

# LA MESURE DES DÉFORMATIONS DE L'ÉCORCE TERRESTRE UN ENJEU CAPITAL POUR LA GÉODÉSIE SPATIALE

*Michel Kasser, C.N.A.M. - ESGT*

## INTRODUCTION

La Géodésie, qui est comme chacun sait la mesure de la forme et des dimensions de la terre, a été amenée au cours des siècles à employer un nombre toujours croissant de méthodologies de plus en plus complexes ; ce furent d'abord des mesures angulaires à l'alidade, et de distances au nombre de tours de roue d'un char ; puis des mesures d'angles avec des cercles gradués et des lunettes astronomiques, déjà bien plus évoluées au niveau instrumental puisqu'il s'agit d'instruments dédiés, avec en parallèle des mesures de longueurs avec des cannes en bois ; puis vinrent les mesures de distances parallactiques et le nivellement direct permettant d'effectuer aussi des levés, le métier de géomètre devint alors de plus en plus nécessaire et donc répandu. Finalement ce dernier demi-siècle aura vu venir les mesures électroniques des distances, puis tout un ensemble de méthodologies permettant de sortir des alentours de la surface de la Terre, en travaillant en liaison avec des satellites ou même des étoiles et radiosources diverses.

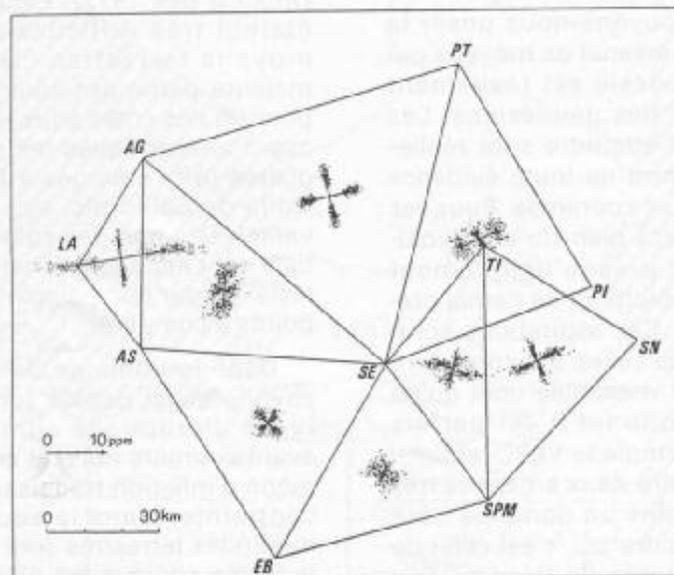
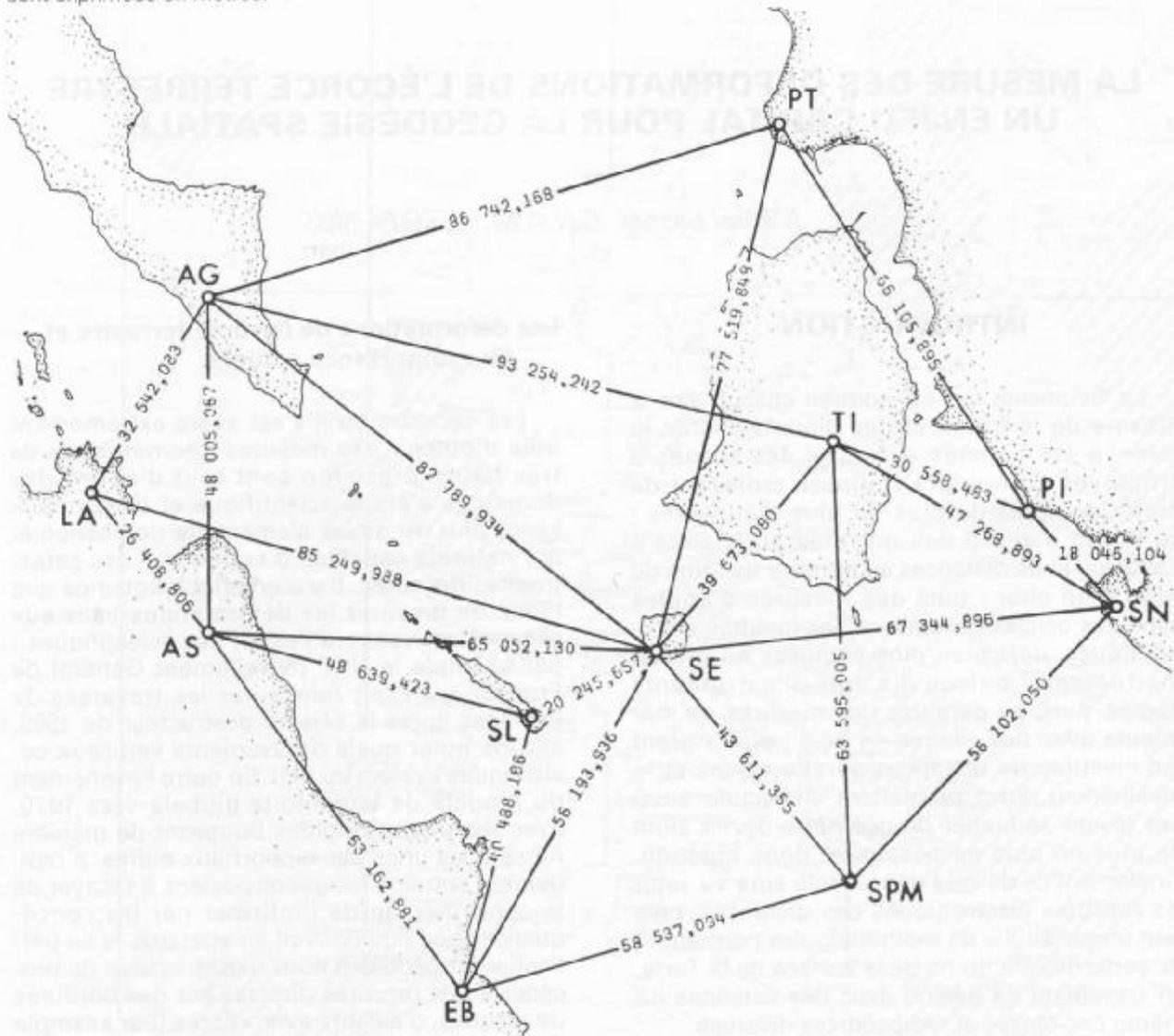
Aujourd'hui, nous pouvons nous poser la question de savoir si cet arsenal de moyens qui sont utilisables en Géodésie est réellement nécessaire aux besoins des géodésiens. Les précisions que l'on peut atteindre sont réellement considérables, et vont de toute évidence très au delà des nécessités courantes. Pour ces dernières, chacun recherche bien sûr des évolutions techniques, mais presque uniquement dans le domaine de la rapidité et de l'amélioration des prix de revient. Ces aspirations sont-elles de même nature que celles qui consistent à rechercher la précision maximale quel qu'en soit le prix technologique (et il est parfois gigantesque, voir par exemple la VLBI, radioastronomie différentielle