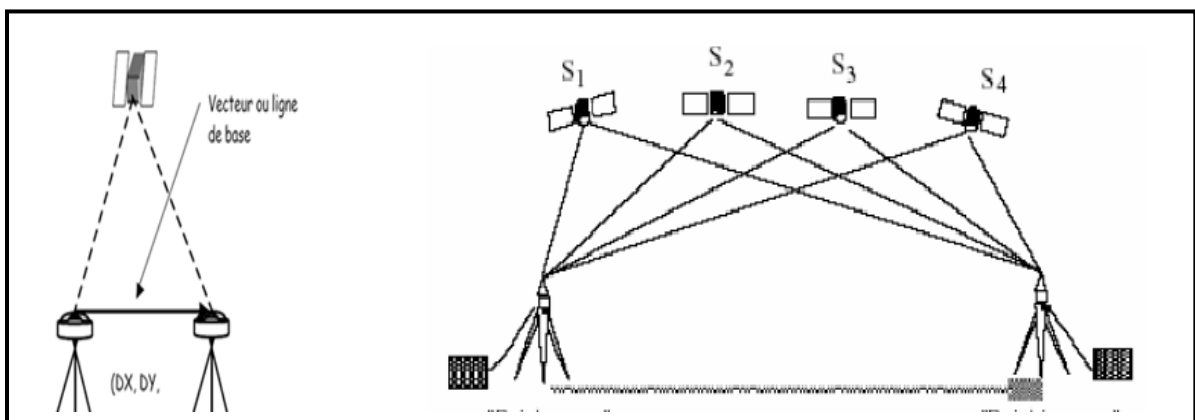


Figure II.11 : Positionnement relatif

II.6 Modes d'observations GPS

Il existe différents mode de positionnement en différentiel sur satellite GPS, consiste à observer et à calculer une ligne de base entre deux récepteurs. Les principaux modes de positionnement utilisés sont :

II.6.1 Le mode statique géodésique

Le mode statique est la méthode de base des observations GPS géodésiques dont le principe consiste à enregistrer simultanément au niveau de chaque station fixe les observations de phase sur au moins quatre satellites.

Le résultat est un positionnement relatif (ligne de base) et le temps d'observation doit être suffisant pour résoudre les ambiguïtés entières et dépend de la longueur de la ligne de base, de la géométrie de la constellation des satellites (GDOP), des conditions atmosphériques, et la précision recherchée.

Par expérience, la durée d'observation est d'au moins une heure pour des lignes de bases courtes (< 15 km) et est de plusieurs heures pour les lignes de bases longues [F.Duquenne, 2005].

Malgré que la durée d'observation soit longue, le mode statique reste le plus précise et offre la meilleure précision (quelques millimètres).

II.6.2 Le mode statique rapide

C'est une variante qui a été créé dans le but d'améliorer le temps d'observation en mode statique par la mise au point d'algorithmes de résolution rapide des ambiguïtés entières. Ce mode est valable généralement pour des lignes de bases inférieurs à 15 km avec quatre satellites ou plus (cinq seraient souhaitables) observés, les ambiguïtés pouvaient être résolues en quelques minutes par des récepteurs bi-fréquences.

Le principe de ce mode est de choisir une station de référence dite « pivot » sur laquelle un récepteur mesure en contenu, tandis que des récepteurs mobiles se déplacent sur les autres stations en observant quelques minutes (de 5 à 10 minutes) sur chacune d'elles [C. ERICKSON, 1993].

Cette méthode reste rapide et économique avec une précision de 5 à 10 mm±1ppm en présence un nombre suffisant de satellites supérieur ou égale à cinq dans des conditions atmosphériques favorables [F. ALLAM, 2009].

II.6.3 Le mode cinématique

C'est une technique qui consiste à observer une chaîne de points pour lesquels les ambiguïtés sont communes (il y a une seule résolution d'ambiguïtés pour un nombre important de points) [M.MEKHANFER, et al 2004]. Le principe de ce mode est basée sur la mesure de phase d'au moins quatre satellites (de préférence cinq ou plus) en utilisant un récepteur fixe sur un point connu et enregistre en contenu les observations, tandis que les autres récepteurs se déplacent sur les points à déterminer.

Ce mode exige au démarrage la phase d'initialisation pour résoudre les ambiguïtés entières qui sont fixées sur le point de référence, puis les autres points sont calculés avec ces ambiguïtés fixes à chaque époque toutes les quelques secondes en conservant le signal sur les satellites.

Cette méthode est très bien accordée aux levés des routes, tout réseau rectiligne et trajectoires d'objets en mouvement. La précision est de l'ordre de $1\text{ cm} \pm 2\text{ ppm}$ [F.ALLAM, 2009].

II.6.4 Le mode semi-cinématique (Stop & Go)

Le mode Stop & Go appelé aussi « arrêt-déplacement » est une véritable technique cinématique correspond à un type particulier du levé cinématique puisque le récepteur mobile s'immobilise en un point, puis se rend au point suivant et ainsi de suite. Ce mode facilite la détermination d'un grand nombre de points (lever des détails) sur des périodes très courtes.

Il nécessite au moins deux récepteurs, l'un est désigné comme récepteur de référence qui reste fixe sur un point connu, et l'autre désigné comme mobile (ROVER), se déplace d'un point à positionner à l'autre en gardon le signal avec au moins quatre satellites. Avant que le récepteur mobile ne commence à se déplacer, les ambiguïtés entières pour tous les satellites doivent être résolus et le récepteur mobile doit maintenir un verrouillage du signal d'au moins quatre satellites pendant les déplacements ce qui présente une contrainte. Si le signal est perdu, l'observateur peut avoir à retourner au dernier point connu, où les ambiguïtés peuvent de nouveau être résolues.

Dans ce mode, la manière de se déplacer entre les points est quelconque car le récepteur mobile n'enregistre pas la trajectoire, il permet juste d'observer les points.

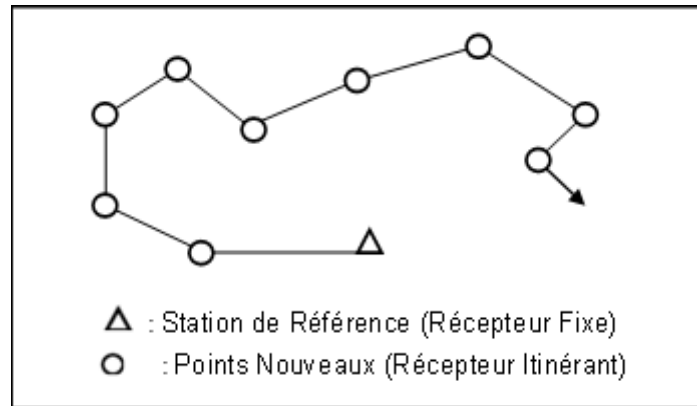


Figure II.12 : Observation en mode Stop & Go

II.6.5 Le mode cinématique en temps réel (RTK)

Le positionnement GPS en mode cinématique en temps réel (RTK : *Real Time Kinematic*) est une technique de positionnement par satellite basée sur l'utilisation de mesures de phase des ondes porteuses des signaux émis par les satellites.

Ce mode nécessite l'utilisation de deux récepteurs GPS (l'un est stationnaire à une station de base dont la position est connue précisément, tandis que l'autre est mobile) qui communiquent entre eux par une liaison radio.

Cette méthode nécessite un levé d'ambiguïté préalable à l'exploitation des données puisque est un aspect essentiel de tout système cinématique, en particulier en temps réel, une fois les ambiguïtés entières sont fixés à leurs valeurs exactes, les mesures de phases sont utilisées comme des mesures de pseudo-distances très précises et non ambiguës pour déterminer, époque par époque, la position du récepteur mobile.

III.1 Introduction

Avant d'être acheminé jusqu'au consommateur final, le gaz naturel liquéfié (GNL) transite par des sites de stockage installés près des gisements ou des zones de consommation.

Le stockage du gaz permet de répondre aux attentes des producteurs et des consommateurs. Il permet de pallier aux aléas de l'offre et de la demande, largement utilisé depuis les années cinquante par les pays industrialisés fortement consommateurs d'hydrocarbures [S.AMEUR, 2009].

Le gaz naturel est stocké dans des réservoirs conçus à cet effet dans des sites de stockage dits « aériens » ou dans des sites de stockage dits « souterrains ».

Aujourd'hui, le stockage du gaz naturel constitue un maillon logistique incontournable pour assurer l'équilibre énergétique d'un pays.

III.2 Présentation du bac de stockage souterrain de GNL

Le complexe GL4/Z se situe en zone industrielle près de la ville Arzew, limité à l'est par la mer méditerranée, au nord et l'Ouest par la ville d'Arzew et au sud par la zone industrielle.

La zone d'étude concerne le terrain du voisinage du réservoir en sol gelé du terminal méthanier du complexe SONATRACH GL4/Z d'Arzew. Ce bac construit en 1965 avec une capacité d'environ 38.000 m³, était le seul stockage souterrain en exploitation dans le monde. Il représentait pour le complexe plus de 50% de ses capacités en stockage [A KHOUDIRI, et al 2011].

Le réservoir a un diamètre de 37.20 mètres et une profondeur de 36 mètres ; il se situe à 50 mètres environ du bord de la Mer et à 40 km d'Oran sur une superficie de 75 Ha.

L'objectif de cet usine est de liquéfier le gaz naturel de HASSI R'MEL pour permettre son transport sous forme liquide à pression atmosphérique et à une température de -161°C puis transporté dans des navires citernes spécialement aménagés appelés méthanier.

La caractéristique principale de ce type de stockage est l'absence d'isolation et de barrière d'étanchéité sur les parois verticales et le fond. Seul le gel de l'eau contenue dans le sol assure son imperméabilité. Ce type de stockage ne peut être réchauffé sans se détruire [M.AGGOUDA EL MAHDI, 2005].

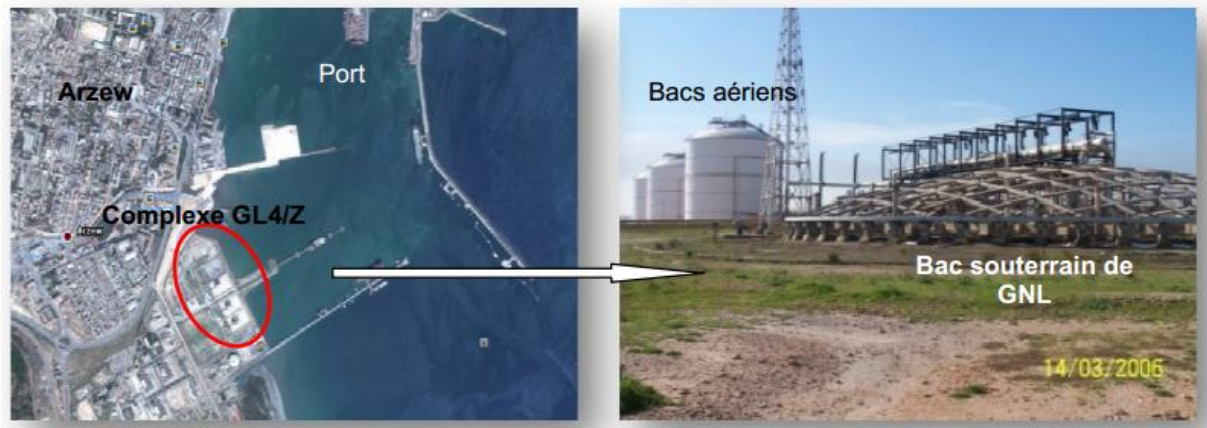


Figure III.13 : bac de stockage souterrain de GNL (GL4/Z- Arzew)

III.3 Méthodologie d'auscultation géodésique du bac de GNL par GPS

Il est conseillé d'adapter ce type de réservoir à l'auscultation par GPS puisqu'il donne une précision allant au millimètre près.

Les mesures géodésiques permettent d'obtenir des déplacements planimétriques et altimétriques. La méthodologie employée consiste à établir, grâce à des techniques de positionnement terrestre ou spatial, un réseau géodésique précis et homogène, couvrant toute la zone d'étude. Donc, il s'agit de comparer les données obtenues à différentes époques sur un réseau géodésique pour en déduire les déplacements subies par ce réseau au cours du temps.

La méthodologie d'auscultation par GPS est résumée comme suit :

III.3.1 Implantation du réseau de base (réseau de garde)

Le choix et l'implantation du réseau de base se fait sur des sites de terrain stable et très loin de l'ouvrage, et les matérialiser par des bornes en béton avec une altitude presque identique à celle de la hauteur du bac afin de minimiser l'erreur troposphérique.

III.3.2 Implantation du réseau cibles

Pour un meilleur choix des points cibles, il faut respecter les critères suivants :

- ✓ Distribution homogène des points cibles selon la forme et le type d'ouvrage.
- ✓ Une bonne matérialisation des points.

Dans notre cas, et vu la structure supérieure du bac de stockage, la répartition des points cible est sous forme de couronne.

Les cibles (piquet, plaque en métal,...) doivent être matérialisées sur l'ouvrage et sur son voisinage immédiat (zone de contact avec l'ouvrage), d'une manière durable avec une configuration optimale. Ce réseau servira au suivi du comportement du l'ouvrage.

III.3.3 Observations et traitements

- **Opération 0 (époque T_0)** : observations et ajustement des coordonnées tridimensionnelles des points des réseaux d'auscultation et de cibles en mode statique qui servira de configuration de référence.
- **Opération i (époque T_i)** : afin de quantifier les déplacements planimétrique et altimétrique de l'ouvrage par rapport à la configuration de référence, il faut déterminer les positions des points des réseaux d'auscultation et cibles à partir d'une nouvelle session d'observations. Cette nouvelle configuration servira de configuration de référence pour la prochaine opération d'auscultation ($i+1$).

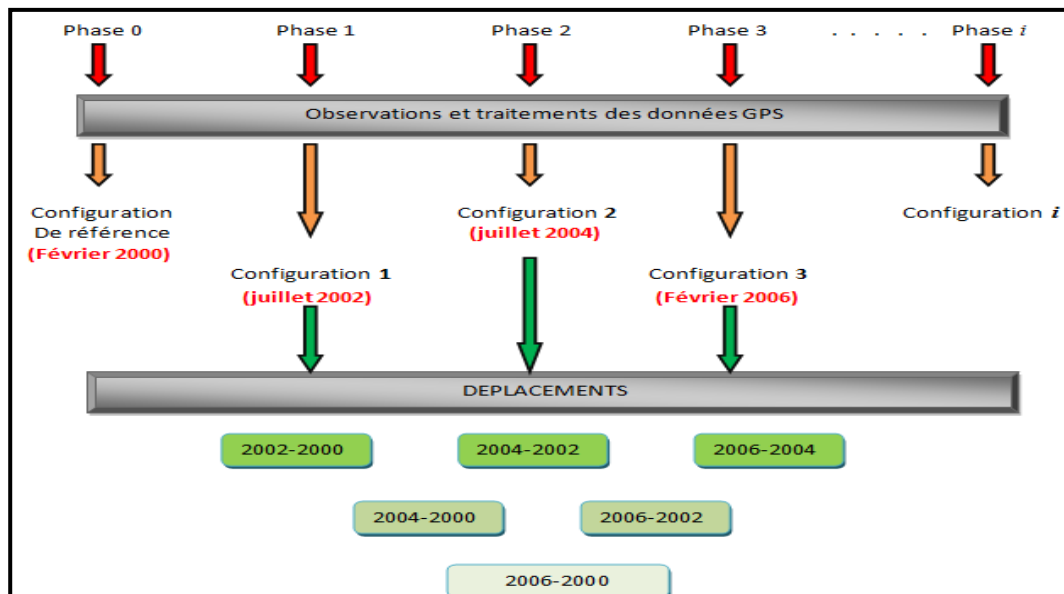


Figure III.14 : Méthodologie d'auscultation

III.3.4 Stratégie et processus de déroulement de la mission

L'étude du réseau d'auscultation du bac de stockage de GNL en sol gelé du complexe GL4Z/ARZEW est exécutée en quatre étapes principales (planification d'une mission GPS, matérialisation des points sur site, observations, et traitement des données GPS).

III.3.4.1 Planification de la mission

La planification est une tâche essentielle préparée en fonction de plusieurs facteurs principalement la précision exigée. Elle consiste à répondre aux critères suivants :

- ✓ Visualiser graphiquement les satellites observés en fonction des coordonnées approchées du lieu ;
- ✓ Définir la date et l'heure d'observation idéale ainsi que l'angle d'élévation des satellites ;
- ✓ Indiquer également le nombre et les numéros de tous les satellites visibles avec les facteurs de précision;

Reconnaissance

La reconnaissance sur le terrain consiste à collecter les documents et les données concernant la zone de travail.

Le but de la reconnaissance est de rechercher les possibilités maximales offertes par la zone d'étude. C'est une consultation visuelle permettant de donner une idée générale sur le site pour que le réseau d'auscultation soit économique et homogène.

Les critères fondamentaux du choix d'un site GPS sont :

- ✓ Eviter les obstacles et localiser dans une zone dégagée ;
- ✓ Localiser le site sur un sol stable, et éviter les zones à des glissements de terrain ;
- ✓ Choisir un endroit où l'accès est possible (déplacement rapide) ;
- ✓ Eviter les lignes de haute tension aux environs du point stationné.

III.3.4.2 Configuration du réseau géodésique

a) Les points à stationner

Après la reconnaissance, la configuration finale du canevas d'auscultation du bac de stockage est composée de quatre types de réseaux :

- **Réseau de garde** : constitué de deux points (AB29, AB41) situés environ à 1 km de l'ouvrage dans une zone stable appartenant à la zone industrielle d'ARZEW et trois repères de nivellement. Il sert comme un réseau d'appui pour le réseau d'auscultation.

- **Réseau d'auscultation** : représente le réseau de base (référence) pour l'auscultation périodique du bac, il est composé de 15 bornes en béton implantées à quelque dizaine de mètres du bac de stockage.
- **Réseau de cibles** : composé de 42 cibles collées sur le couronnement du bac, il matérialise la structure apparente de l'ouvrage à ausculter.
- **Réseau de repères secondaires** : il est constitué de 56 piquets bétonnés situés au voisinage du bac de stockage sur un terrain stable, et 19 plaques métalliques scellées sur le trottoir entourant le bac.

