

**UNIVERSITE DE NICE SOPHIA ANTIPOLIS**

**FACULTE DES SCIENCES**

**TRAVAIL D'ETUDE  
DE LICENCE INFORMATIQUE**

**SESSION 2003-2004**

**GEODESIE : ANALYSE DE  
DÉFORMATION DE RÉSEAU  
GÉODÉSIQUE À PARTIR DE DONNÉES  
SATELLITAIRES GPS**

Présenté par

Guillaume COGRANNE

&

Lionel DANIEL

Sous la direction de M. Jacques ANGELIER, professeur Université Pierre et Marie Curie, laboratoire GéoSciences Azur, unité mixte du CNRS, équipe Déformation Active, Rupture et Ondes.

## **Remerciements**

Ce rapport a été effectué dans le cadre des travaux d'étude de fin d'année de Licence Informatique. Qu'il nous soit permis de remercier Monsieur Jacques ANGELIER qui nous a suivi tout au long de cette étude et nous a reçu dans le laboratoire de Villefranche où nous avons découvert une partie de son travail. Nos remerciements s'adressent également à Madame Françoise BAUDE, responsable des licences informatique, qui nous a mis en relation avec M. ANGELIER.

## Sommaire

1	Introduction.....	5
2	Définitions et applications de la géodésie.....	6
2.1	La géodésie, mais qu'est-ce donc réellement ?.....	6
2.1.1	Définition.....	6
2.1.2	Un peu d'Histoire.....	6
2.2	La géodésie physique.....	8
2.2.1	Réseaux de contrôle géodésiques et altimétriques.....	8
2.2.2	L'altimétrie.....	9
2.2.3	Le géoïde et les ellipsoïdes.....	9
2.2.4	La gravimétrie.....	11
2.3	La géodésie spatiale.....	11
2.3.1	L'interférométrie.....	11
2.3.2	L'altimétrie radar.....	12
2.3.3	La télémétrie radioélectrique.....	12
2.3.4	La télémétrie laser.....	12
2.3.5	Système de référence spatiale.....	12
2.3.6	Le GPS.....	12
2.3.7	DORIS.....	13
2.3.8	V.L.B.I.....	14
2.4	Conclusion.....	14
3	Méthodes de recherche de failles.....	15
3.1	Méthode 1: Recherche de failles sur bloc rigide.....	15
3.1.1	Identification des blocs.....	15
3.1.2	Représentation graphique sur une carte.....	15
3.1.3	Analyse de la carte.....	15
3.2	Méthode 2: Recherche de failles sur bloc rigide ou élastique.....	16
3.2.1	Détermination de la grille.....	16
3.2.2	Interpolation des vecteurs de déplacement aux nœuds de la grille.....	16
3.2.3	Calcul des tenseurs de déformation pour chaque case de la grille.....	16
3.2.4	Calcul du raccourcissement et de l'allongement pour chaque case.....	17
3.2.5	Représentation graphique sur une carte.....	18
3.2.6	Analyse de la carte.....	19
3.3	Validation des résultats.....	20
4	Etude de cas.....	21
4.1	Exemples sur un simple triangle isolé.....	21
4.2	Exemple du Canal Chinyuan Radier.....	23
4.3	Autre exemple.....	27
4.4	Faille en Islande.....	28
5	Courte Analyse d'un Système Informatisé.....	30
5.1	Données d'entrée du système informatisé.....	30
5.2	Choix de l'échelle de temps.....	30
5.3	Elaboration de la grille.....	30
5.4	Calcul des tenseurs de déformation de chaque nœud.....	31
5.5	Calcul du raccourcissement et de l'allongement pour chaque tenseur.....	31
5.6	Affichage graphique du résultat.....	31
5.7	Exportation des résultats.....	32
5.8	Interprétation par réseau neuronal.....	32
6	Conclusion.....	34

# **1 Introduction**

Désireux de découvrir un domaine satellite à l'informatique, nous avons remarqué le sujet proposé par Monsieur Jacques ANGELIER qui semblait correspondre à ce que nous recherchions. En effet, nous désirions vraiment choisir un travail d'étude où la réflexion serait au premier plan. De plus, ce sujet traitait d'un domaine que nous ne connaissions pas du tout ; En le choisissant, notre culture générale s'en trouva enrichie.