entre deux antennes très distantes) ? Il y a au moins un domaine où il semble possible de répondre oui, c'est celui de la mesure des mouvements de l'écorce terrestre, avec domaines d'applications les mouvements tectoniques (pré et post-sismiques par exemple), les déformations pré-éruptives des volcans ainsi que les glissements de terrain.

## Les déformations de l'écorce terrestre et leur importance actuelle

Les secteurs où il s'est avéré extrêmement utile d'obtenir des mesures géométriques de très haute précision sont tout d'abord des domaines d'étude scientifique et de connaissance plus ou moins élémentaire de phénomènes naturels capables d'engendrer des catastrophes majeures. Il y a en effet longtemps que l'idée de mesurer les déformations liées aux séismes est venue à l'esprit des scientifiques : par exemple le NGF (Nivellement Général de France) avait fait remesurer les traverses de Lambesc après le séisme destructeur de 1909, afin de noter quels mouvements verticaux co-sismiques avaient eu lieu. En outre l'avènement du modèle de tectonique globale vers 1970, avec ses plaques rigides bougeant de manière notable les unes par rapport aux autres, a rapidement entraîné les géophysiciens à essayer de le confirmer ou de l'infirmer par les conséquences que l'on pouvait en attendre, et en particulier en géodésie nous avons essayé de procéder à des mesures directes sur des bordures de plaques, d'ailleurs avec succès (par exemple Djibouti dès 1972). Evidemment ces mesures étaient très difficiles à effectuer avec des moyens terrestres classiques, puisque la majeure partie des zones actives est au moins pour un des côtés sous la mer, ce qui rendait assez anecdotiques les quelques succès enregistrés (rifts émergés à Djibouti ou en Islande, Golfe de Californie, etc... voir figure page suivante). Dès que des solutions en géodésie spatiale sont apparues, il est clair que c'est un obstacle majeur qui a disparu : la distance entre les points à comparer.