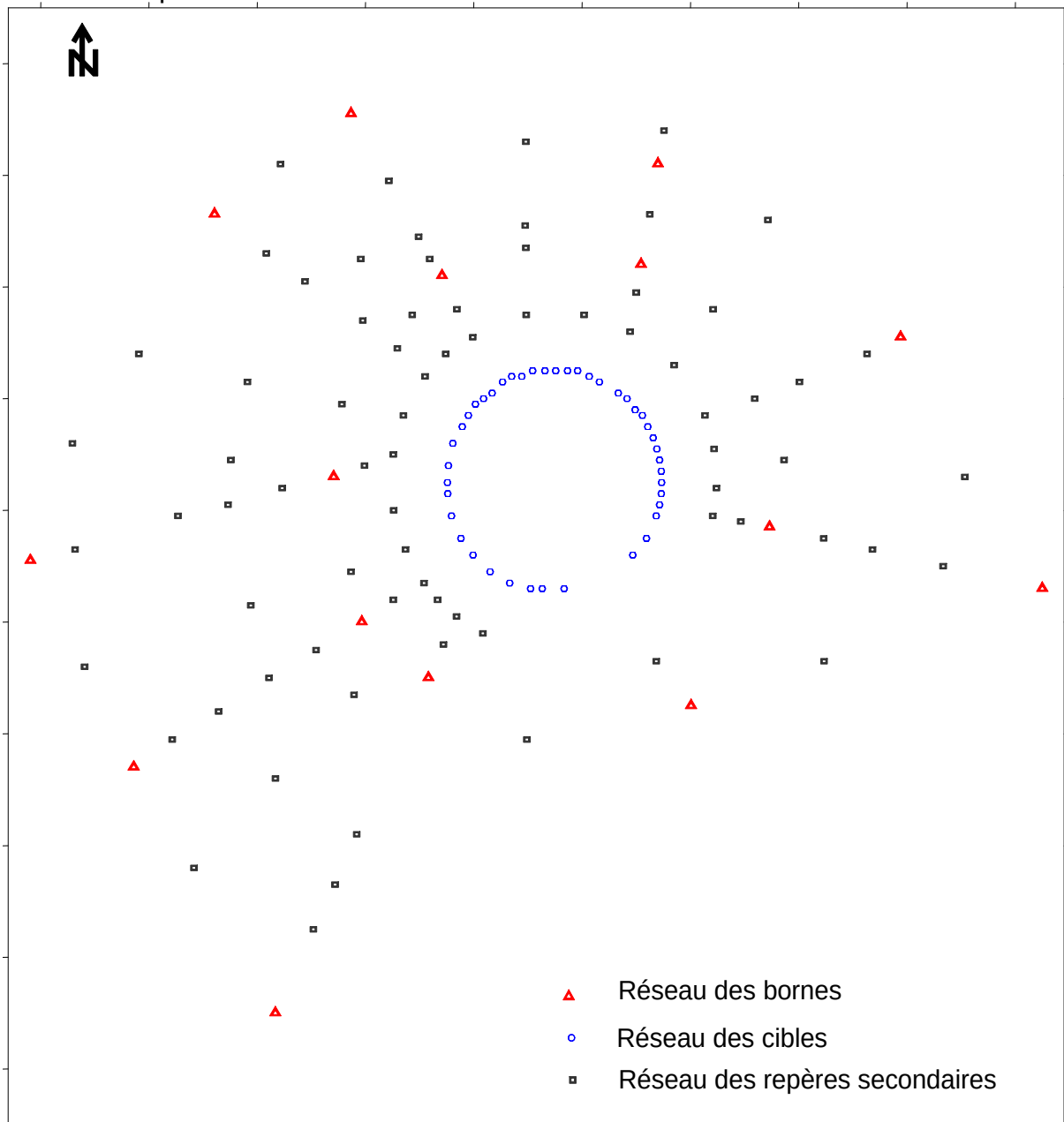


Figure III.15 : Schéma du canevas global d'auscultation

b) Matérialisation des bornes

Le bornage ou repérage d'un réseau d'auscultation intéresse la conservation et l'identification du point géodésique. Il a pour but d'assurer la permanence du réseau.

La matérialisation au sol d'un point géodésique comporte un repère souterrain noyé à la surface d'un radier de béton et une borne très dure en béton.

Ces bornes en béton sont cylindriques, ancrées et enterrées dans du béton. Elles sont peintes afin qu'elles soient facilement repérables. Les différents types de matérialisation est illustré par les schémas suivants :

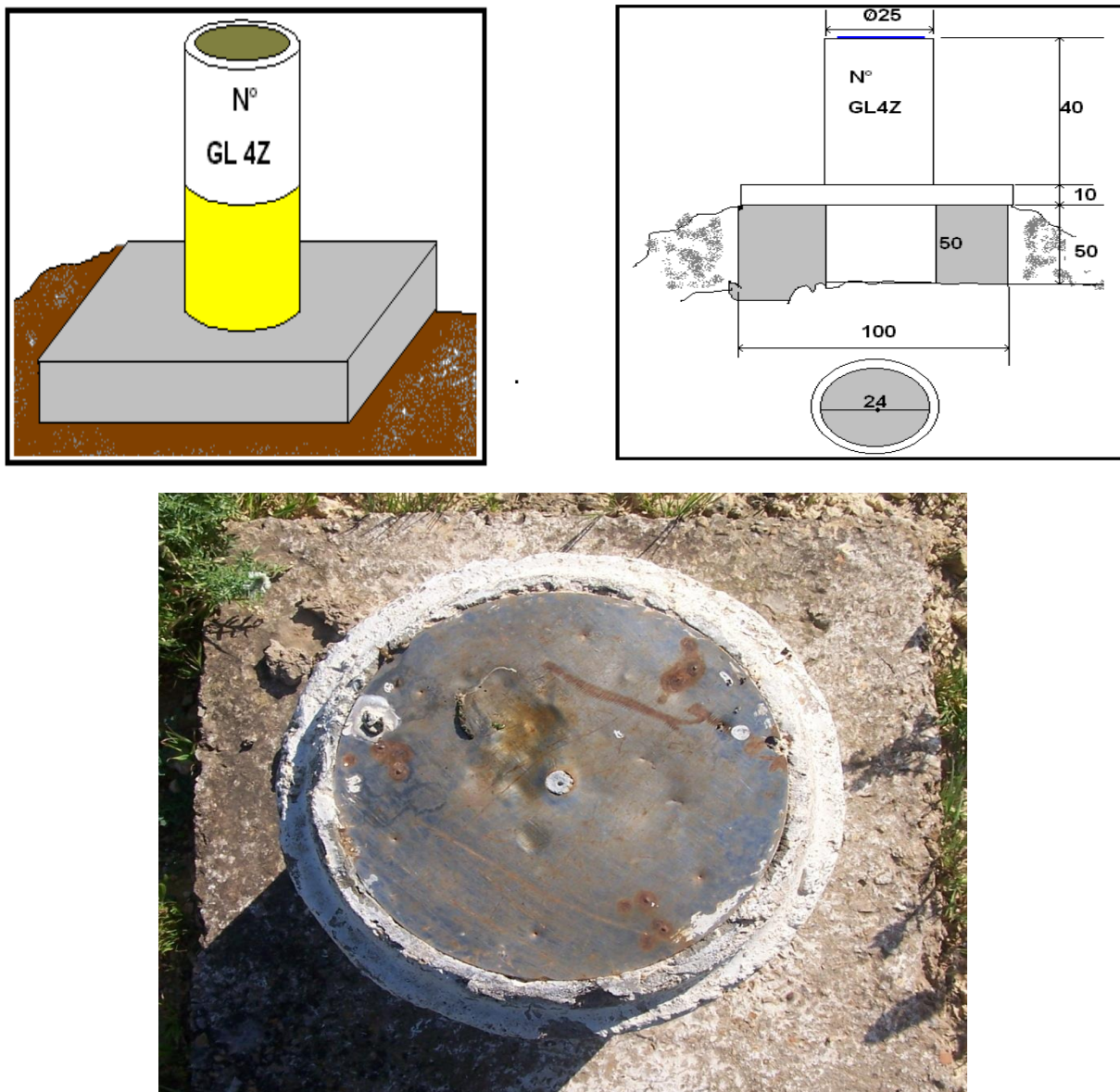


Figure III.16 : Schéma, Caractéristiques et photo de la borne

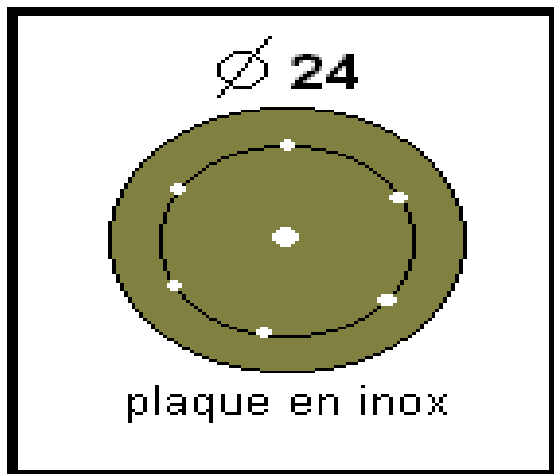


Figure III.17 : Schéma, caractéristiques et photo des cibles



Figure III.18 : Disposition des cibles sur la couronne du bac

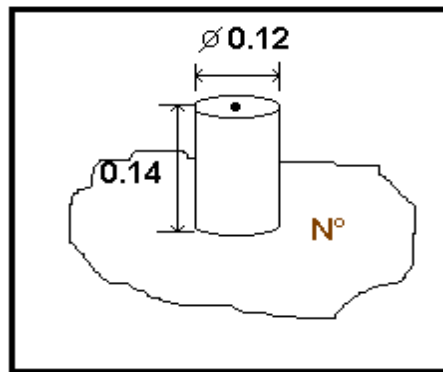


Figure III.19 : Schéma, caractéristiques des piquets bétonnés

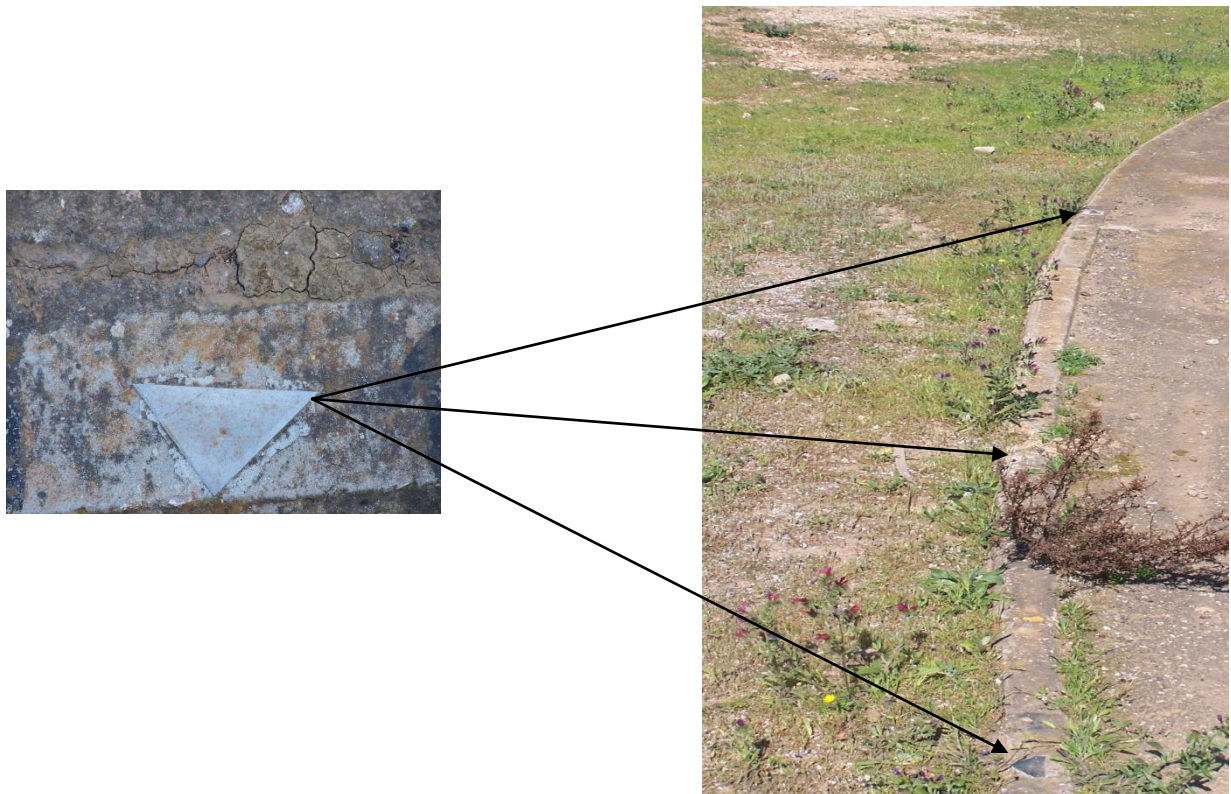


Figure III.20 : Disposition des chutes sur le trottoir entourant le bac

III.3.4.3 Observations sur le terrain

La campagne d'observation par GPS utilisée pour l'auscultation géométrique du bac se compose de quatre récepteurs GPS bifréquences Ashtech Z-12 et Logiciel de traitement des données GPS WINPRISM. Cette campagne en mode statique est composée de plusieurs sessions d'observations et chaque session comprend trois stations au minimum.



Figure III.21 : Borne avec antenne Ashtech Z-XII3

Afin d'assurer le transfert et le contrôle de la qualité des observations, le prétraitement est effectué ligne de base par ligne de base et session par session de chaque journée d'observation.

Calendrier des observations GPS effectuées en 2000

Rattachement

Semaines GPS	Jour GPS	Journée	Session	Points observés
1050	57	26/02/2000	A	AB29, AB41, B06 B14

Tableau III.1 : Calendrier d'observations GPS du réseau de garde

Réseau d'auscultation ou réseau de base

Semaines GPS	Jour GPS	Journée	Session	Points observés
1050	53	22/02/2000	A	B01, B02, B03, B04
1050	53	22/02/2000	B	B02, B04, B05, B06
1050	53	22/02/2000	C	B05, B06, B07, B08
1050	53	22/02/2000	D	B07, B08, B09
1050	53	22/02/2000	E	B08, B09, B10
1050	54	23/02/2000	A	B08, B10, B11, B12
1050	54	23/02/2000	B	B11, B12, B13, B14
1050	54	23/02/2000	C	B01, B13, B14, B15
1050	54	23/02/2000	D	B01, B02, B03, B15

Tableau III.2 : Calendrier d'observations GPS du réseau de base

Les cibles

Semaines GPS	Jour GPS	Journée	Session	Points observés
1051	58	27/02/2000	B	B01, B06, C39, C40
1051	58	27/02/2000	C	B01, B06, C38, C41
1051	59	28/02/2000	A	B01, B06, C37, C42
1051	59	28/02/2000	B	B01, B06, C01, C36
1051	59	28/02/2000	C	B01, B06, C02, C35
1051	59	28/02/2000	D	B01, B06, C03, C34
1051	59	28/02/2000	E	B01, B06, C04, C33
1051	59	28/02/2000	F	B01, B06, C05, C32
1051	60	29/02/2000	A	B01, B06, C06, C31
1051	60	29/02/2000	B	B01, B06, C07, C30
1051	61	01/03/2000	A	B01, B06, C08, C29
1051	61	01/03/2000	B	B01, B06, C09, C28
1051	61	01/03/2000	C	B01, B06, C10, C27
1051	64	04/03/2000	A	B01, B06, C11, C26
1051	64	04/03/2000	C	B01, B06, C13, C24
1051	64	04/03/2000	D	B01, B06, C12, C25
1051	64	04/03/2000	E	B01, B06, C14, C23
1052	65	05/03/2000	A	B01, B06, C15, C22
1052	65	05/03/2000	B	B01, B06, C16, C21
1052	65	05/03/2000	C	B01, B06, C17, C20
1052	65	05/03/2000	D	B01, B06, C18, C19

Tableau III.3 : Calendrier d'observations GPS du réseau de cibles

Les chutes

Semaines GPS	Jour GPS	Journée	Session	Points observés
1053	074	14/03/2000	A	B06, H01, H02
1053	074	14/03/2000	B	B06, H03, H04
1053	074	14/03/2000	C	B06, H05, H06
1053	074	14/03/2000	D	B06, H07, H08
1053	074	14/03/2000	E	B06, H09, H10
1053	074	14/03/2000	F	B06, H11, H12
1053	074	14/03/2000	G	B06, H13, H14
1053	074	14/03/2000	H	B06, H15, H16
1053	074	14/03/2000	I	B06, H17, H18
1053	074	14/03/2000	J	B06, H01, H19

Tableau III.4 : Calendrier d'observations GPS du réseau de chutes

Les repères

Semaines GPS	Jour GPS	Journée	Session	Points observés
1049	44	13/02/2000	A	B01, B06, P31, P32
1049	44	13/02/2000	B	B01, B06, P33, P34
1049	44	13/02/2000	C	B01, B06, P35, P36
1049	44	13/02/2000	D	B01, B06, P37, P38
1049	44	13/02/2000	E	B01, B06, P39, P40
1049	44	13/02/2000	F	B01, B06, P41, P42
1049	44	13/02/2000	G	B01, B06, P43, P44
1049	44	13/02/2000	H	B01, B06, P45, P46
1049	44	13/02/2000	I	B01, B06, P47, P48
1049	44	13/02/2000	J	B01, B06, P49, P50
1049	44	13/02/2000	K	B01, B06, P51, P52
1049	44	13/02/2000	L	B01, B06, P53, P54
1049	44	13/02/2000	M	B01, B06, P55, P56
1052	67	07/03/2000	A	B01, B06, P01, P02
1052	67	07/03/2000	B	B01, B06, P03, P04
1052	67	07/03/2000	C	B01, B06, P05, P06
1052	67	07/03/2000	D	B01, B06, P07, P08
1052	67	07/03/2000	E	B01, B06, P09, P10
1053	72	12/03/2000	A	B01, B06, P11, P12
1053	72	12/03/2000	B	B01, B06, P13, P14
1053	72	12/03/2000	C	B01, B06, P15, P16
1053	72	12/03/2000	D	B01, B06, P17, P18
1053	72	12/03/2000	E	B01, B06, P19, P20
1053	72	12/03/2000	F	B01, B06, P21, P22
1053	72	12/03/2000	G	B01, B06, P23, P24

1053	72	12/03/2000	H	B01, B06, P25, P26
1053	72	12/03/2000	I	B01, B06, P27, P28
1053	72	12/03/2000	J	B01, B06, P29, P30

Tableau III.5 : Calendrier d'observations GPS du réseau des repères

Remarque : Cette opération observée et traitée en 2000 a servi comme configuration de référence pour les opérations effectuées en 2002, 2004, et 2006.

IV.1 Description du récepteur Ashtech Z-XII3

Le récepteur GPS Ashtech Z-XII3 est un récepteur géodésique de bonne qualité et bi-fréquence capable de mesurer tous les codes disponibles (pseudo-distances) et les deux phases porteuses ($L1$ et $L2$) envoyés par les satellites observés.

Il comprend 12 canaux et 13 écrans d'affichage. Cette génération de récepteur Ashtech Z-XII exploite tous les messages diffusés et permet d'observer dans des environnements fortement perturbés par des émissions d'ondes radioélectriques comme les émetteurs radio, ligne à haute tension ...etc.

L'alimentation énergétique du récepteur GPS Ashtech Z-XII 3 est assurée par une batterie de 12V, d'une autonomie d'environ trois heures avec possibilité d'en brancher deux à la fois, il fonctionne sous des conditions très défavorables qui sont :

- ✓ La température comprise entre -20°C et 55°C ;
- ✓ L'humidité de 100% ;
- ✓ L'altitude maximale de 18.3 km ;
- ✓ A une vitesse de 1852 km/h.

Cette génération de récepteurs Z-XII 3 permet notamment des observations de lignes de bases d'une minute par mile (1 mn/ 1,6 km) grâce à la pleine observation et à l'exploitation de tous les messages diffusés actuellement (code P et Y) [MEHIMMEDETSI.S, 2003].



Figure IV.22 : Récepteur GPS Ashtech Z-XII3

IV.2 Description de l'antenne Ashtech Z-XII3

L'antenne Ashtech est un outil de réception assurant la transition de signaux émis par les satellites vers le récepteur. Elle est reliée au récepteur par un câble de dix mètres (avec, en option, des câbles de 2m, 30m et 60m).

L'antenne Ashtech est une antenne micro-bande, à dipôles plats, en forme de ruban tendus au-dessus d'un plan conducteur ; elle est aussi dotée d'une aiguille aimantée pour l'orientation en vue de réduire l'erreur due à la variation du centre de phase.