Vous seront d'abord présenté ce qu'est la géodésie et ses nombreuses applications, suivi d'une étude des méthodes de recherche des failles à partir d'un réseau géodésique. Ensuite, nous vous exposerons différents cas concrets sur lesquels figure la faille trouvée. Enfin, vous trouverez une courte analyse de ce que serait le logiciel si nous avions eu le temps d'implémenter le projet.

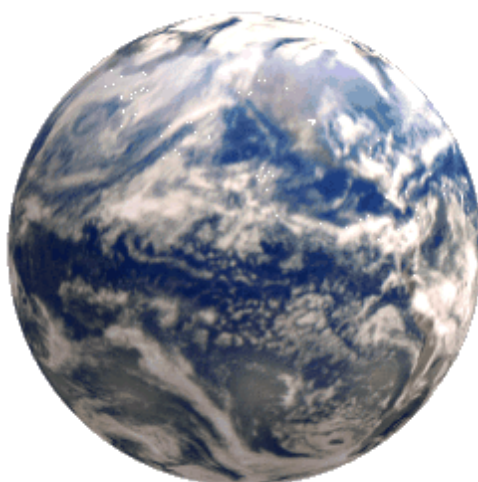
## 2 Définitions et applications de la géodésie

### 2.1 La géodésie, mais qu'est-ce donc réellement ?

#### 2.1.1 Définition.

La géodésie est la branche des mathématiques appliquées qui, grâce à l'observation et à la mesure, détermine les positions exactes des points ainsi que les formes et superficies de grandes régions de la surface de la Terre, la forme et les dimensions de la Terre et les variations de la pesanteur sur la Terre.

Par exemple la photo suivante montre que la Terre paraît ronde, mais elle ne l'est pas !



La géodésie va ainsi permettre de connaître la forme exacte de la Terre, permettant par exemple d'obtenir le « Géoïde », mais nous reviendrons sur ce point plus tard.

#### 2.1.2 Un peu d'Histoire.

Depuis toujours, l'Homme a toujours essayé de faire des cartes et d'étudier les dimensions et la forme de la Terre. Au début, nous nous intéressions à la région située autour de notre maison. Puis, à mesure que nous avons voyagé de plus en plus loin de chez nous, nous nous sommes intéressés à des territoires de plus en plus grands. Les dimensions de la Terre, du sol où nous vivons, ont alors commencé à nous intéresser.

Les premiers mathématiciens et philosophes grecs, comme Homère, Platon et Pythagore, avaient tous leurs idées sur la forme et les dimensions de la Terre. Quelques-uns croyaient que la Terre était plate (l'un d'entre eux croyait même qu'elle était rectangulaire!), mais la plupart s'entendaient pour dire qu'elle était ronde, ou « sphérique ».

Des faits appuyant la théorie de la « Terre ronde » ont été rapportés par des marins de la Grèce antique. Ils ont remarqué que lorsqu'ils s'approchaient de leur port d'attache, ils ne pouvaient voir que les éléments élevés. Et qu'à mesure qu'ils approchaient, la Terre semblait « sortir » de la mer.

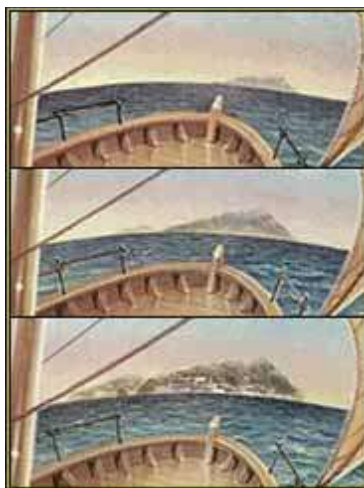


Figure 1 : Image montrant que la Terre est ronde datant de l'antiquité

Les Grecs ont fait beaucoup d'évaluations des dimensions de la Terre. Ces résultats étaient assez bons pour l'époque, mais demeuraient approximatifs. Jusqu'au jour où un homme très curieux eut l'idée d'une méthode qui pourrait lui permettre non seulement de prouver que la Terre était ronde, mais aussi de mesurer sa taille.