Dans le domaine de la volcanologie, nous savons aussi depuis longtemps que certains types d'éruptions sont précédés de signes avant-coureurs nets, et en particulier de phénomène d'inflation traduisant les changements de contraintes dans le sous-sol. Là encore, les méthodes terrestres sont difficiles d'emploi, car la forme conique est peu apte à permettre des visées entre les points, et par ailleurs des méthodes optiques sont toujours délicates lorsque les conditions météorologiques sont mauvaises, ce qui est souvent le cas (panaches de vapeurs, zones tropicales nuageuses pour

Représentation au 1/1.000.000 du réseau géodésique de Basse Californie (Mexique) les distances mesurées en 1982 sont exprimées en mètres.



Réseau de trilatération au centre du Golfe de Californie avec les composantes principales des tenseurs de déformations des triangles correspondant à la période Mars 1982 - Mars 1986. Les nuages de points représentent des domaines d'erreurs obtenus avec 150 simulations Monte Carlo, prenant en compte un écart-type sur chaque distance de 0.75 ppm pour les observations de 1982 et de 0.43 ppm pour les observations de 1986, à partir de l'estimation de la précision sur le réseau (Kasser et al., 1987).

beaucoup de volcans etc...) Et les mouvements du sol pré-éruptifs sont de toutes façons tellement réduits que seules des méthodes extrêmement précises sont finalement de quelque utilité. Par ailleurs, il est aussi tentant d'obtenir des mesures quasi-continues afin de permettre un suivi qui permette, en parallèle avec la sismologie, de fournir une indication utile aux autorités civiles chargées de la protection des personnes et des biens. Tout ceci peut plus ou moins selon le système être réussi avec des méthodes de géodésie spatiale, GPS plus au moins aménagé, DORIS sous forme de balises de terrain autonomes.

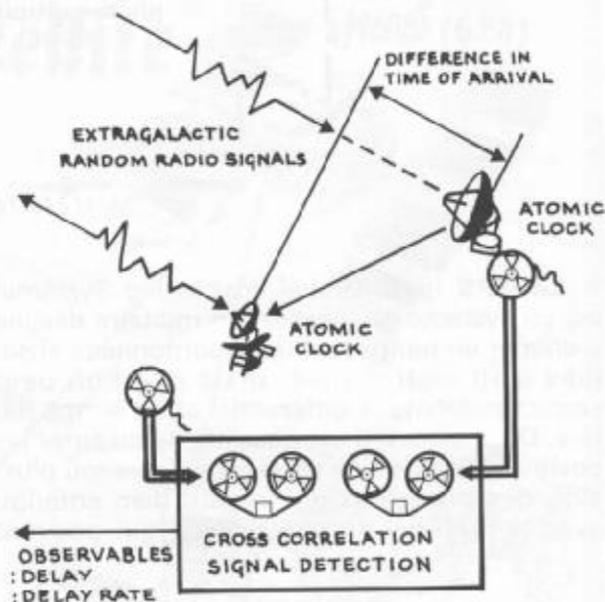
Les mêmes remarques s'appliquent aux études de glissement de terrain. En effet, il a également été noté depuis de nombreuses années que les mouvements du sol qui liés à des phénomènes d'instabilités de surface sont capables d'engendrer des glissements de terrain catastrophiques, sont précédés de périodes plus ou moins longues d'accélération qui correspondent à une mise en mouvement de plus en plus rapide de grosses masses de terrain. Ceci se fait à l'occasion des ruptures des aspérités caractérisant la surface de glissement, et cette accélération est très rapidement mesurable. Qui plus est, il est parfois possible de déduire de cette cinétique une date probable pour la rupture catastrophique, en utilisant des modèles peu compliqués d'ailleurs. Là encore, les mesures terrestres rencontrent vite leurs limites, puisqu'elles ne peuvent pas garantir la continuité des suivis (il faudrait avec des méthodes optiques que la visibilité reste parfaite, ce qui est évidemment impossible). De plus on ne peut pas toujours disposer d'une topographie qui mette à disposition des géomètres un ou plusieurs points d'observations permettant de voir toute la zone instable. Et puis en montagne il peut y avoir de la neige qui recouvre les cibles, etc... Des méthodes radio-électriques sont nécessaires pour être réellement tout-temps, et des méthodes spatiales sont souhaitables pour s'affranchir au mieux des contraintes de topographie.