Figure IV.23 : Antenne Ashtech Z-XII3

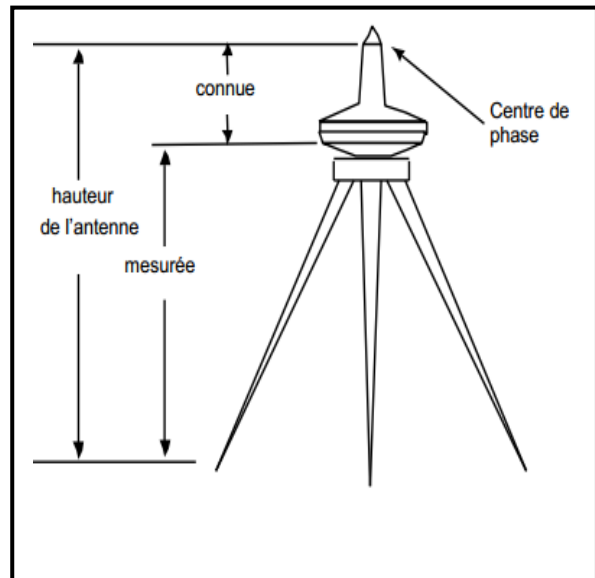


Figure IV.24: Hauteur de l'antenne

✓ hauteur de l'antenne

La hauteur de l'antenne est la distance verticale entre le repère et le centre de phase de l'antenne. La mesure de cette hauteur s'effectue par la mesure de la distance verticale entre le repère et la base de l'antenne, puis on ajoute le décalage connu (fourni par le fabricant) entre la base de l'antenne et son centre de phase.

Puisqu'il est difficile de faire une mesure directe suivant la verticale, on peut effectuer la mesure de la hauteur suivant une oblique, puis calculer la distance verticale au moyen du théorème de Pythagore. Autrement dit,

$$\text{Hauteur mesuré} = \sqrt{(\text{hauteur oblique})^2 - (\text{rayon à l'antenne})^2}$$

d'où : $H_i = \sqrt{H_p^2 - r^2}$ avec $r = 0.173 \text{ m}$ (cas d'une antenne de type Ashtech)

IV.3 Description sommaire du logiciel de traitement Winprism

Winprism est un Logiciel commercial conçu pour traiter les données collectées par les récepteurs GPS et GLONASS. Il fonctionne sous Windows sur des micro-ordinateurs de types PC et permet un accès aux menus par des icônes.

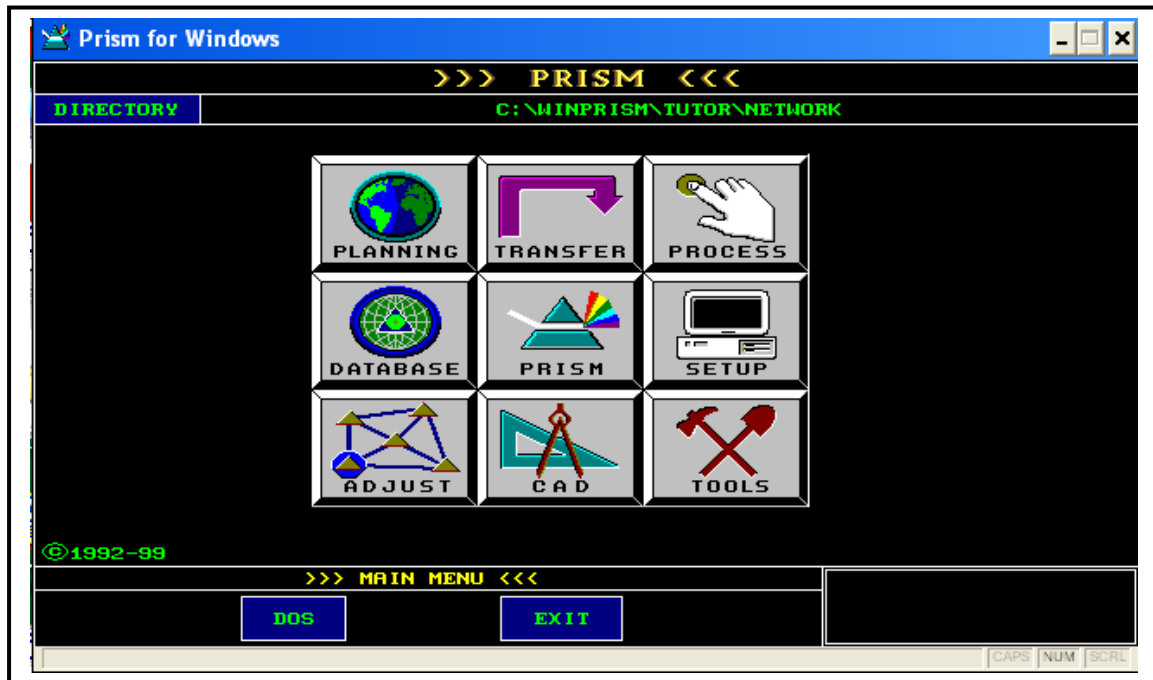


Figure IV.25 : Menu principal de Winprism

Comme tout logiciel de traitement, le Winprism utilise plusieurs fenêtres permettant l'accès facile à une suite de modules.

Les principaux modules de Winprism sont :

IV.3.1 Module PLANNING

Afin de prédire une mission d'observation par GPS, le module PLANNING permet de :

- ✓ Visualiser graphiquement les satellites observés en fonction des coordonnées approchées du lieu ;
- ✓ Définir la date et l'heure d'observation idéale ainsi que l'angle d'élévation des satellites ;
- ✓ Indiquer également le nombre et les numéros de tous les satellites visibles avec les facteurs de précision;

IV.3.2 Module TRANSFER

Les données enregistrées, dans chaque récepteur, sont transférées sur un micro-ordinateur à l'aide du câble de transfert de données (RS232) liant le récepteur à l'ordinateur en utilisant le module **TRANSFER** du logiciel WINPRISM.

Une fois le bloc de données transféré et avant d'effectuer une sauvegarde (flash disque , disque dur,...) on procède à une vérification stricte des données, à savoir :

- ✓ L'Identification des points ;
- ✓ Les coordonnées des points fixés ;
- ✓ Les hauteurs d'antennes ;

Les données transférées sont représentées par les fichiers suivants :

- **E-FILE** : ce fichier contient les éphémérides des satellites qui sont utilisés pour le calcul de la position des satellites à partir des paramètres d'orbite et des corrections d'horloge.
- **B-FILE** : c'est un fichier binaire contiennent les époques, les satellites, les mesures de phase, de code, etc.
- **S-FILE** : c'est un fichier ASCII contenant les informations sur le site observé telles que les numéros des stations, le matériel utilisé, les hauteurs des antennes, etc.

IV.3.3 Module PROCESS

Le module de prétraitement à travers l'icône **PROCESS** permet de faire un traitement de toutes les combinaisons de lignes de base en choisissant le mode de traitement et les paramètres de calcul. Ce traitement s'effectue comme suit :

- a. Choisir le fichier des données à traiter en utilisant l'icône **DIRECTORY**.
- b. Définir le mode de positionnement : **STATIC** (statique), **PSEUDO** (pseudo cinématique) ou **KINEMATIC** (cinématique).
- c. La fenêtre **EDIT PROJECT** permet de :
 - ✓ Choisir les points à traiter ;
 - ✓ Fixer les points connus en coordonnées comme des références ;
 - ✓ Introduire les hauteurs des antennes ;
 - ✓ Définir les différents paramètres météorologiques à savoir la température humide et séché, pression et le taux d'humidité relative.

- d. La fenêtre **EDIT RUNTIME** donne le choix des différents paramètres utilisés dans le traitement tels que :
 - ✓ Mode de traitement (automatique, L1 Only, L2 Only, L1C, L1+L2,...) ;
 - ✓ Modèle troposphérique de Winprism ;
 - ✓ Angle d'élévation minimale ;
 - ✓ Type des orbites radiodiffusées ou précises.
- e. La fenêtre **TOOLS** : permet de faire :
 - ✓ Conversion des données transférées au format RINEX ;
 - ✓ Transformation entre les différents systèmes géographiques et de projection ;
 - ✓ Transformation entre les différents systèmes de datation (temps GPS, temps julien, etc.).
- f. L'icône **AUTOMATIC** effectue le traitement des données automatiquement, par contre la fenêtre **MANUEL** permet de calculer individuellement les lignes de base.
- g. Afficher tous les fichiers résultant du traitement par **RESULTS**.

IV.3.4 Module ADJUST

Le traitement de données par GPS est assuré par le module **ADJUST** qui permet l'accès aux programmes du réseau d'ajustement d'Ashtech : FILLNET et SNAP. C'est un module d'ajustement tridimensionnel d'un réseau de points géodésiques par moindres carrés des vecteurs ΔX , ΔY , et ΔZ . le module ADJUST permet la compensation des vecteurs de lignes de base résultant du prétraitement :

- ✓ Importer les différentes composantes de la ligne de base ΔX , ΔY et ΔZ calculées par le module PROCESS ou stockées dans le module DATABASE par le module **IMPORT** ;
- ✓ Créer le fichier d'ajustement en utilisant l'icône **MANAGER ADJUST** ;
- ✓ Editer les données relatives au point et au vecteur, fixer les stations connues par **EDIT SITE** ;
- ✓ Pour choisir les paramètres d'ajustement (type d'ajustement : libre et avec contrainte, la longitude, système de projection, etc) utiliser **SETUP** ;
- ✓ Par **AUTOMATIC**, procéder au traitement automatique de la compensation et éditer les résultats:

- Les coordonnées préliminaires ;
- les vecteurs compensés et leurs écarts types ;
- les positions compensées, bases définitives et leurs précisions.

IV.4 Traitement et analyse des données GPS

Cette partie est consacrée à l'aspect applicatif de notre étude. Il est basé sur la réitération des observations du même réseau géodésique et après un certain temps, on peut déterminer les mouvements apparus pendant cette période.

Les observations effectuées ont porté sur la détermination et la représentation des déformations dans le réseau d'auscultation du bac de stockage souterrain de GNL en sol gelé et de son voisinage immédiat. Les données utilisées sont issues des campagnes d'opérations GPS espacées de 02 deux ans chacune (Février 2000, Juillet 2002, Juillet 2004 et Février 2006).

Les principales étapes de traitement portent essentiellement sur :

- ✓ Transfert et vérification des données collectées.
- ✓ Choix des paramètres de calcul.
- ✓ Traitement des observations GPS.
- ✓ Ajustement de l'ensemble des lignes de bases.
- ✓ Transformation des coordonnées GPS (WGS 84) en coordonnées locales.

IV.4.1 Transfert et contrôle des données

Après le transfert des données, il est recommandé de vérifier l'identification des points qu'il soit unique pour chaque point GPS, les coordonnées des points fixés et les hauteurs d'antennes.

IV.4.2 Choix des paramètres de calcul

Les paramètres utilisés lors du traitement des observations GPS sont les suivants :

- ✓ Mode : statique.
- ✓ type d'éphémérides : radiodiffusées.
- ✓ modèle atmosphérique : modèle standard (Hopfield).
- ✓ type de traitement : automatique.
- ✓ Masque d'élévation : 15°.

- ✓ Intervalle de temps : 15 secondes.
- ✓ Durée d'observation : Rattachement (1 heure), réseau de base (30 minutes), les cibles (30 minutes), et les chutes (15 minutes).

IV.4.3 Processus de traitement

Le positionnement GPS précis de type géodésique nécessite un traitement en mode relatif avec au moins un point de référence supposé parfaitement connu.

Le logiciel de traitement des données GPS fournit les résultats suivants :

- ✓ Résultats par ligne de base (ΔX , ΔY , ΔZ).
- ✓ Coordonnées définitives des points.

a) Présentation du canevas d'appui

Les observations effectuées sur le terrain ont été rattachées dans le système WGS 84 en utilisant les deux points AB41 et AB29 situés environ à 1 km de l'ouvrage dans une zone stable appartenant à la zone industrielle d'ARZEW. Ces points sont eux-mêmes rattachés à la station d'ARZEW relevant du réseau précis TYRGEONET.



Figure IV.26 : Réseau de garde

Les données transférées sont traitées par la technique différentielle afin de réduire ou d'éliminer les erreurs affectant le signal GPS, une fois les lignes de bases traitées, les coordonnées peuvent être compensées à l'aide du module de compensation intégré dans le logiciel du traitement.

Point	Longitude (λ)	Latitude (ϕ)	Altitude $h_e(m)$	RMS (m)		
AB29	-0°18'26.96992"	35°50'27.38677"	53.350	0.000	0.000	0.000
AB41	-0°18'59.19312"	35°50'36.85725"	67.305	0.000	0.000	0.000
B06	-0°18'36.72957"	35°50'57.27164"	51.196	0.001	0.001	0.001
B14	-0°18'29.29233"	35°50'56.94828"	51.319	0.001	0.001	0.001

Tableau IV.6 : les coordonnées des points de rattachement

b) Présentation du canevas géodésique du bac de stockage

- Réseau de garde : 02 points GPS (AB41 et AB29)
- Réseau d'auscultation : 15 points GPS (du B01 au B15)
- Les cibles : 42 points GPS (du C01 au C42)
- Les chutes : 19 points GPS (du H01 au H19)
- Les repères : 56 points GPS (du P01 au P56)

Soit un total de 134 points

IV.4.4 Transformation entre WGS84 et Nord –Sahara

La transformation des coordonnées issues du positionnement par GPS et donc exprimés dans le système WGS84 au système local Nord Sahara en vigueur, nécessite la connaissance des paramètres de passage avec l'emploi d'un modèle adéquat.

Plusieurs modèles de transformation tridimensionnels utilisés, mais le choix du modèle de transformation requiert la disponibilité d'un jeu de données connus dans chacun des deux systèmes.

La hauteur ellipsoïdique exprimée dans Clarke 1880A et relative au système Nord-Sahara n'est pas connue. La seule donnée connue est l'altitude orthométrique (H) déterminée par des opérations de nivellement par rapport à une surface de référence des altitudes qui est le géoïde. Le calcul de la hauteur ellipsoïdique nécessite la connaissance de la hauteur du géoïde tel que : $h_e = H_{ortho} + N$

La transformation des coordonnées de notre réseau du bac de stockage est effectuée par le logiciel ALTAHOUIL 2015 version 1.0 disponible au niveau du département de géodésie spatiale.

IV.4.5 Résultats et interprétations

IV.4.5.1 Résultats obtenus

Les coordonnées cartésiennes définitives des points du canevas exprimées dans le système Nord- Sahara obtenues après la transformation, sont fournies dans les tableaux suivants :

- ✓ Tableau des coordonnées en X, Y et H en UTM Nord-Sahara pour les années (2000, 2002, 2004, 2006) ;
- ✓ Tableau des déplacements en ΔX , ΔY et ΔH pour les années (2006-2000, 2004-2002, 2002-2000) ;
- ✓ Tableau des déplacements max et min en mm.

La présentation des déplacements sous forme des:

- ✓ Graphes de la variation des déplacements planimétriques des différents réseaux ;
- ✓ Graphes de la variation des déplacements altimétriques des différents réseaux ;
- ✓ Schémas d'évolution horizontale entre les années 2000-2002 et 2000-2004 et 2000-2006 ;
- ✓ Profils en long.

Remarque importante : en raison de la nature confidentielle des points observés de notre projet, on a seulement se limiter à la présentation des résultats de traitement (les coordonnées en X, Y et H) de quelques points des réseaux.

OPERATION 2000				OPERATION 2002				OPERATION 2004				OPERATION 2006			
Site	X UTM 30	Y UTM 30	Altitude	Site	X UTM 30	Y UTM 30	Altitude	Site	X UTM 30	Y UTM 30	Altitude	Site	X UTM 30	Y UTM 30	Altitude
B01	743043,463	3970189,97	2,982	B01	743043,457	3970189,97	2,998	B01	743043,463	3970189,96	2,978	B01	743043,454	3970189,96	2,985
B15	743120,127	3970244,55	4,293	B15	743120,116	3970244,57	4,369	B15	743120,121	3970244,57	4,415	B15	743120,11	3970244,57	4,452
C01	743086,544	3970267,19	5,499	C01	743086,536	3970267,18	5,557	C01	743086,555	3970267,18	5,566	C01	743086,527	3970267,18	5,609
C42	743090,476	3970265,82	5,489	C42	743090,475	3970265,82	5,542	C42	743090,488	3970265,81	5,557	C42	743090,473	3970265,83	5,611
H01	743081,66	3970258,2	3,538	H01	743081,665	3970258,19	3,568	H01	743081,628	3970258,22	3,574	H01	743081,674	3970258,13	3,594
H18	743124,807	3970283,66	3,476	H18	743124,8	3970283,66	3,501	H18	743124,831	3970283,61	3,521	H18	743124,809	3970283,67	3,542
P01	743050,445	3970204,57	2,39	P01	743050,44	3970204,57	2,416	P01	743050,418	3970204,59	2,398	P01	743050,432	3970204,55	2,417

Tableau IV.7 : les coordonnées en X, Y et Z en UTM pour les années 2000, 2002, 2004, et 2006

	RMS (mm) pour λ , ϕ , h											
point	2000			2002			2004			2006		
B01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
B15	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000
C01	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
C42	0,000	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,001	0,001
H01	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H18	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001
P01	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tableau IV.8 : les RMS sur les points observés

	2002-2000			2004-2000			2006-2000		
Site	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔH (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔH (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔH (mm)
B01	-6	0	16	0	-9	-4	-9	-10	3
B02	-8	-1	16	-4	-8	7	-17	-9	20
B03	1	4	59	6	0	76	-9	-9	96
B04	3	8	49	13	4	57	-8	-4	91
B05	7	2	41	16	-4	67	-7	-1	95
B06	-9	3	4	-9	-3	4			
B07	-28	14	45	-43	26	89	-76	46	103
B08	3	-4	36	8	-11	69	-26	3	83
B09	-19	45	52	-26	75	113	-54	109	147
B10	28	24	78	55	36	163	65	60	196
B11	-3	1	26	-4	-1	72	-3	11	99
B12	44	37	55	89	60	127	108	89	180
B13	-6	3	41	2	-3	76	1	-1	114
B14	15	3	8	36	-2	27	43	7	52
B15	-11	20	76	-6	24	122	-17	26	159
C01	-8	-9	58	11	-10	67	-17	-7	110
C02	-6	-13	81	-1	-21	99	-13	-7	134
C03	-2	-8	52	-1	-17	63	-4	-1	111
C04	-4	-3	22	-6	-12	50	-4	5	101
C05	10	-1	13	2	-6	32	-16	13	61
C06	0	3	42	5	-10	71	-72	-26	163
C07	-10	-5	65	-13	-18	108	-11	-4	131
C08	-1	6	34	1	-1	63	-10	6	115
C09	-2	-2	51	10	-14	78	-2	-16	108
C10	-3	8	44	4	-1	72	-8	-3	114
C11	-3	-11	14	7	-6	58	-7	-12	102
C12	-7	7	41	6	-1	77	-7	-8	114
C13	-10	6	45	4	3	69	-10	-5	117
C14	-12	-5	58	4	-10	81	-9	-14	118
C15	-8	1	59	2	-11	75	-13	-7	132
C16	-3	3	89	6	-5	82	-9	-10	136
C17	-5	5	60	7	-3	72	-7	-10	128
C18	-4	2	59	7	-2	78	-10	-9	121
C19	-2	-5	59	6	-9	86	-8	-14	116
C20	-6	1	53	11	-4	52	-10	-13	99
C21	-3	0	79	8	-6	82	-7	-9	131
C22	-7	2	79	7	-3	80	-10	-3	130
C23	1	-2	59	6	-10	91	-6	-9	129
C24	-7	4	76	4	-1	88	-6	-1	123
C25	2	5	73	8	-4	82	-4	-7	112