Nous avons donc ainsi plusieurs secteurs où il est utile, voire capital de pouvoir mesurer des mouvements du sol, mais où des moyens financiers ne sont que très rarement disponibles pour faire évoluer l'instrumentation dans le sens nécessaire. La tectonique fondamentale n'est pas un enjeu économique, et si la sismogénèse en est un, c'est uniquement dans les pays développés - où cet enjeu est solvable - et dans ces pays les risques sont rares (Californie et Japon presque exclusivement). Les glissements de terrain menacent souvent des voies de communication et leur surveillance est elle aussi, souvent solvable ; par contre les mouvements en jeu sont très locaux et donc relativement simples à observer même avec des méthodes mal optimisées, et peu de recherches découlent de ce type de besoins.

## LES METHODES DE GEODESIE SPATIALE EMPLOYEES POUR LES MESURES DE DEFORMATIONS DE L'ECORCE TERRESTRE.

Il n'est pas surprenant de noter finalement que pratiquement toutes les méthodes de géodésie spatiale ont été mises au point et promues pour des applications militaires, américaines pour la plupart. Les applications scientifiques ou civiles ont été souvent très vite trouvées certes, mais ni la VLBI, ni la télémétrie laser sur satellites, ni le GPS n'ont été destinées à nos applications. Ce sont généralement des sous-produits plus ou moins gratuits de ces méthodologies qui ont permis à la géodésie spatiale d'acquiescer ses lettres de noblesse dans le milieu scientifique.

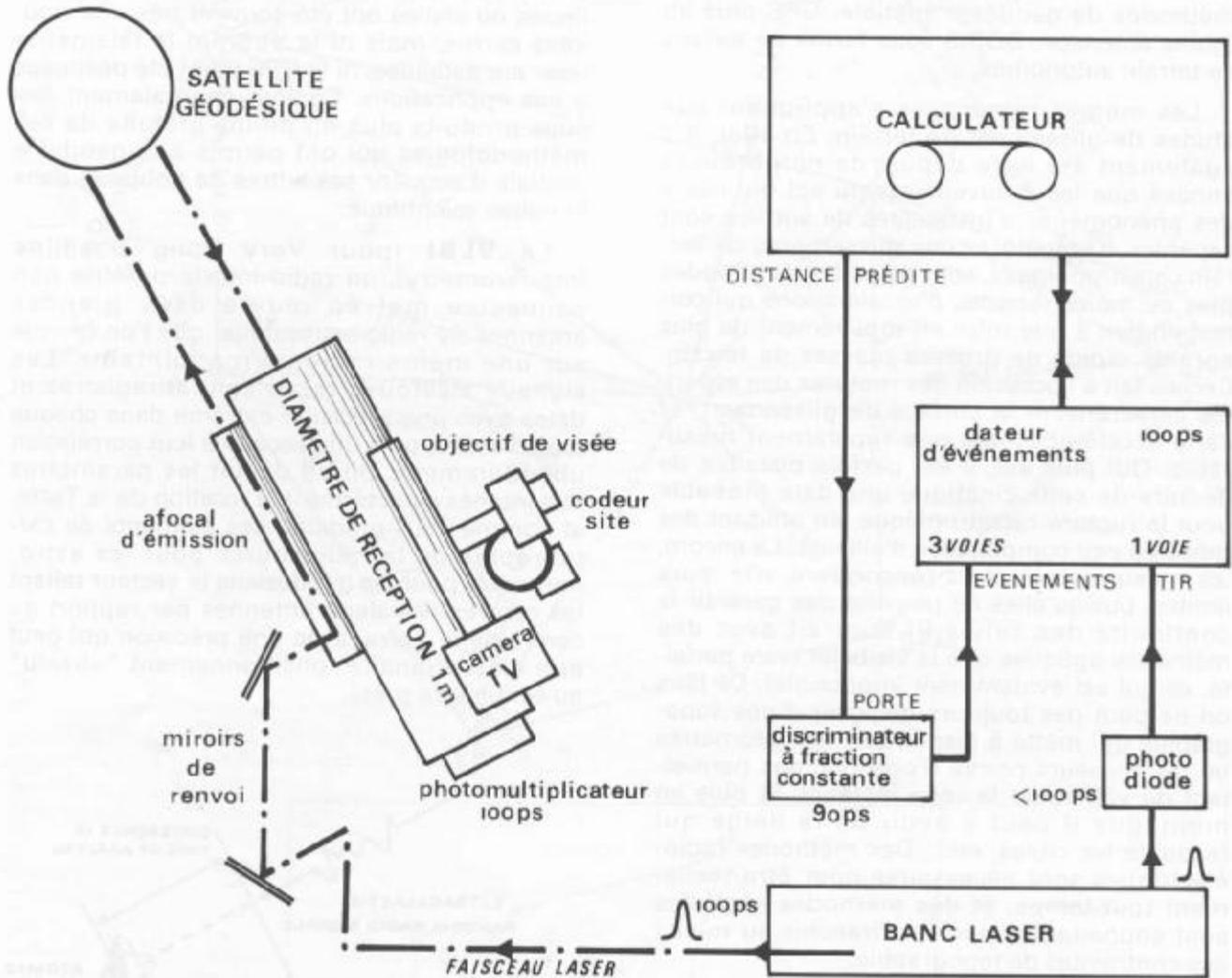
La **VLBI** (pour Very Long Baseline Interferometry), ou radio-interférométrie non connectée met en œuvre deux grandes antennes de radio-astronomie, que l'on braque sur une même radiosource lointaine. Les signaux aléatoires reçus sont enregistrés et datés avec une précision extrême dans chaque observatoire, puis on procède à leur corrélation ultérieurement. On en déduit les paramètres instantanés caractérisant la rotation de la Terre, et comme sous-produits, des éléments de cartographie de la radiosource pour les astronomes, et pour les géodésiens le vecteur reliant les centres des deux antennes par rapport au centre de la Terre, avec une précision qui peut être extraordinaire (positionnement "absolu" au centimètre près).



Basic VLBI Configuration

**La télémétrie laser sur satellites (SLR, pour Satellite Laser Ranging)** est basée sur un segment spatial (des satellites très massifs, équipés de réflecteurs laser) et des stations terrestres capables de mesurer la distance instantanée entre elles et ces satellites en chronométrant le temps mis par une impulsion laser pour faire l'aller-retour. Le produit de base est une

orbite très précise (à quelques centimètres près), et donc un excellent moyen de mesurer le champ de pesanteur terrestre. Le sous-produit qui sert en géodésie est un positionnement absolu extrêmement précis (sensiblement équivalent à la VLBI), avec en sus une possibilité de concevoir des stations mobiles permettant de s'installer en tout point du monde.