C26	1	3	73	9	-6	92	-7	-6	120
C27	-5	9	70	9	-6	72	-5	-7	137
C28	2	5	87	16	-9	68	-7	-11	133
C29	12	9	59	18	-2	73	3	0	127
C30	2	-4	81	8	-12	97	-4	-10	147
C31	11	13	64	14	2	92	-8	9	134
C32	-7	-2	42	10	-7	63	-16	1	117
C33	-4	-6	47	16	-14	78	-6	-11	146
C34	-8	0	34	-5	-10	44	-6	-11	103
C35	-1	-7	71	12	-13	78	-1	-15	133
C36	0	-4	75	18	-5	58	-4	-6	142
C37	0	1	67	9	-14	103	-24	33	133
C38	-4	2	48	12	-13	73	-28	35	110
C40	-2	16	38	20	9	28	1	0	102
C41	-15	-4	83	-3	-8	84	-17	9	140
C42	-1	-4	53	12	-12	68	-3	4	122
H01	5	-2	30	-32	26	36	14	-63	56
H02	-4	7	53	3	-9	58	-18	-6	87
H03	6	-7	37	-33	23	36	-7	-6	67
H04	-10	11	41	2	-5	51	-22	-3	77
H05	-1	5	41	5	56	44	-17	2	78
H06	-9	-1	35	3	-6	43	-47	35	66
H07	-15	17	30	4	-48	39	-34	14	63
H08	-1	0	20	6	-5	26	-20	10	52
H09	-6	7	2	-2	-49	6	-20	14	36
H10	0	-2	19	5	-3	22	-75	10	55
H11	4	-19	5	-31	-63	13	-14	0	51
H12	1	3	-14	13	1	5	-6	18	34
H13	-1	-1	-11	48	-28	7	47	4	26
H14	6	-1	18	14	-1	37	-6	14	47
H15	-11	-16	15	11	-58	35	3	17	56
H16	6	4	32	17	-1	50	15	16	68
H17	-6	2	28	6	-5	45	42	-9	63
H18	-7	1	25	24	-46	45	2	9	66
P01	-5	-1	26	-27	24	8	-13	-14	27
P03	1	-13	91	-3	-25	103	32	-16	170
P04	10	10	59	12	0	51	-5	-2	121
P06	-21	0	82	-70	-15	102	-46	-21	175
P07	8	15	97	25	24	102	-24	37	176
P08	-18	8	26	-24	-55	18	-24	-11	48
P10	-14	-2	111	21	-41	164	-21	-12	252
P11	22	20	81	45	29	101	40	37	159
P12	3	3	63	9	-4	44	-11	-6	102
P15	0	2	62	-35	-10	52	26	33	107

P16	-11	18	-9	2	4	-8	-22	6	10
P17	-30	-2	98	-38	-12	152	-72	-10	226
P18	-9	1	116	8	-3	164	34	19	240
P19	11	20	77	45	7	86	22	16	141
P20	-7	4	57	14	-1	51	-16	4	112
P24	3	14	116	17	10	157	-7	17	237
P25	0	-1	57	13	-5	52	27	4	106
P27	-14	-8	104	10	-5	129	10	-40	188
P28	2	-7	57	17	-12	40	-1	1	76
P29	0	-4	61	12	-6	45	-11	5	78
P30	17	-3	76	36	-8	81	23	-6	123
P31	-23	29	75	-38	46	90			
P32	4	0	68	11	-5	52	-15	6	86
P33	-9	17	123	2	26	151	-68	48	217
P34	20	-10	73	27	-20	50	4	-10	99
P35	4	-8	71	18	-11	130	-3	-49	84
P36	4	-13	66	4	-11	39	-5	6	87
P37	11	26	117	28	46	127	12	50	186
P38	0	-15	71	6	-4	39	-10	6	89
P39	-9	-7	65	-1	-6	42	-14	11	94
P40	30	57	114	74	99	108	80	128	197
P41	28	12	106	35	15	89	52	33	159
P42	-6	-10	84	9	-8	52	0	4	113
P43	70	67	1	89	89	87	100	129	163
P44	7	-2	79	18	-6	50	-4	-44	112
P45	18	21	114	46	33	87	50	52	155
P46	-13	3	105	8	-2	65	-5	11	138
P47	8	-3	87	22	-5	49	9	8	121
P48	31	11	111	79	14	57	44	59	139
P49	7	4	91	9	-6	54	20	50	127
P50	21	-9	128	56	-12	83	63	1	188
P51	3	0	139	18	-6	122	8	8	223
P52	-13	2	111	-4	5	82	-15	15	169
P53	8	-15	78	15	-4	52	3	2	121
P54	5	-5	68	16	7	53	9	-6	-76
P55	-1	21	83	13	22	82	-4	30	142

Tableau IV.9 : les déplacements en ΔX , ΔY et ΔH

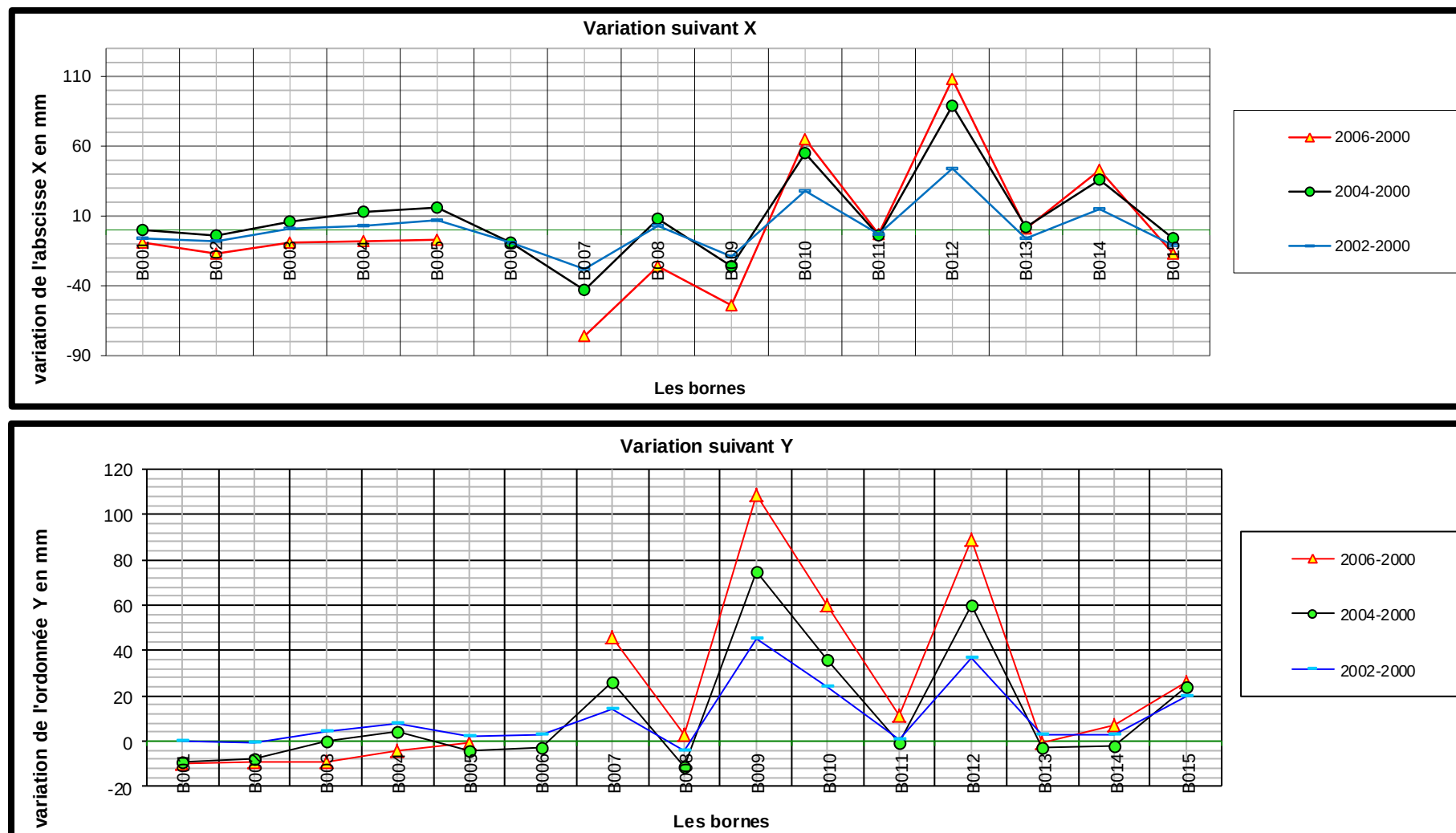
N.B : Il est à noter ici que certains points ont disparu entre deux opérations, c'est pour ça qu'on a laissé ses cases vide.

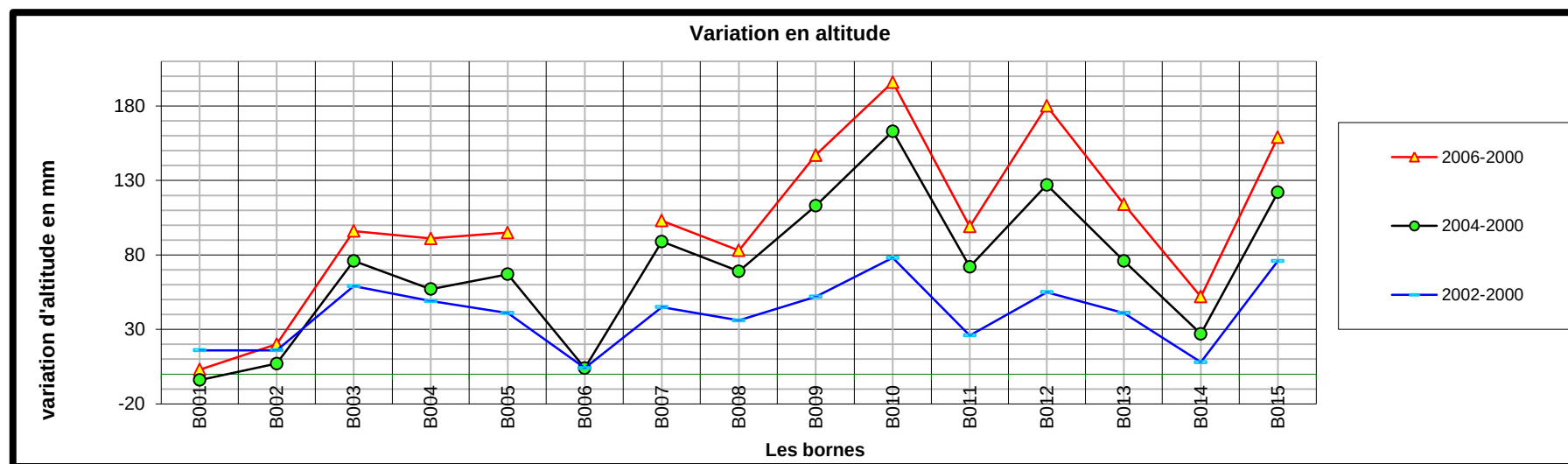
	2002-2000		2004-2000		2006-2000	
DX Max (mm)	70	P43	89	B12, P43	108	B12
DX Min (mm)	0	C06, H10....	0	B01	0	P42
DY Max (mm)	67	P43	99	P40	129	P43
DY Min (mm)	0	B01, H08...	0	B03, P04	0	H11, C04
Vecteur de déplacement max (mm)	96.89	P43	125.86	P43	163.23	P43
Vecteur de déplacement min (mm)	1	P25, H08....	1.41	C08,	1	C40
DH Max (mm)	139	P51	164	P18	252	P10
DH Min (mm)	1	P43	4	B01	3	B01

Tableau IV.10 : Déplacements maximal et minimal en mm

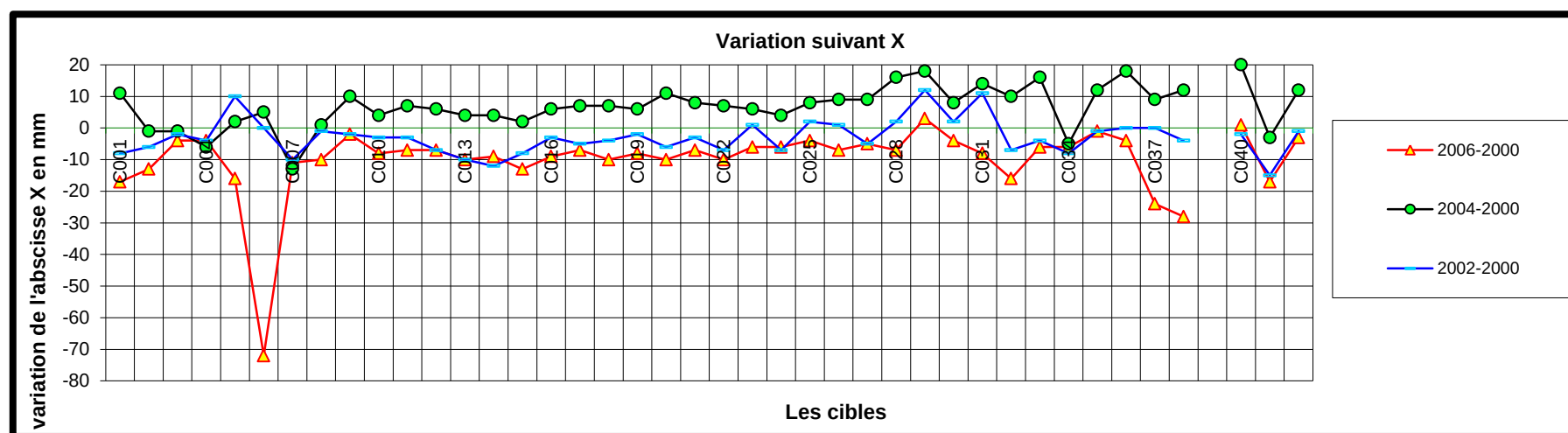
Les graphes suivants illustrent les variations des déplacements planimétriques et altimétriques des différents réseaux.

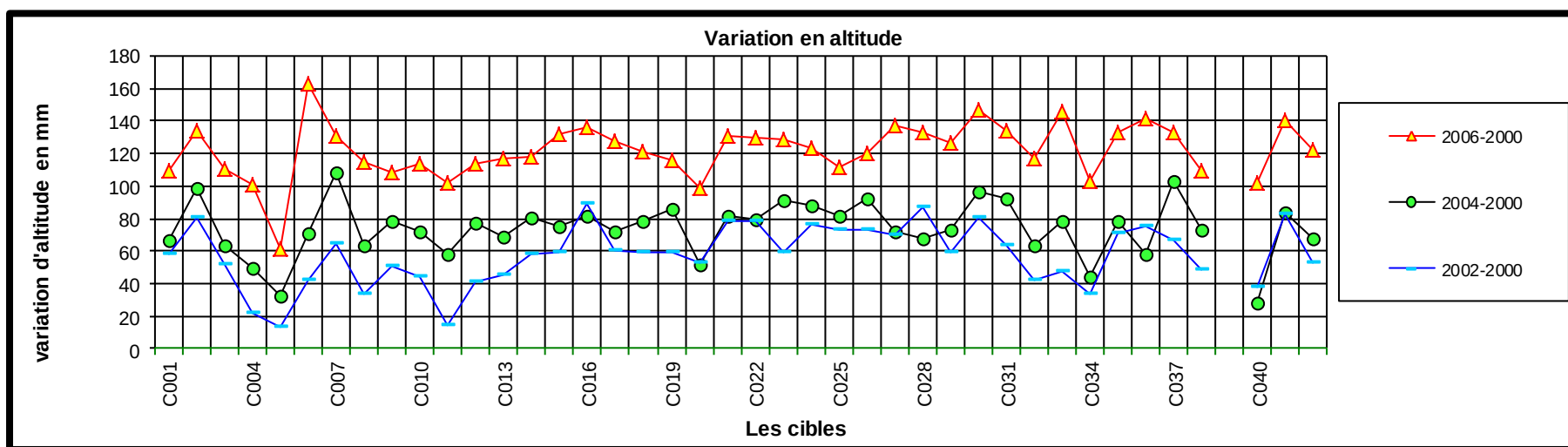
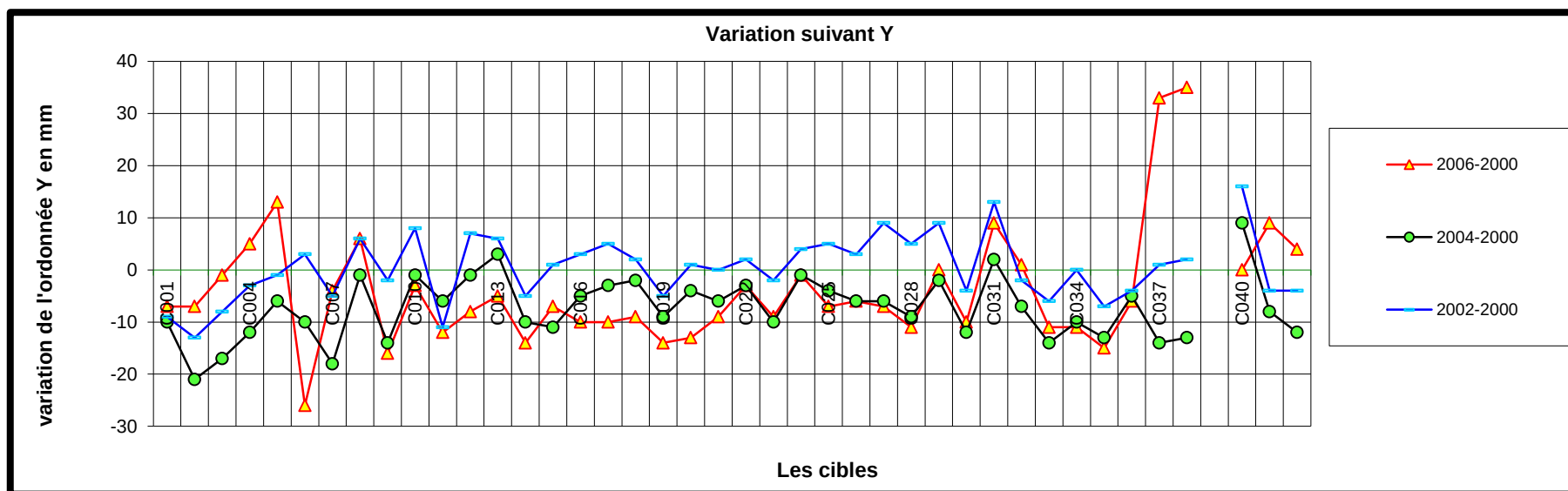
a. Le réseau de base