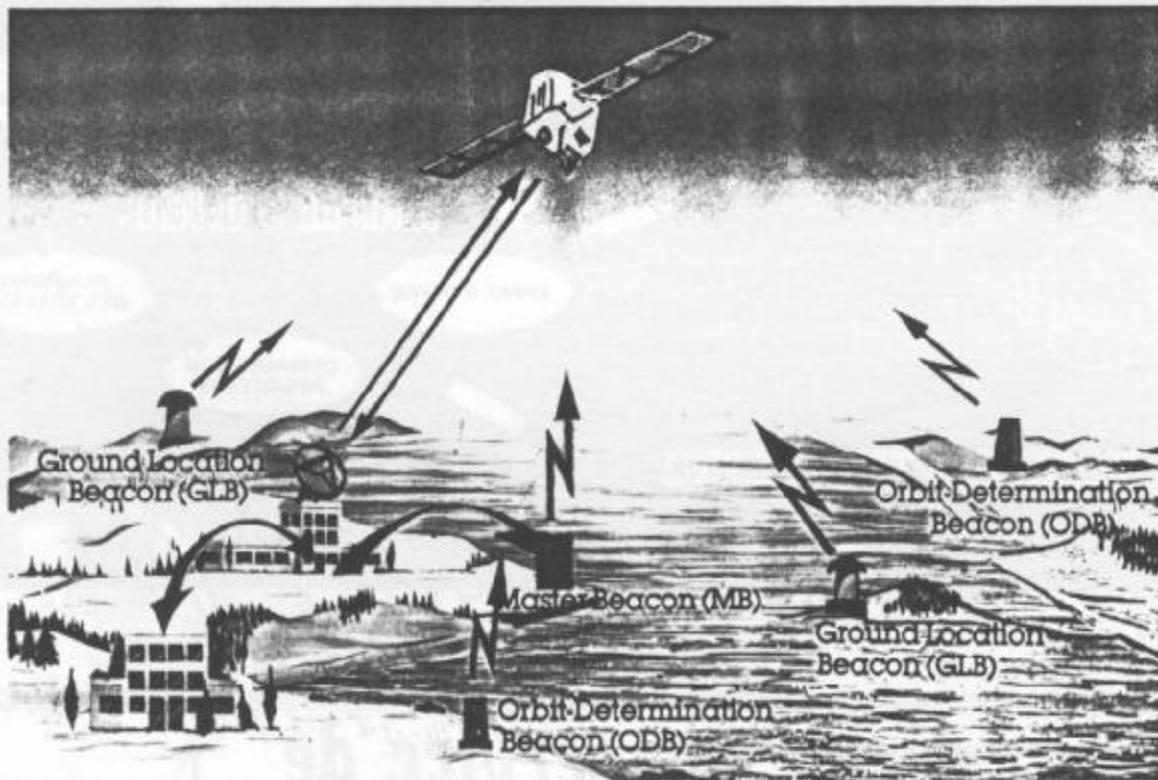
**Le GPS** (pour Global Positioning Système) est un système de localisation militaire destiné à donner en temps réel des coordonnées absolues à 10 mètres près, mais que l'on peut employer en mode différentiel et en temps différé. Dans ce cas, il est possible de mesurer les positions relatives de deux récepteurs (ou plus) avec des précisions qui varient bien entendu avec le matériel employé, mais qui peuvent

rester voisines du centimètre jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres d'éloignement dans les configurations ultimes. S'agissant d'une liaison radioélectrique entre des satellites qui émettent et des récepteurs au sol, cela donne lieu à un positionnement tous temps sans aucune contrainte de fonctionnement autre que la vision directe d'au moins quatre de ces satellites.

**DORIS** est un dispositif radioélectrique utilisant des balises émettrices au sol et un récepteur (ou plusieurs) en orbite. Destiné par le CNES à permettre une excellente orbitographie du satellite équipé du récepteur (un décimètre), ce dispositif donne la possibilité, là aussi comme sous-produit de l'application fondamentale, de positionner les balises émettrices de manière absolue avec une remarquable précision (un décimètre aussi). Une variante consiste alors à utiliser des balises uniquement

pour leur capacité à être localisées, avec l'intérêt d'une collecte centralisée des éléments de mesure, et donc une application très adaptée à la mesure en continu de mouvements du sol (glissements de terrain, volcans, etc...).

D'autres outils de géodésie spatiale existent, mais soit ils sont périmés (observations angulaires optiques de satellites, mesures Doppler sur satellites Transit, etc...), soit ils ne sont pas adaptés au positionnement (télémétrie laser sur la Lune).



The DORIS system: Block diagram

## STRATEGIES DE MESURES GEODESIQUES DES MOUVEMENTS DE L'ECORCE TERRESTRE.

On comprendra aisément après l'exposition faite précédemment que dans ce genre d'applications, les méthodes de Géodésie spatiale ont été largement employées, essentiellement parce qu'elles permettent d'obtenir des résultats qui étaient inaccessibles auparavant. Toutefois il reste bien entendu de nombreux cas où les méthodes terrestres sont nécessaires, grâce à leurs précisions sur courtes distances (pratiquement impossibles à obtenir autrement) et surtout à leurs coûts et leurs rapidités. Cet arsenal de moyens qui est à notre disposition doit être analysé avec soin, les différentes solutions possibles ne sont que rarement concurrentes, et apparaissent plutôt

comme complémentaires. Nous prendrons quelques exemples :

### Glissements de terrains :

Si face à la zone en mouvement se trouve un versant permettant une vision générale de celle-ci, des méthodes terrestres sont intéressantes : mesures d'angles et de distances, photogrammétrie terrestre ou aérienne permettent de dresser une cartographie des mouvements à un coût très accessible. Dans des cas de topographies moins favorables, la mesure des mouvements à une cadence éventuellement élevée (jusqu'à une mesure par jour) peut être menée avec DORIS, ainsi qu'avec GPS doublé par une télétransmission des données vers un site central (liaison satellite montante, ou liaison terrestre VHF ou téléphonique, etc...). Ce dernier cas permet si besoin est (état d'alerte) d'augmenter considérablement la cadence de mesures.

## Mouvements tectoniques.

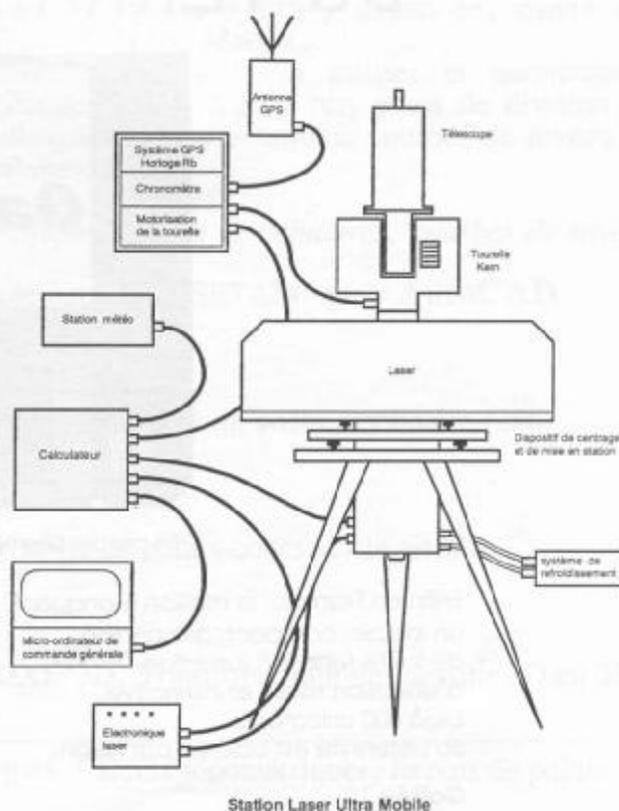
Le problème que l'on cherche souvent à résoudre aujourd'hui est celui-ci : Quelle est la cinétique actuelle des plaques tectoniques et des zones de déformations qui apparaissent autour d'elles dans les régions complexes ? On ne manque pas en effet de données sur les mouvements qui ont eu lieu depuis quelques millions d'années, mais dans certaines zones il est nécessaire de mesurer les vitesses actuelles pour bien comprendre ce qui se passe. Ceci n'est pas seulement utile d'un strict point de vue scientifique, c'est également nécessaire pour évaluer correctement les risques géologiques qui en découlent (seismes, mouvements de terrain, ...). On est donc amené à mesurer les positions relatives de points distants de centaines, voire de milliers de kilomètres. Pour ce faire, la géodésie spatiale est presque indispensable, car il est bien rare que les conditions de terrain (topographie, visibilité, ...) se prêtent facilement à l'observation de réseaux de plus de cent kilomètres d'ouverture. Si des observations existent, la VLBI donnera d'excellents résultats. Mais les antennes existantes sont rares et distribuées de manière très inégale sur Terre, généralement pas dans les zones intéressantes. De même pour les stations de SLR, sauf à employer des stations mobiles, mais dont le coût d'observation est malheureusement encore fort élevé. On compte utiliser de plus en plus le matériel DORIS dans les prochaines années, mais pour le moment la méthode la plus indiquée est GPS dans son mode le plus précis. Dans ce mode, il faut disposer autour de la zone de points VLBI ou SLR permettant de fournir des coordonnées absolues très précises. Ces quelques points seront, si des stations fixes n'existent pas, obtenus par des stations SLR mobiles. On comprend qu'il s'agit là d'opérations très lourdes, mais qui permettent en quelques années de mesurer des vitesses tectoniques inférieures au centimètre par an, ce qui donne accès à la solution de la plupart des problèmes tectoniques que nous nous posons.