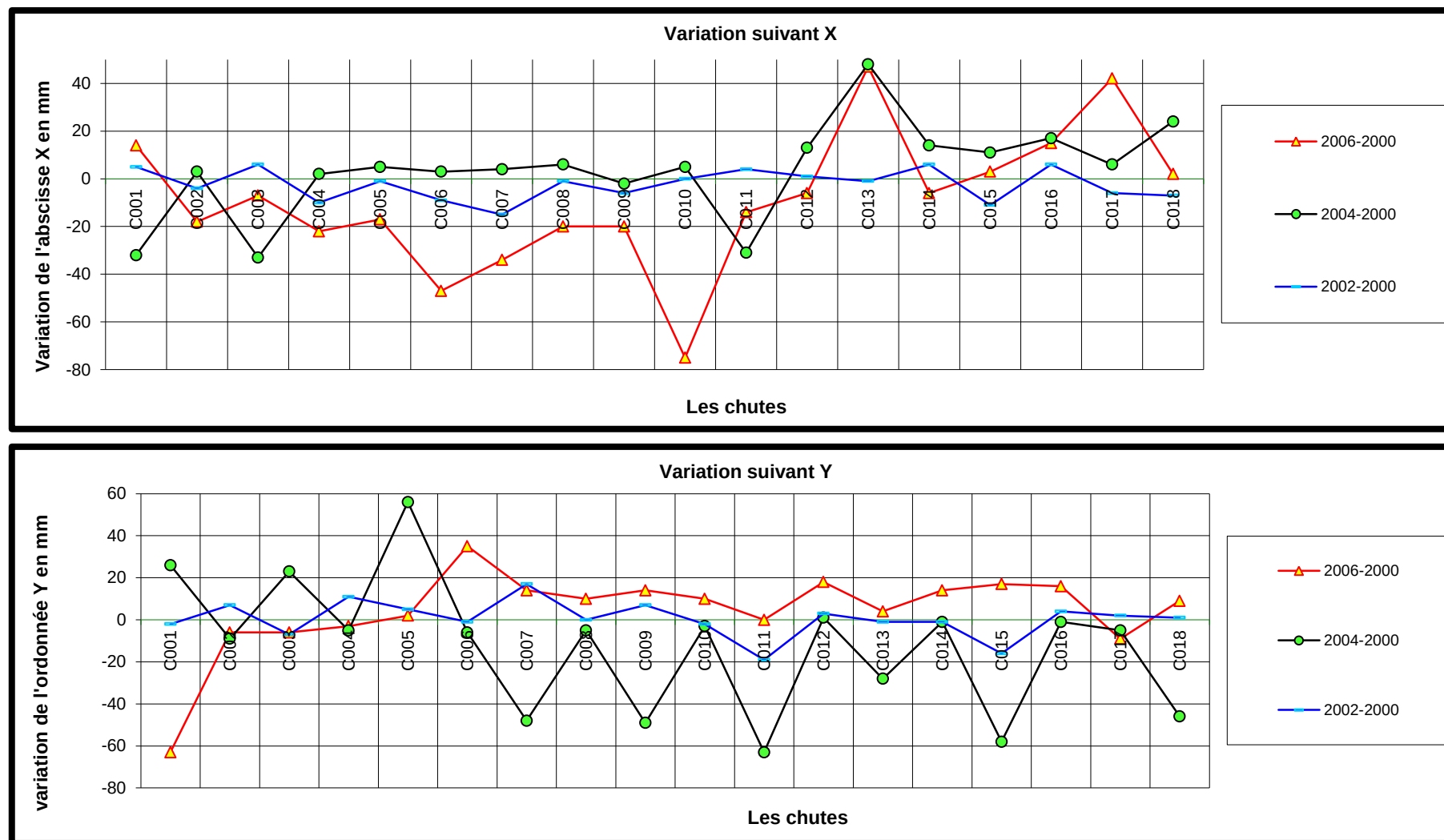


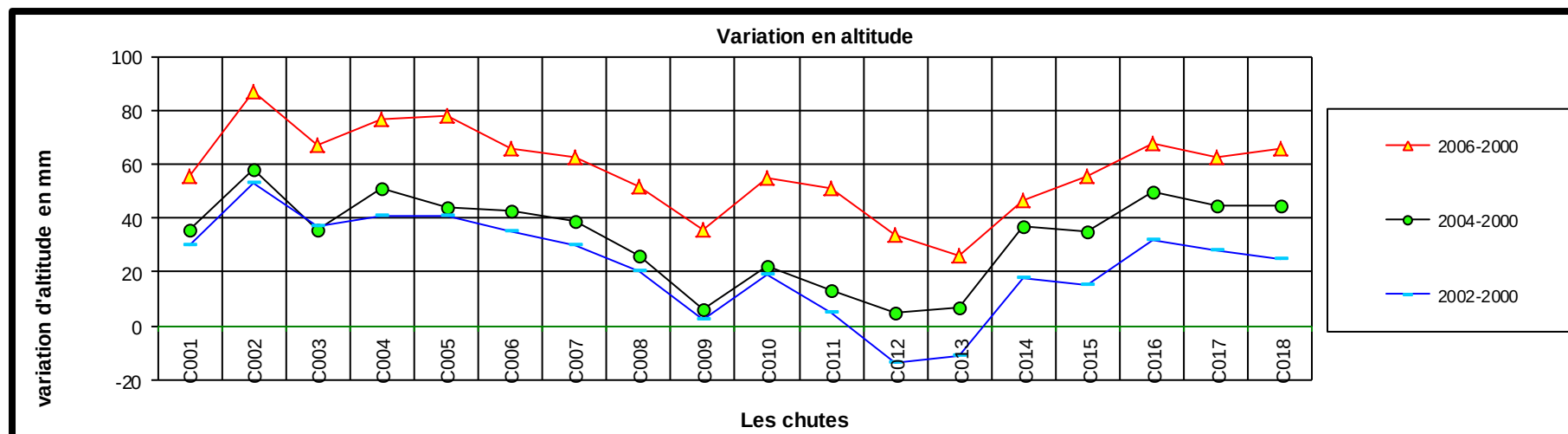
b. Les cibles



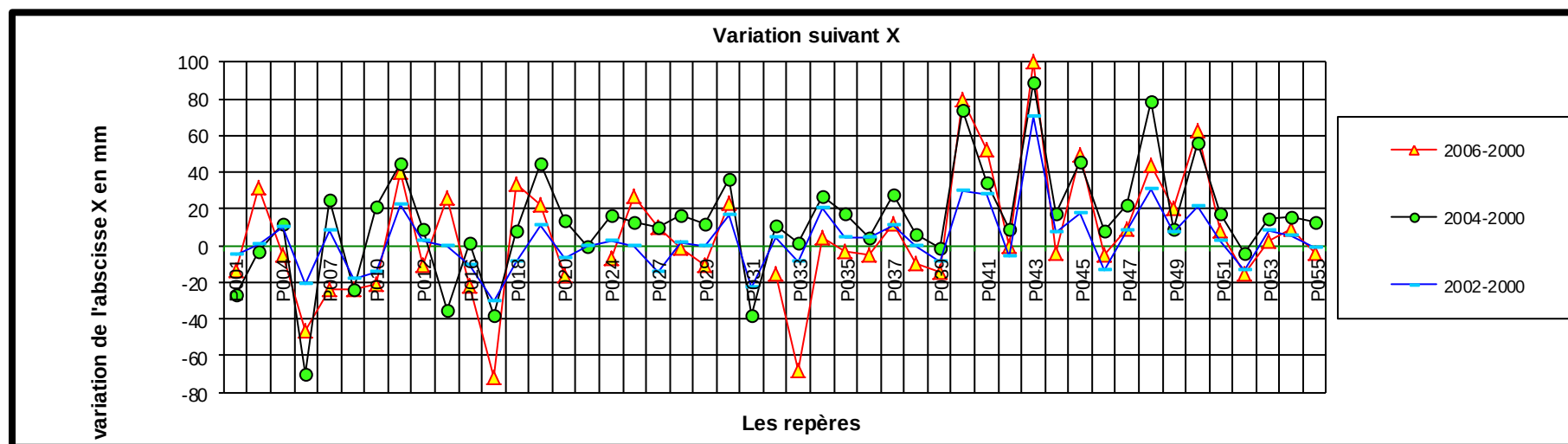


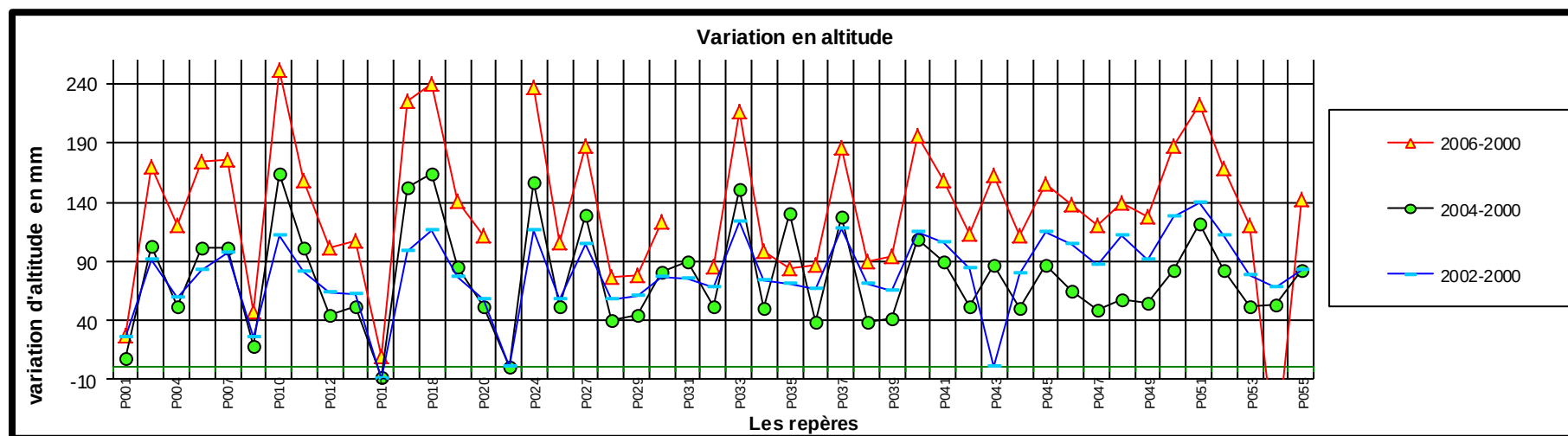
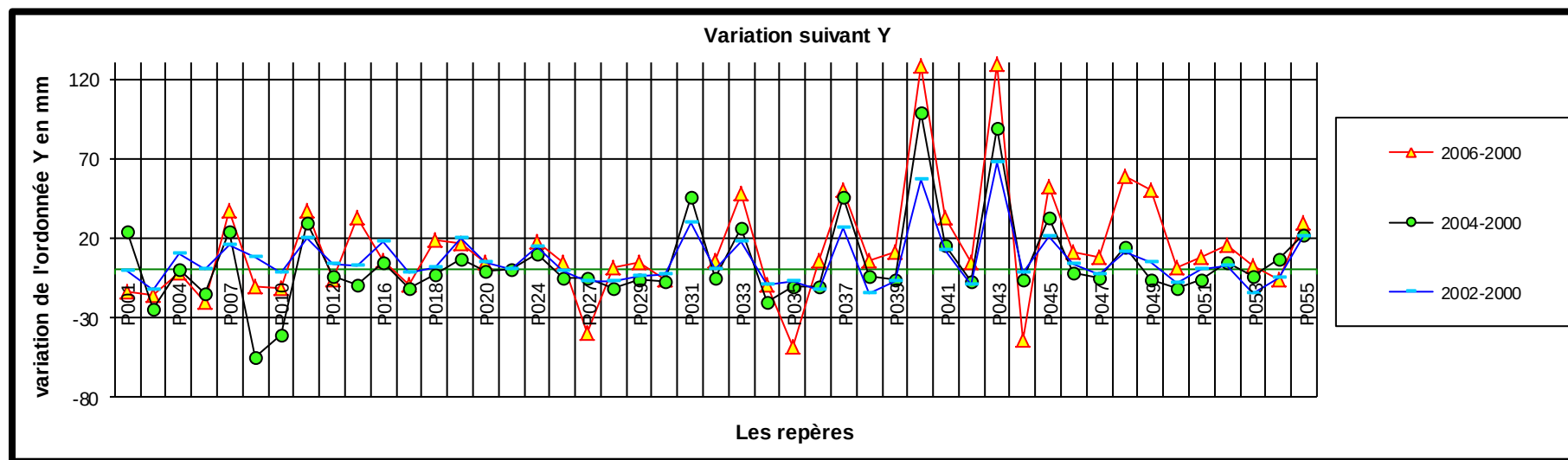
c. Les chutes





d. Les repères





Evolution horizontale

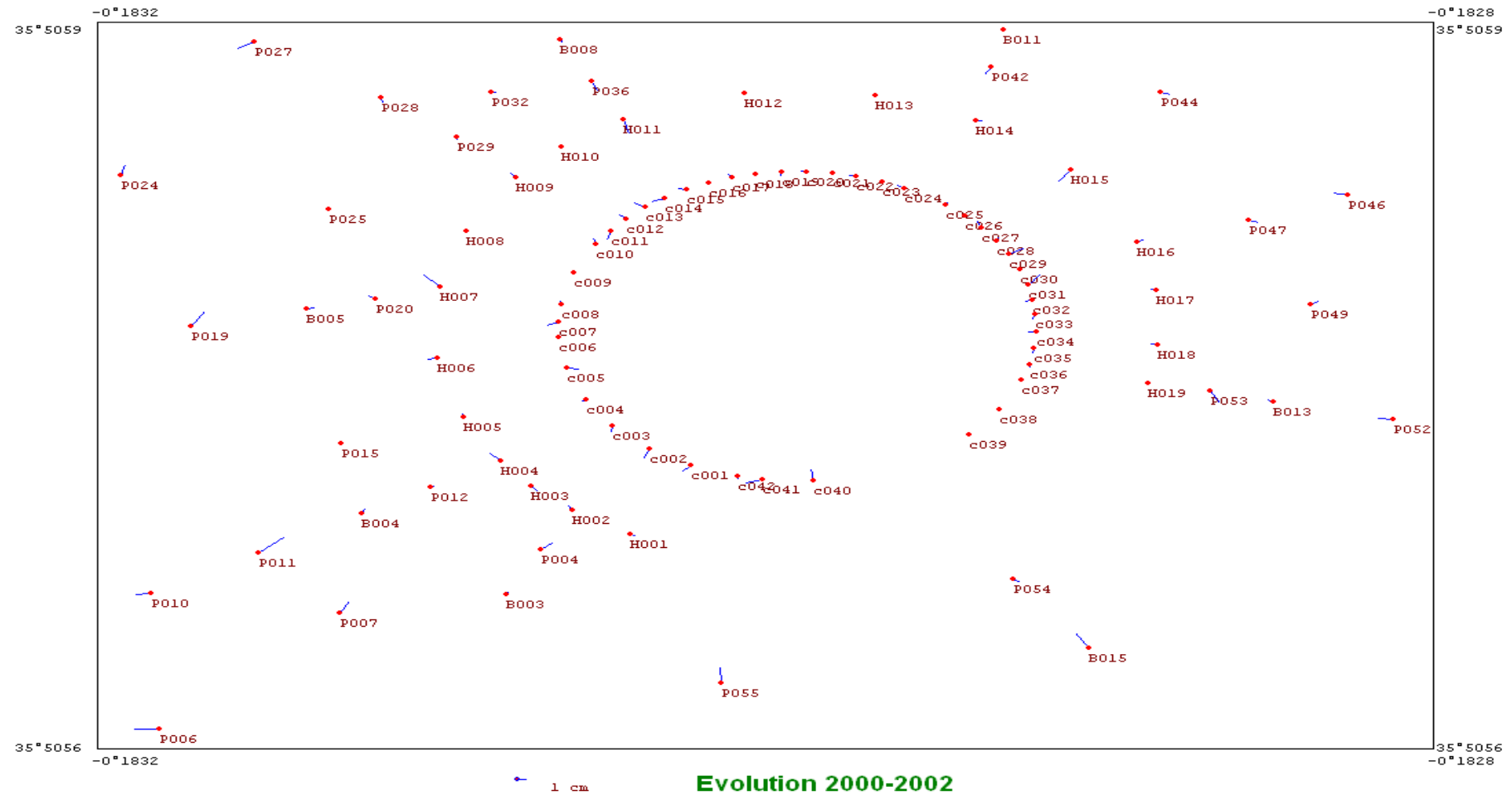


Figure IV.27 : Schéma d'évolution horizontale entre 2000-2002

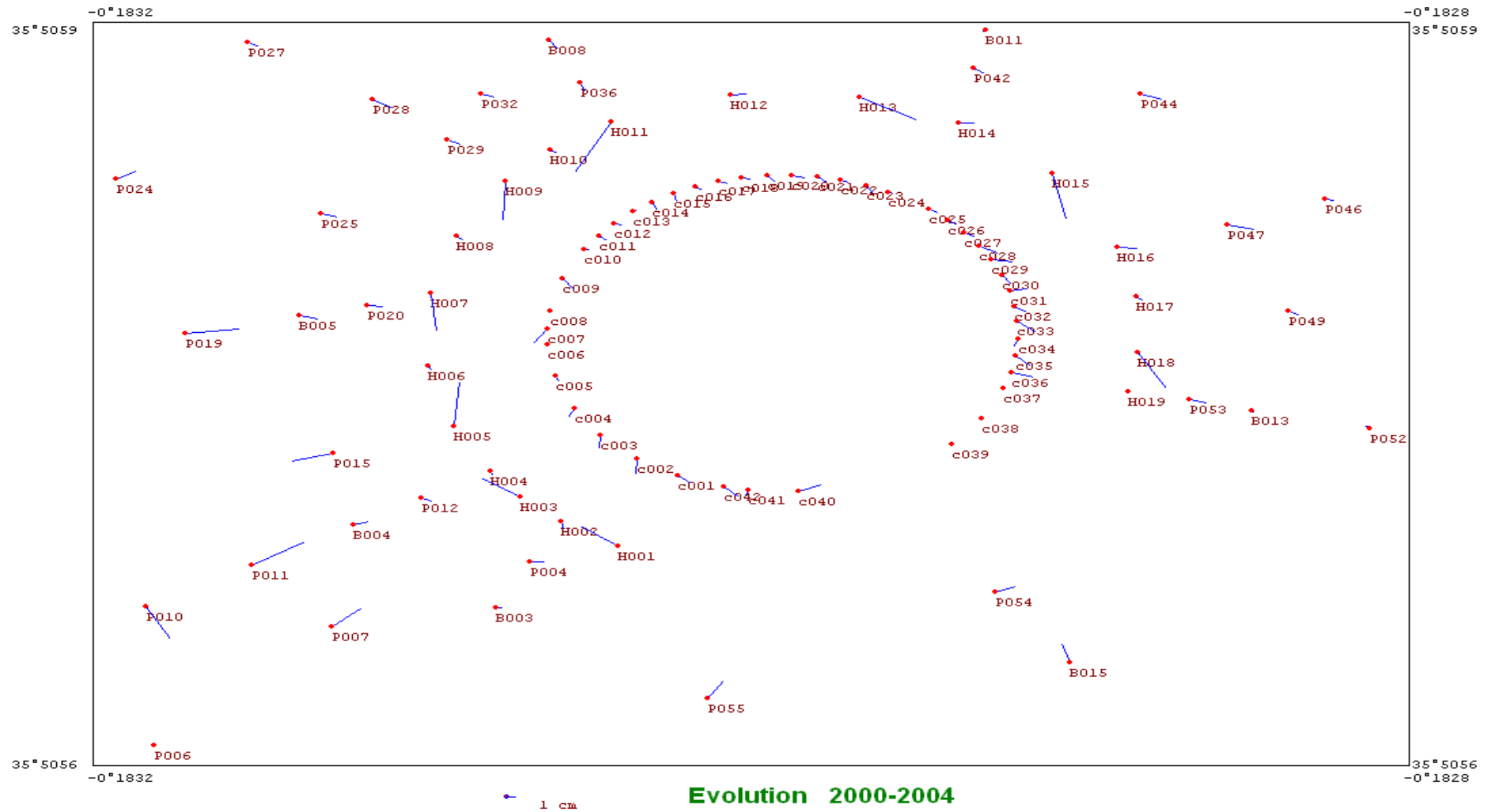


Figure IV.28 : Schéma d'évolution horizontale entre 2000-2004

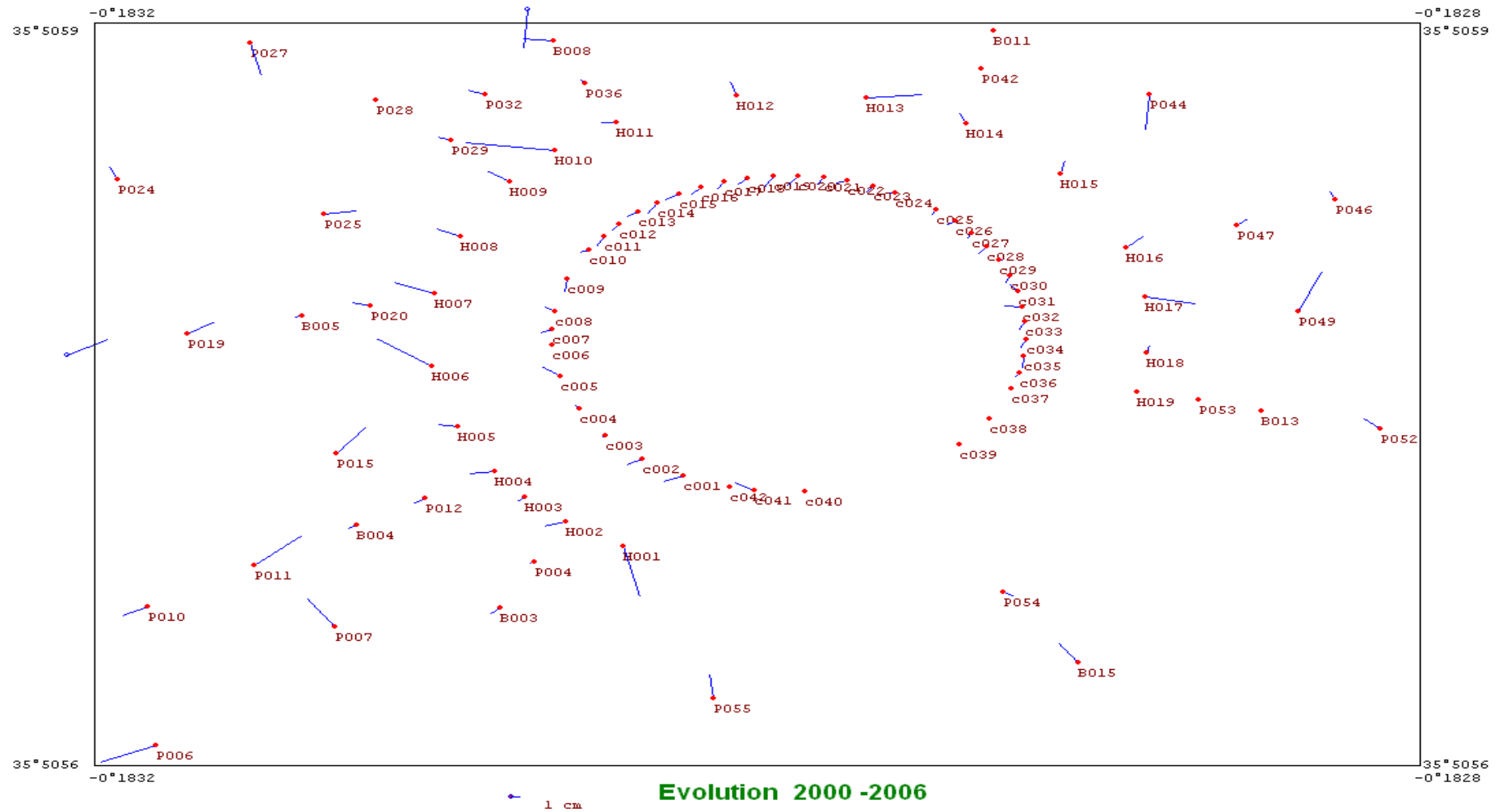


Figure IV.29 : Schéma d'évolution horizontale entre 2000-2006

Les profils

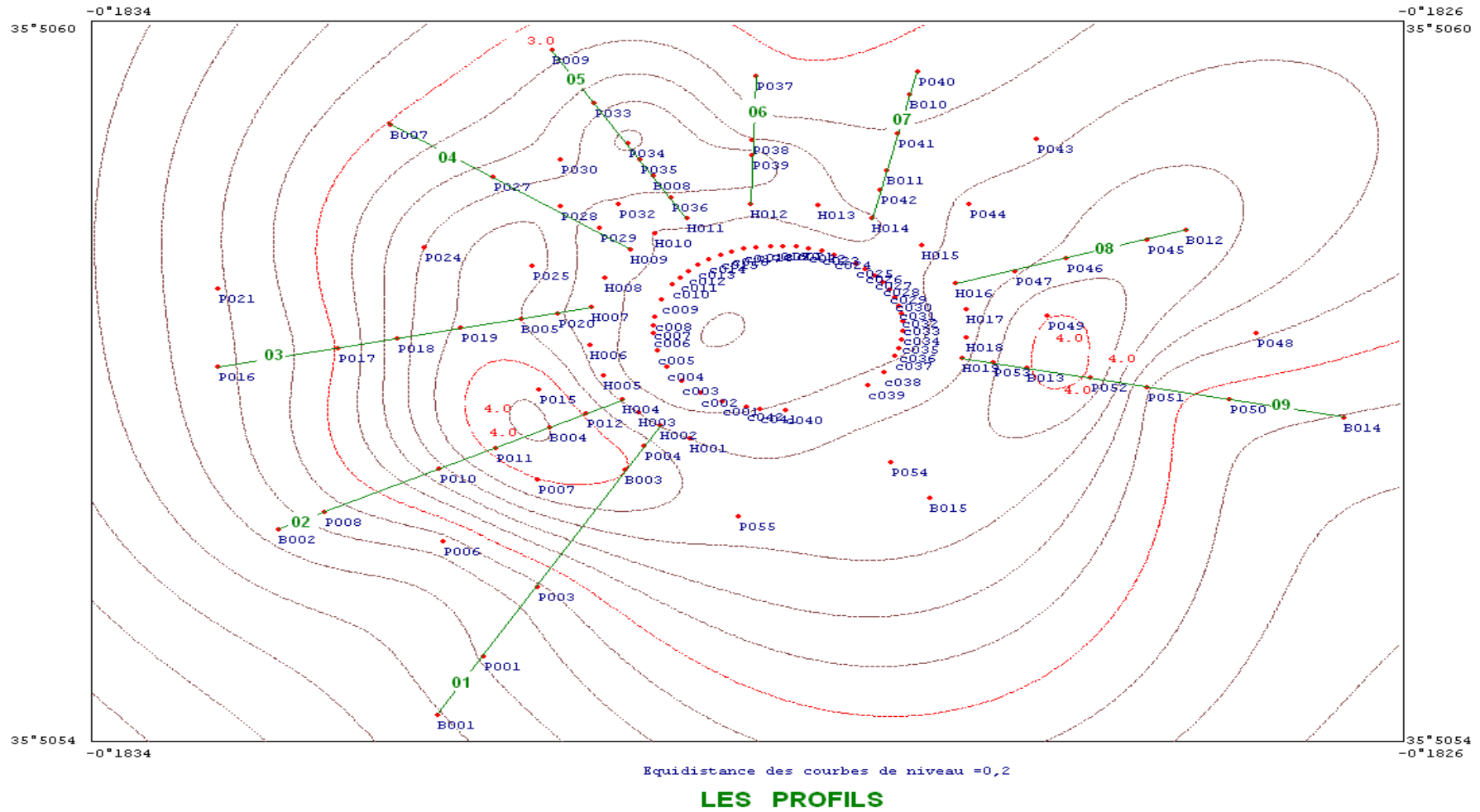
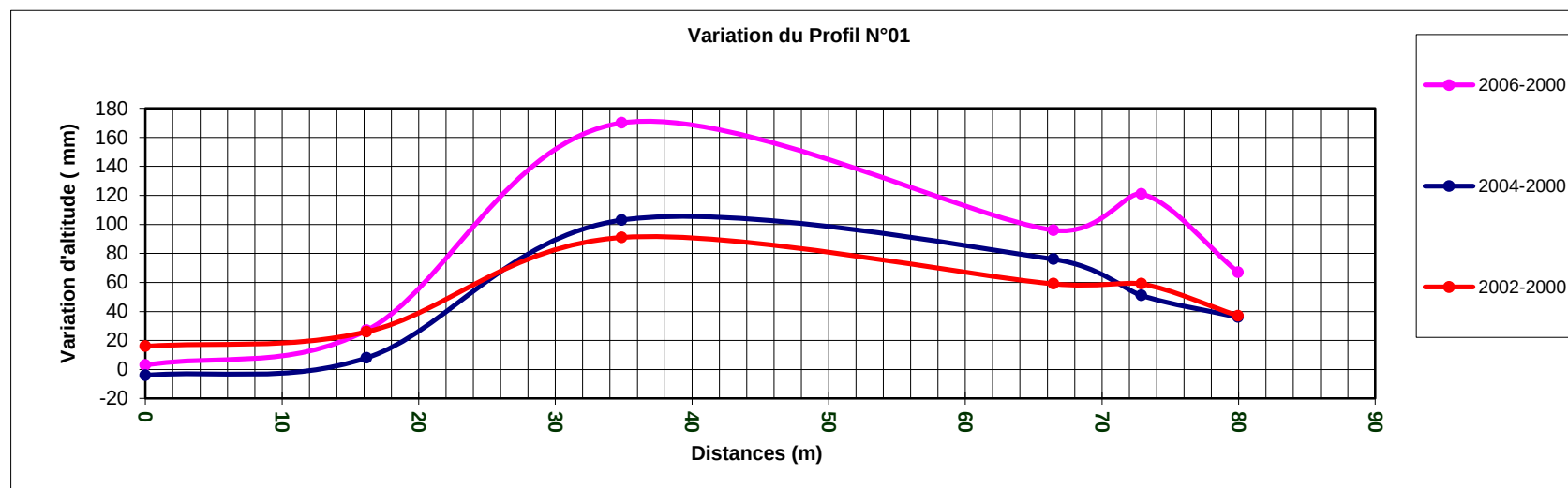
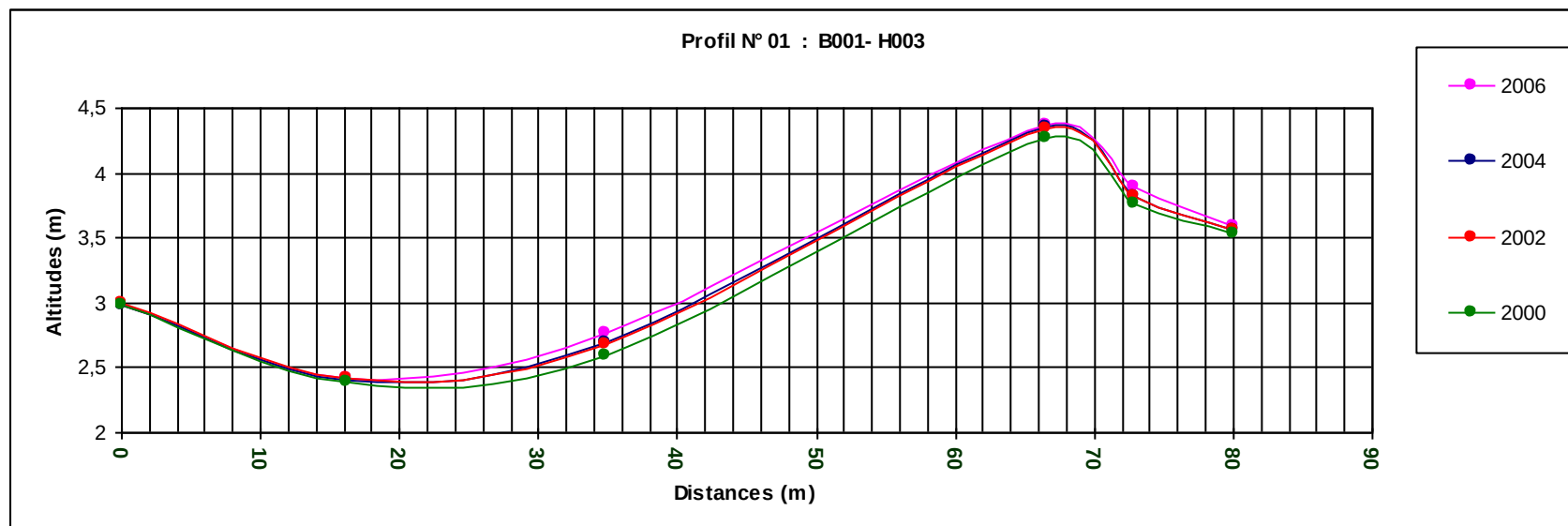
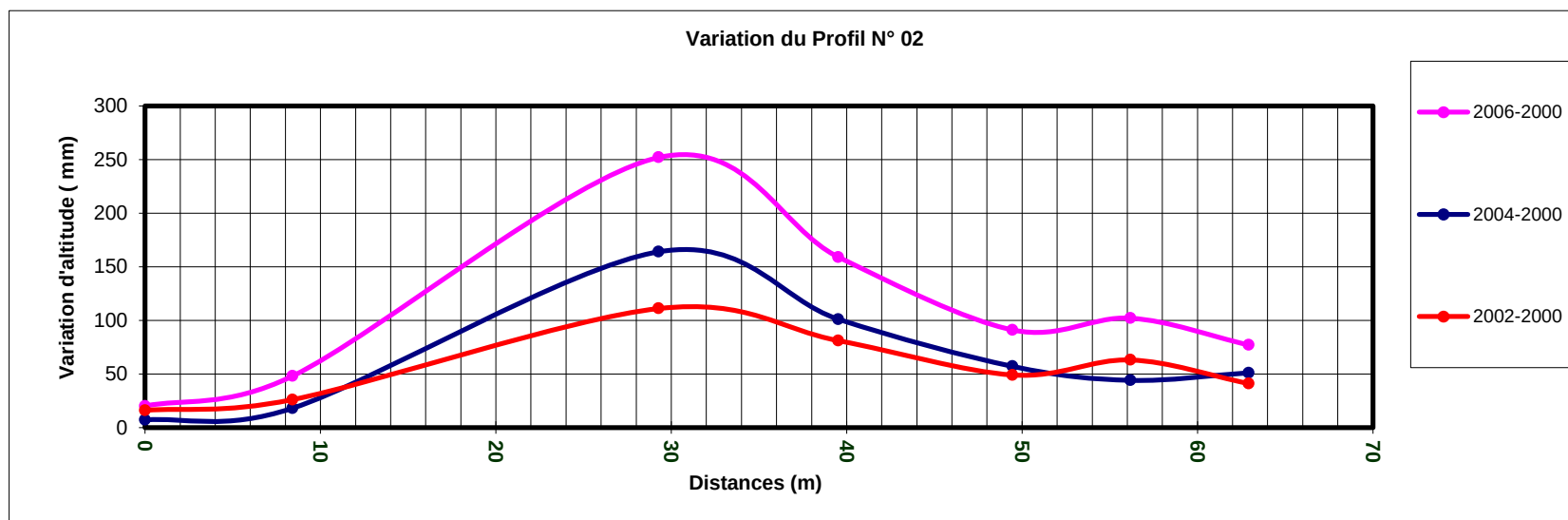
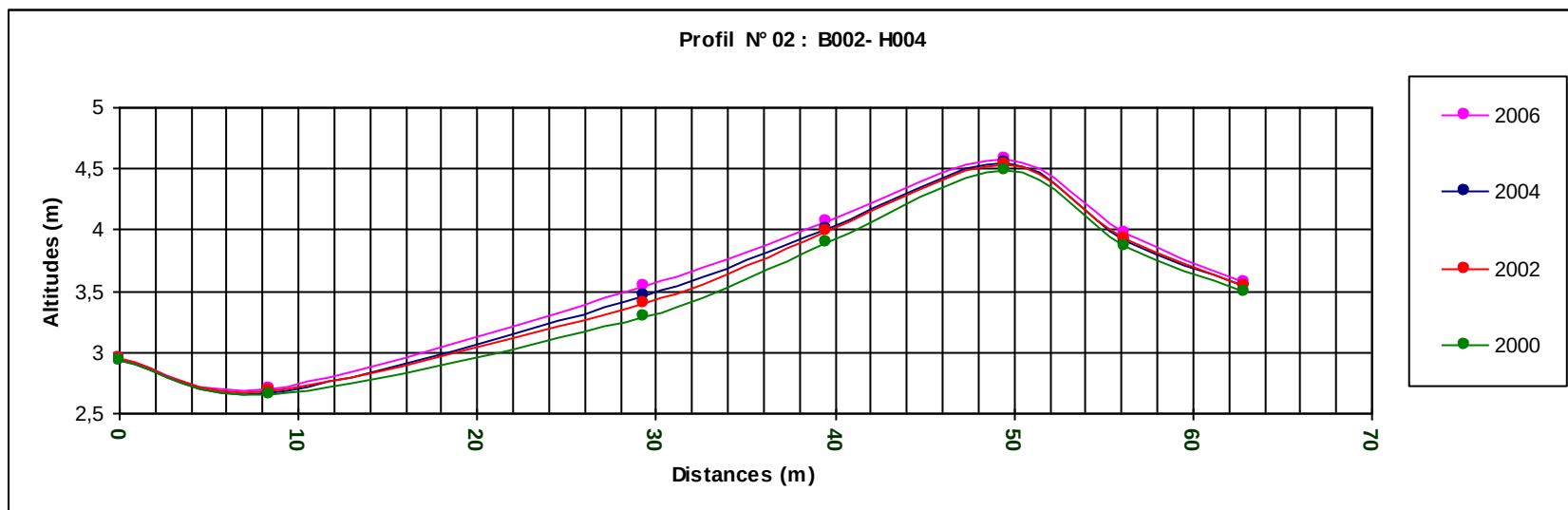
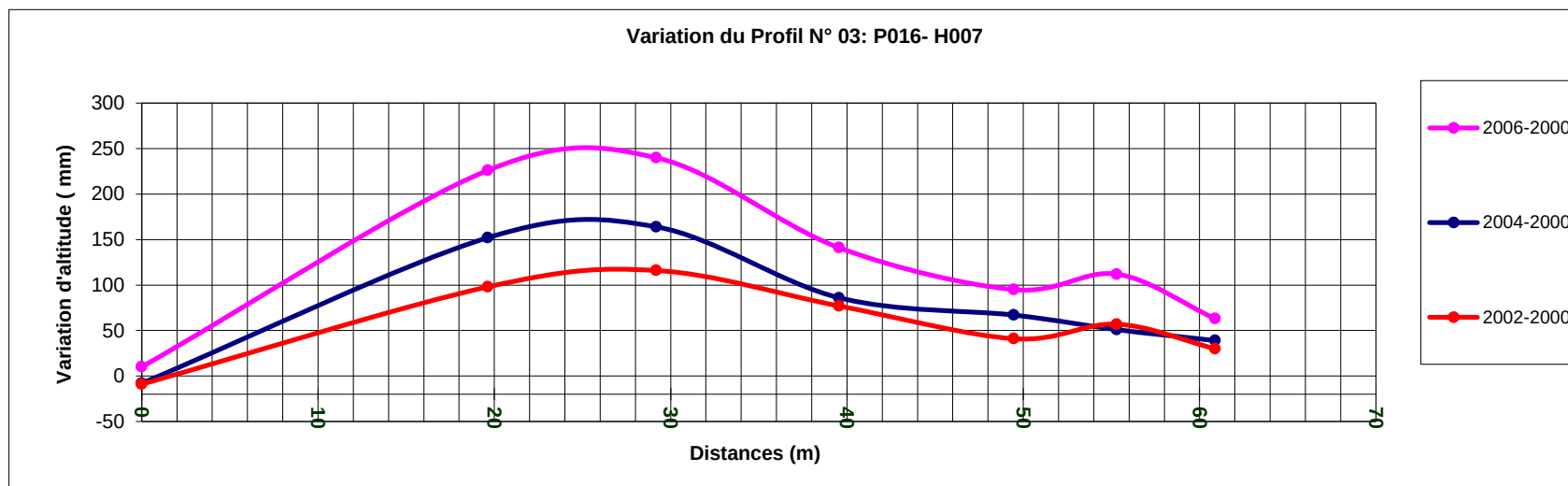
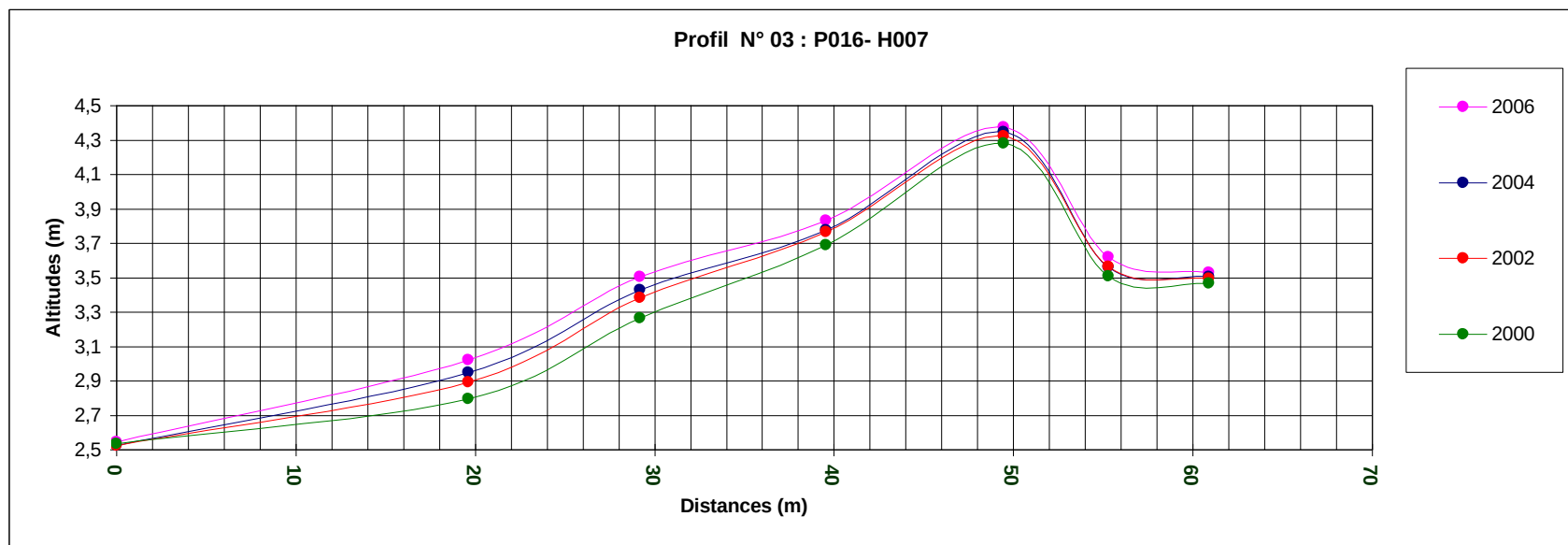
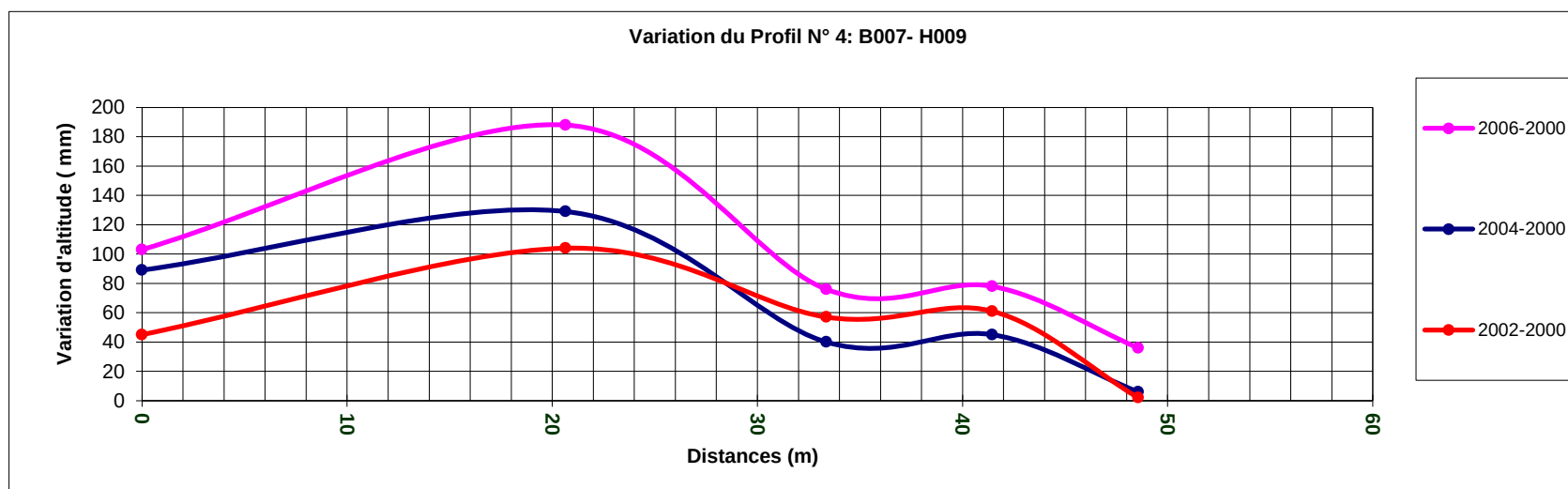
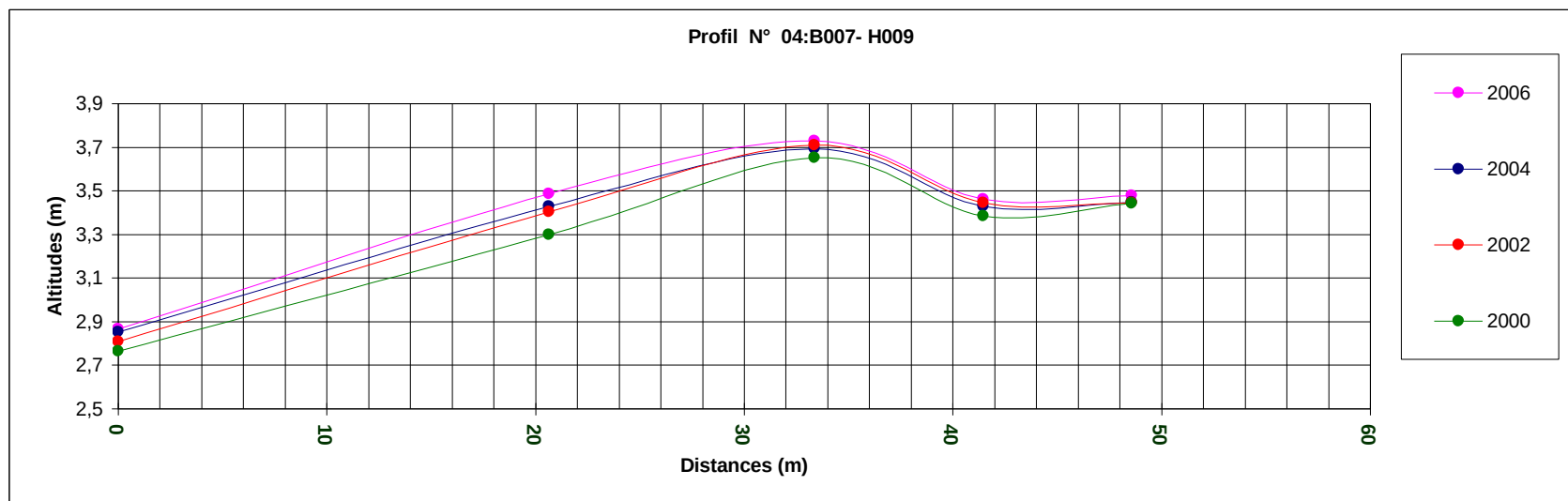