## Recherches en cours dans les groupes Français

Les recherches menées en France sont le fait de plusieurs laboratoires incluant le GRGS, le CNES, le CNRS (au travers de l'INSU), l'IPGP, l'IGN, l'ENS, PARIS VI et VII, etc...

Au plan matériel, un parc de récepteurs GPS appréciable est partagé entre les différents organismes propriétaires (une douzaine à la fin 1991). Un des éléments clés de notre future capacité de travail est le développement d'une station laser SLR très compacte, et dont le coût de transport et de fonctionnement seront très réduits (IGN-Laboratoire OEMI et CERGA-

Observatoire de la Côte d'Azur). Avec le nombre de satellites laser disponibles, il est escompté qu'en une semaine de mesures un point ayant une précision absolue de 2 cm pourra être obtenu n'importe où dans le monde. L'emploi en géophysique sera soit pour établir des points indépendants destinés à être réitérés, soit pour asseoir de grands réseaux GPS. Par ailleurs, un parc de 6 balises DORIS de terrain est employé pour évaluation sur des expériences pilotes, et d'ici peu il est prévu d'employer ce matériel sur des sites scientifiquement intéressants.



Au plan du traitement des données, une activité importante est menée au GRGS, au CNES, à l'IGN. Cette activité n'est certainement pas appelée à diminuer vu le nombre de programmes en cours et les besoins des géophysiciens en la matière.

## CONCLUSION

Au travers de ce rapide tour d'horizon, on retiendra l'importance croissante que représente la Géodésie spatiale pour les études de déformations de l'écorce terrestre. Mais même si c'est moins apparent, il faut noter que la proposition symétrique est au moins aussi vraie. Les applications tectoniques représentent un enjeu capital pour les géodésiens et même pour l'avenir de la géodésie. En effet, quels besoins existent aujourd'hui pour chercher plus de précision ? Pratiquement aucun, exceptés

ceux des géophysiciens. Toutes les recherches majeures en géodésie ont été dictées par des intérêts extérieurs à la géodésie, et presque uniquement militaires d'ailleurs. L'objectif n'a cessé d'être de produire plus pour moins cher, et il est devenu extrêmement rare qu'un usager civil soit prêt à investir significativement pour avoir plus de précision que celle qui est communément disponible.

En matière de recherche, tous les efforts de la communauté internationale se sont répartis dans deux directions : améliorer la productivité, et améliorer la précision. Alors que le premier domaine, très pragmatique, a surtout été traité par les fabricants de matériels et quelques rares laboratoires ou Instituts, le second a été considéré comme bien plus intéressant par la plupart des laboratoires, alimentés par les "aubaines" inespérées qu'ont représenté les développements militaires. Mais une telle course à la précision aurait été stérile s'il n'y avait eu quelques applications : les tectoniciens se sont alors trouvés à point à nommé avec leurs besoins fantastiques en matière de précision. C'est ainsi que

dans les années 1980, la plupart des géodésiens de ces groupes se sont découverts une subite passion pour la géophysique et les problèmes de tectonique.

Les perspectives dans ce secteur ne sont donc plus aussi brillantes qu'elles ne l'ont été précédemment. La précision absolue du centimètre que l'on sait pratiquement obtenir représente une sorte de point final dans les recherches de précision, puisqu'au delà une somme considérable de bruits locaux commence à devenir prépondérant (effets thermiques, des nappes phréatiques, des petits mouvements de surface). Si un jour le millimètre "en absolu" est accessible, il semble peu probable qu'il rapporte grand chose en termes scientifiques.

Par contre un travail considérable reste à effectuer dans le domaine de l'optimisation des procédés existants, dont certains sont beaucoup trop onéreux pour être réellement utilisables. C'est dans ce sens qu'un effort majeur devra être effectué dans les prochaines décennies.