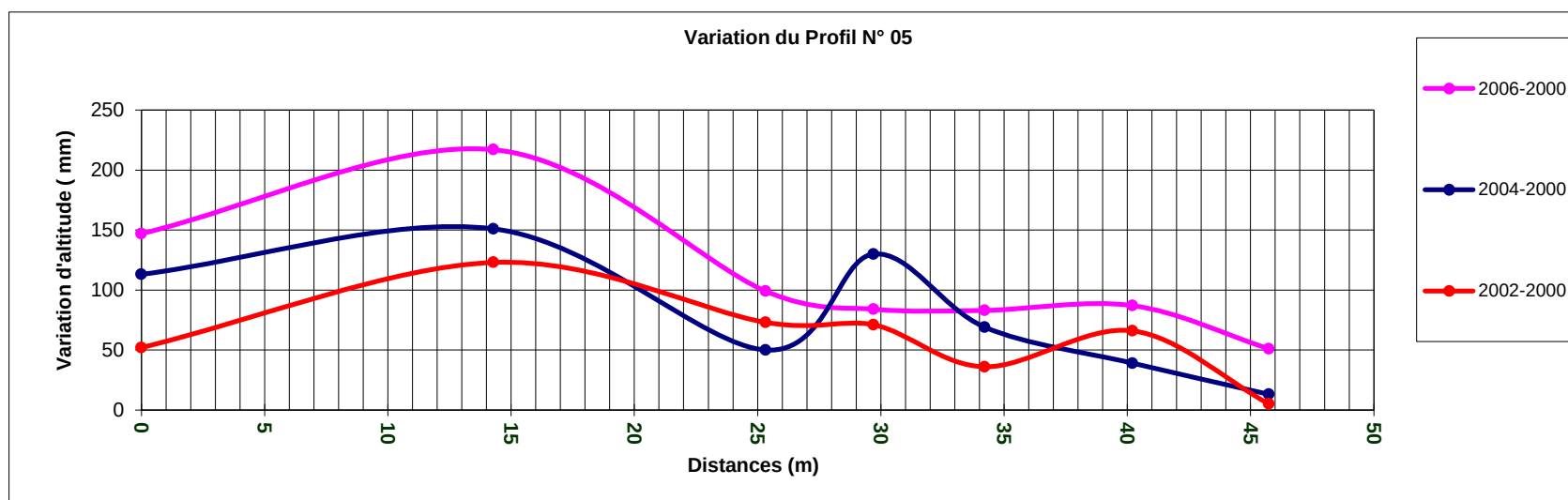
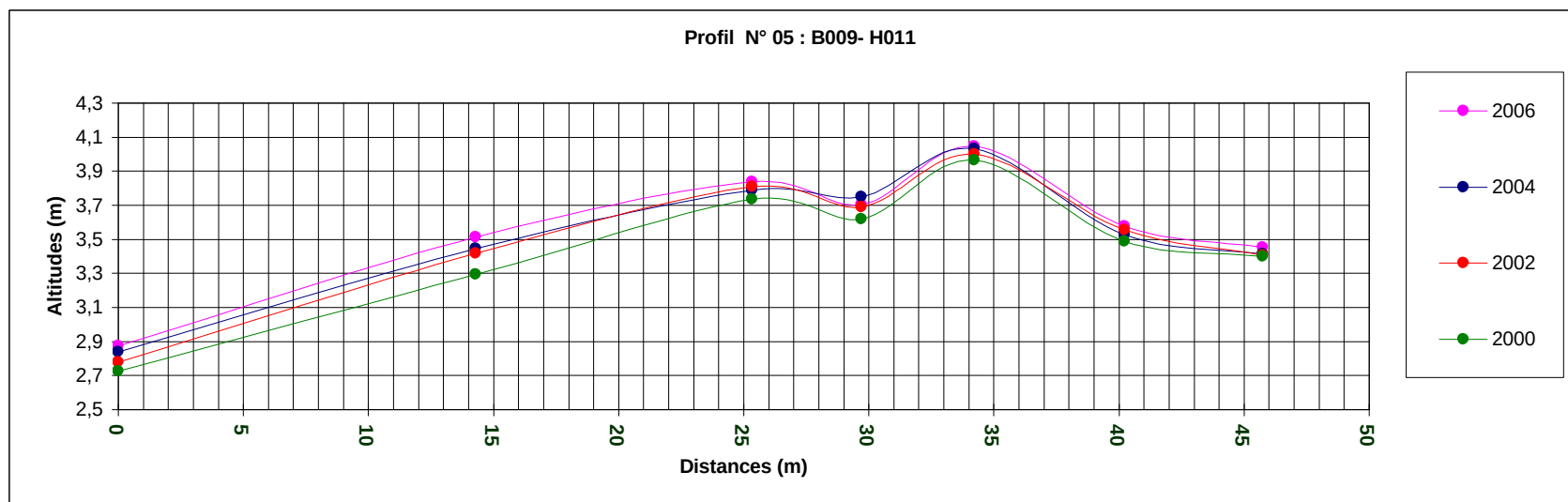
Figure IV.30 : les profils en long

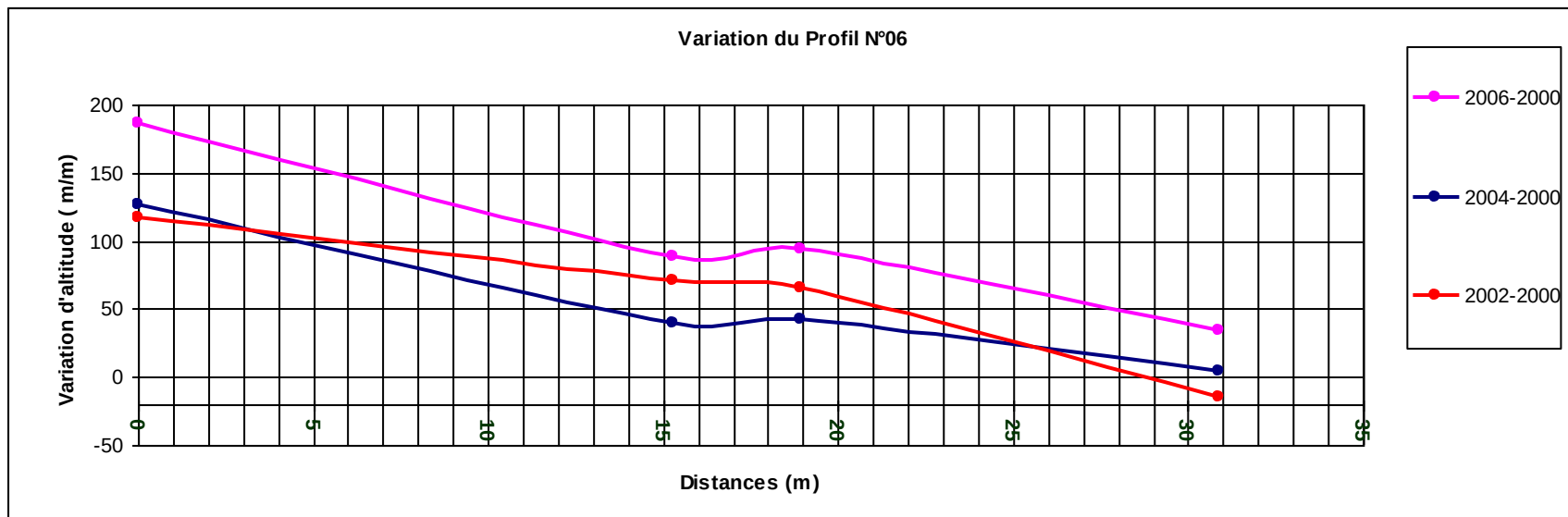
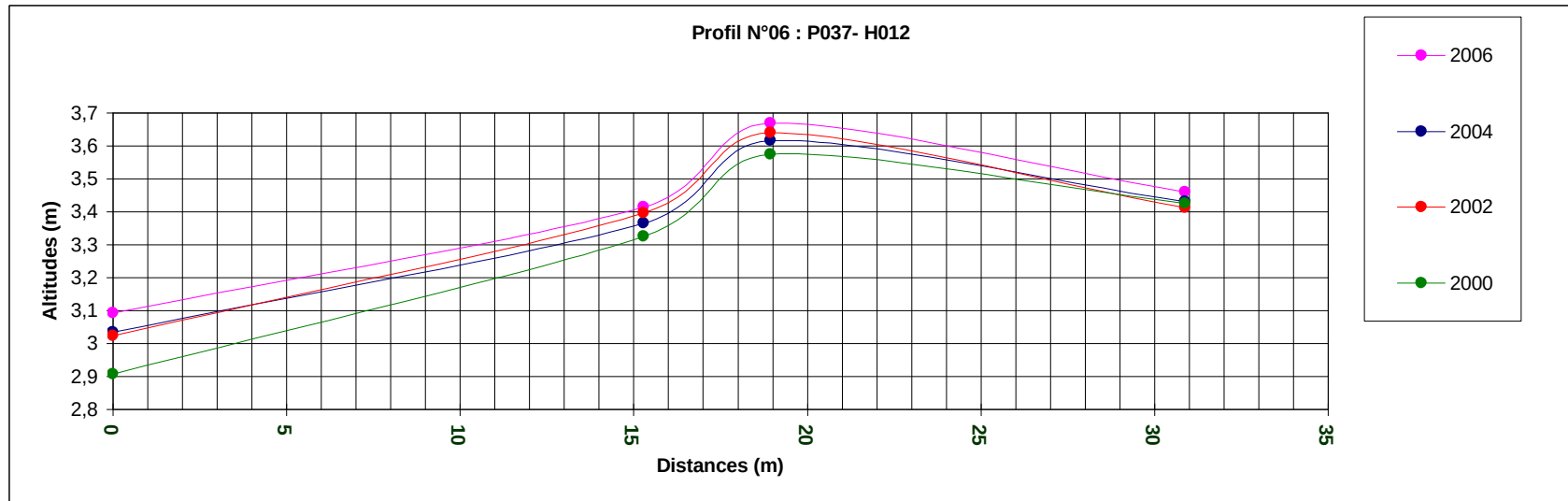


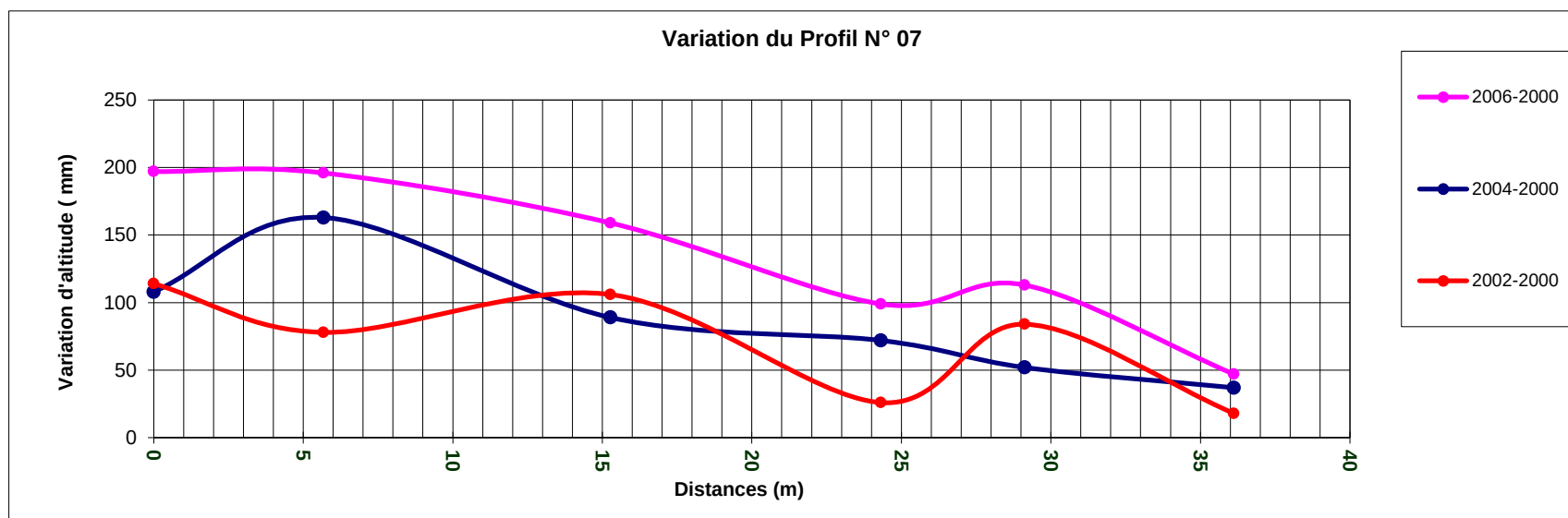
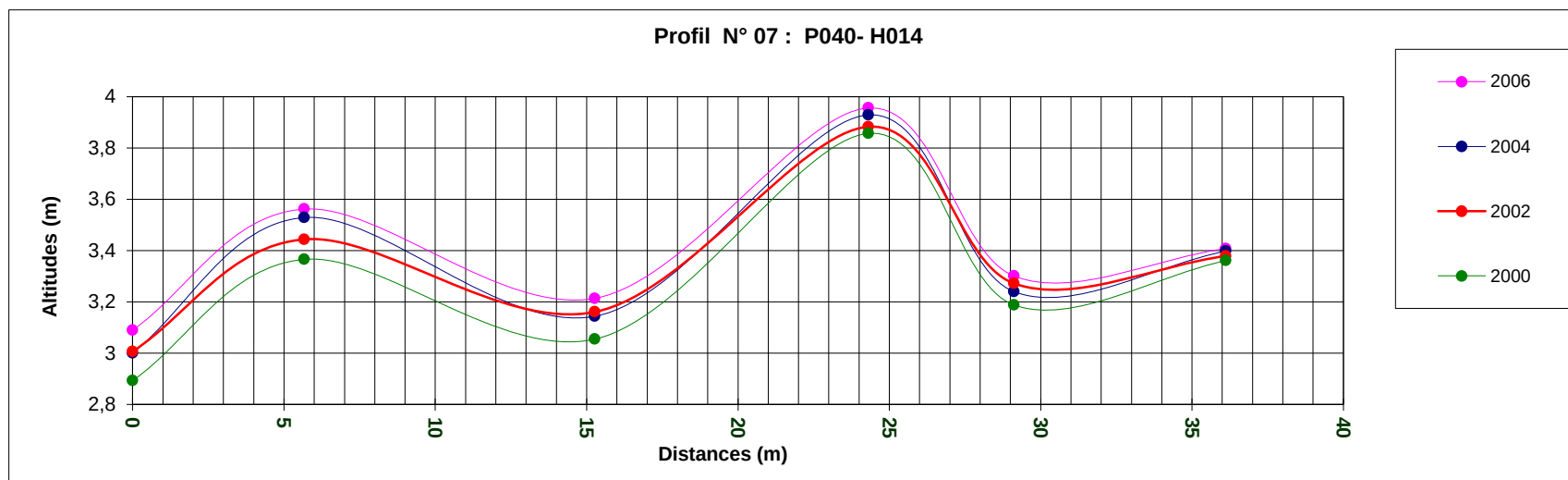


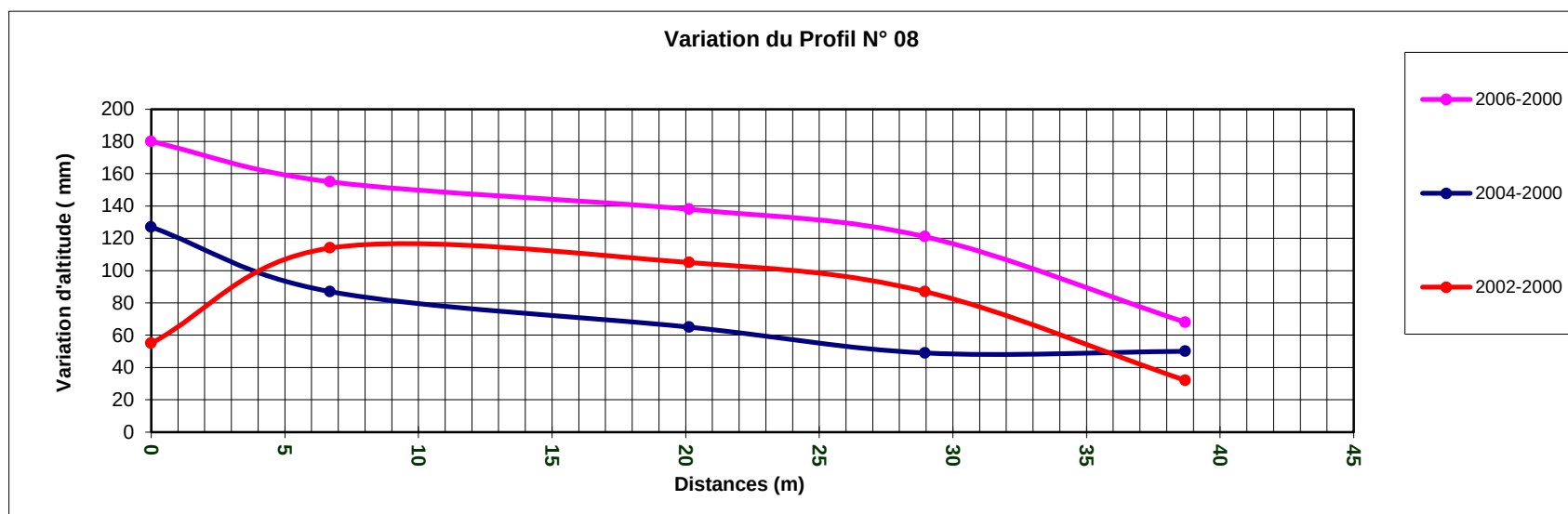
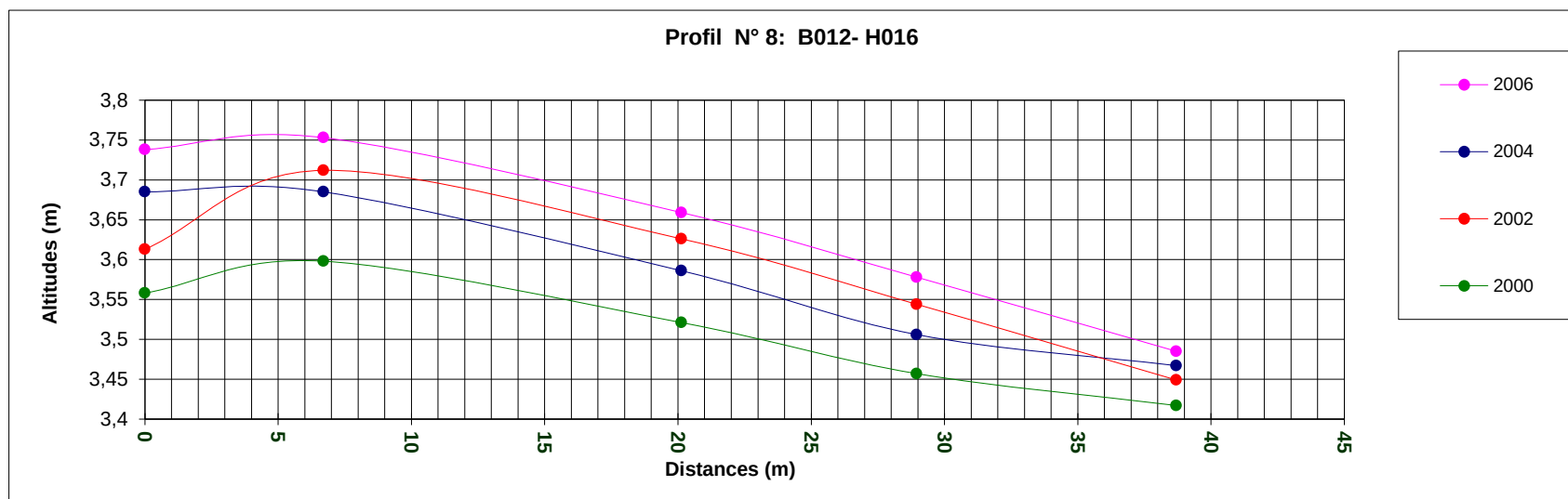


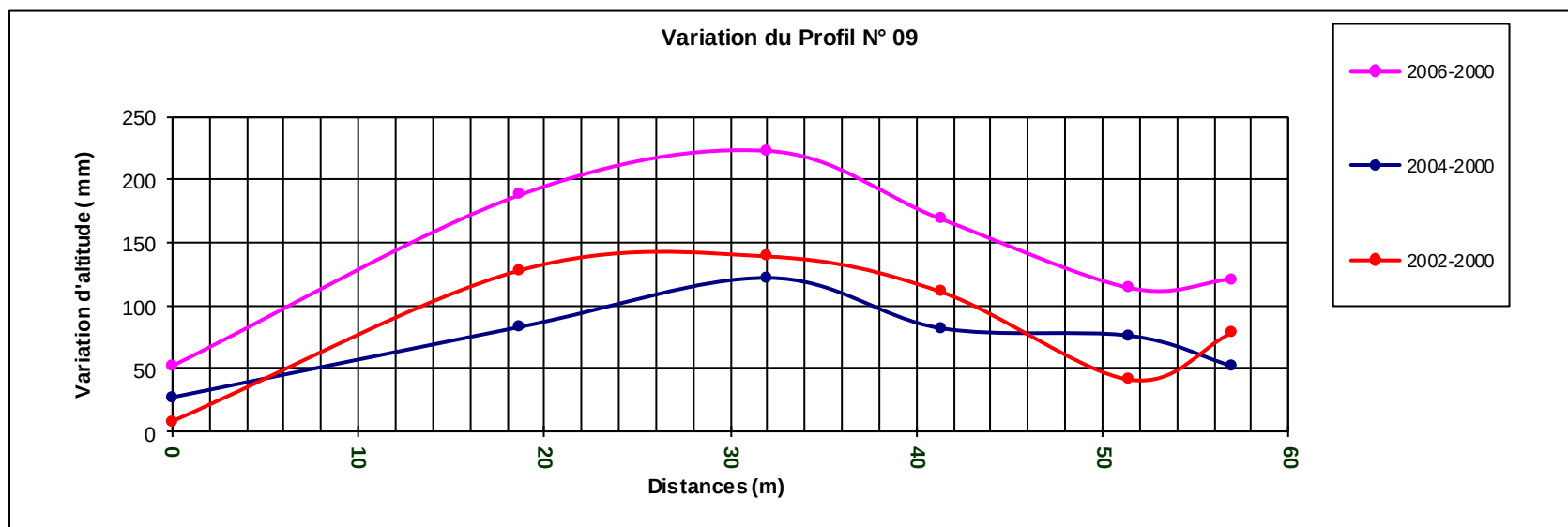
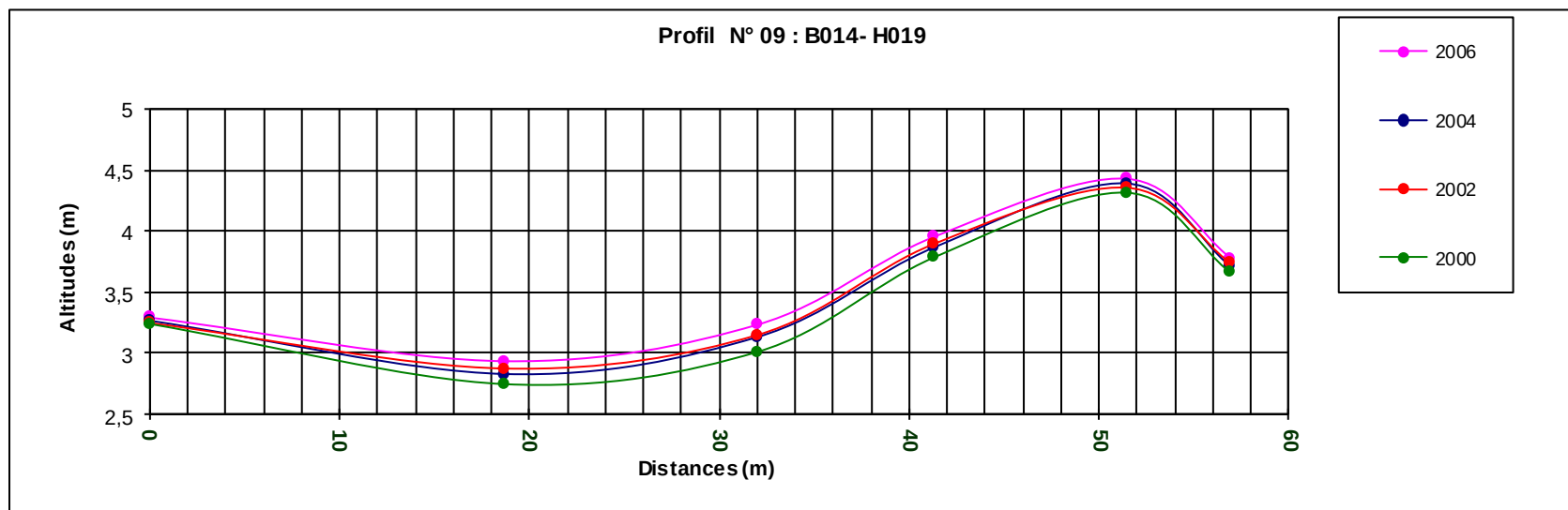












IV.4.5.2 Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus au-dessus, nous constatons qu'il y a un déplacement maximum et minimum en planimétrie et en altimétrie.

- Déplacement planimétrique : selon les figures d'évolution planimétrique pour les trois périodes d'observation, le déplacement maximum a été enregistré durant la période 2000-2006 allant jusqu'à 163mm qui se trouve au Nord-Est du bac de stockage, par contre le déplacement minimum a été enregistré durant la période 2000-2002 qui ne dépasse pas le 2mm.
- Déplacement altimétrique : à travers les profils en long, on peut présenter l'évolution de la déformation au voisinage du bac de stockage pour déterminer la partie la plus déformée et qui se trouve au Nord-Ouest avec une amplitude de 252 mm.

Les déformations observées aux bords du réservoir consistaient à l'existence de toute une série de fissure d'aspect au niveau du sol et à des distances variables. A travers les résultats numériques et graphiques, déjà présentées dans les sections précédentes on constate que :

Les résultats de cette étude ont révélé un soulèvement constant du réservoir, est caractérisée par des valeurs de différentes amplitudes et que les modules des déplacements est important à l'extérieur de la zone d'étude, notamment dans la partie Nord-est (côté Mer) alors que dans la partie Sud de ce champ est assez faible (coté terre).

Ceci a été traduit par :

- La répartition inégale des efforts internes induit par la formation du gel autour et en dessous du réservoir ;
- La proximité de la mer qui peut engendrer une variation importante de la température du gel (dilatation du gel) ;
- la partie Nord-est (côté Mer) elle est en remblai donc hétérogénéité de la terre.

Conclusion générale

La localisation par GPS peut être appliquée au suivi des phénomènes présentant des vitesses d'évolution (mouvements tectoniques, tassements d'ouvrages quelques millimètres à centimètres par an) et des superficies actives très variées (glissements ou tremblement de terrain quelques millimètres à centimètres par jour), offre l'avantage de délivrer un positionnement tridimensionnel de précision infra-centimétrique pour des sessions de mesure faible. Cette technique ne nécessite pas une intervisibilité entre les sites localisés sur le mouvement de terrain et/ou les sites de référence. Les mesures peuvent être effectuées par tout type de temps et en conditions nocturnes.

Les vecteurs GPS étant déterminés par rapport au référentiel tridimensionnel WGS84, une transformation dans le référentiel local utilisé pour la surveillance du site doit être appliquée. La différence existante entre les altitudes GPS référencées par rapport à un ellipsoïde et les altitudes locales référencées par rapport au géoïde.

Les résultats obtenus sont des séries de mesures (déplacements) ont permis de démontrer la pertinence d'utiliser une technique de type GPS pour mesurer les déformations d'un grand ouvrage. Cette approche est particulièrement intéressante pour les cas où la configuration de réseau d'auscultation ne permet pas de mesurer les déplacements par une technique conventionnelle et que l'ouvrage démontre bien sûr une déformation assez importante pour qu'une précision de quelques millimètres suffise.

Ces valeurs de déplacements établissent le seuil de détectabilité d'un mouvement significatif du bac de stockage et ces environs pour les trois périodes d'observation, Les déplacements cumulés obtenus sur 6 ans de mesures périodiques atteignent à 96 mm (planimétrie) et 139 mm (altimétrie) pour la période (2002-2000), 125 mm (planimétrie) et 164 mm (altimétrie) pour la période (2004-2000) et 163 mm (planimétrie) et 252 mm (altimétrie) pour la période (2006-2000), Ces déplacements correspondent à une vitesse moyenne respectives de 69 mm, 43 mm et 42 mm par an.

Les vitesses moyennes de déplacements ont atteint le maximum entre 2000 et 2004 c'est la période où l'exploitation du bac était à son maximum, après la dernière opération (février 2006) on a remarqué qu'il y a une diminution de la vitesse

moyenne de déplacement par rapport aux années précédentes, cette diminution est due probablement à l'arrêt de l'exploitation du bac.

Cette étude montre que, en dépit des difficultés de l'atteindre a déterminé les déplacements millimétriques, le GPS a la capacité de suivre en continu la dynamique d'entités géophysiques aux déplacements faibles et lents et pourrait donc constituer, dans un système d'alerte, un complément aux techniques de topométrie conventionnelles.

Bibliographie

GPS.gov, 2014. Information officielle sur GPS fournis par le gouvernement U.S.A

F.Duquenne, S.Botton, F.Peyret, D.Bettaille, P.Willis, (2005). GPS : localisation et navigation par satellites. Edition Lavoisier. France, 2005, ISBN 274626-1090-8.

F.ALLAM, 2009 : « Quantification des erreurs de positionnement sur un réseau GPS en zone urbaine (Application à la ville de Constantine) » Mémoire d'ingénieur d'état en sciences géodésiques et travaux topographiques, CTS.

M.MEKHANFER, M.ZIDANE , 2004 : « Utilisation du GPS cinématique pour la détermination de l'attitude d'une plate forme mobile » Mémoire d'ingénieur d'état en sciences géodésiques et travaux topographiques, CTS.

M.AGGOUDA EL MAHDI, 2005 : Mémoire d'ingénieur d'état (Juin 2005). Auscultation géométrique des bacs de stockage de GPL du Complexe GP1Z par combinaison de mesures GPS et classiques, CTS.

C.MILCENT, 2013 : « comparaison des logiciels de traitement de données GPS GAMIT/GLOBK et PPP et validation du logiciel PPP » Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme d'ingénieur CNAM.

A.HAMICI, T.GRINE, 2014 : « Utilisation de la technique GPS dans les travaux routiers : Application à la nouvelle route de la corniche Cap Carbon-Kristel » Mémoire d'ingénieur d'état en sciences géodésiques et travaux topographiques, CTS.

S.AMEUR, 2009 : « Etude des risques liés au bac souterrain du complexe GNL4Z » Thèse de magister en sciences des risques et matériaux.

A.KHOUDIRI, Y.LAKSARI, 2011 : « Modélisation et représentation de la déformation d'un réseau géodésique par les réseaux de neurones artificiels (RNA) » Mémoire d'ingénieur d'état en sciences géodésiques et travaux topographiques, CTS.

DURANTHON Jean-Paul, 1994 : « Application de la méthode GPS de localisation Par satellite à la surveillance de sites naturels instables » Guide technique, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 125 pages.

USER'S GUIDE : Manuel d'utilisation de WINPRISM 2.0 (Ashtech).

B.AKROUR, 1998 : « utilisation optimale du système de positionnement GPS pour les travaux d'auscultation des barrages » Mémoire présenté à la faculté des études supérieures de l'université l'Aval, grade de maitre en sciences (M.Sc.).

C. ERICKSON (Juillet 1993) : guide pour le positionnement GPS, Division des levés géodésiques, Géomatique Canada, Ressources naturelles Canada.

MEHIMMEDETS.S (2003) : Mémoire d'ingénieur d'état (Juin 2003). Traitement et analyse des données GPS de la mission SPATIOCARTOGRAPHIE de l'INCT.