Il s'agissait d'Ératosthène, un mathématicien grec. Cet homme, qui travaillait et vivait en Égypte, eut l'idée d'une méthode pour mesurer la Terre d'une façon plus précise.

Ératosthène vivait dans une ville appelée Syène (qui porte maintenant le nom de Aswan). Il remarqua que pendant le plus long jour de l'année (au solstice d'été), au moment où le soleil était à son zénith, un bâton placé perpendiculairement au sol dans le sable ne projetait aucune ombre. En fait, il avait d'abord remarqué que le soleil du midi pénétrait verticalement dans un puits à sec et que les murs du puits étaient éclairés par le soleil. C'était comme si le soleil se situait directement au-dessus du puits.

Ératosthène se demanda alors si un deuxième bâton planté dans le sable dans un lieu différent allait projeter une ombre. Dans l'affirmative, cela signifierait que la Terre ne pouvait être plate (comme certains le prétendaient), et qu'elle était ronde. Grâce à ses connaissances en mathématique, il a déduit que s'il pouvait mesurer la distance entre les deux bâtons ainsi que l'ombre du deuxième bâton, il pourrait calculer les dimensions de la Terre.

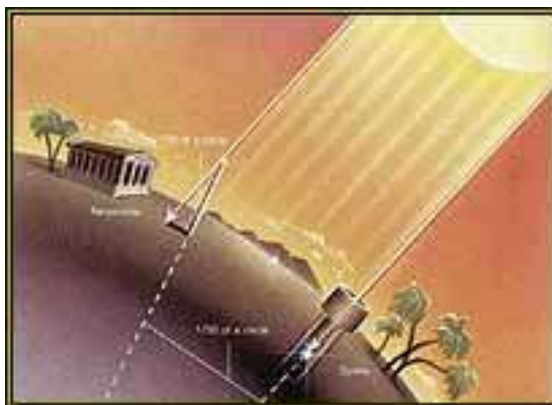


Figure 2 : Schéma montrant la méthode d'Ératosthène

Ératosthène alla à Alexandrie, située à 800 km de là, et planta un deuxième bâton dans le sable. Et évidemment, ce bâton projetait une ombre. Ératosthène mesura alors l'ombre et, à partir de la distance entre les deux bâtons, il calcula que la circonférence terrestre était de 40 234 km. De nos jours, la valeur acceptée de la circonférence terrestre à l'Équateur est 40 074 km. Une différence de seulement 160 km! C'est comme essayer de trouver la taille d'un terrain de soccer et ne se tromper que d'une longueur de deux ballons! C'est vraiment incroyable pour une personne qui a mesuré les distances grâce au déplacement que son chameau pouvait parcourir en une journée !

Les choses n'évolueront que très peu jusqu'au 19ème siècle et l'arrivée de nombreux réseaux géodésiques. A partir de là, la géodésie ne se limite plus à la simple étude de la forme de la Terre mais devient aussi l'étude de ses mouvements. Avec l'arrivée de la géodésie Spatiale au 20ème siècle, la géodésie prend alors une toute nouvelle dimension. Mais nous allons développer cela un peu plus tard. Grâce à ces améliorations, ce sont, par exemple, les géodésiens qui indiquent maintenant aux tectoniciens comment bougent les plaques. En parallèle à cela, la géodésie Physique progresse elle aussi en profitant de ces nouveautés technologiques et de la puissance de calcul de l'informatique. Par exemple, le Géoïde que l'on obtient de nos jours est presque parfait.

L'altimétrie, le nivellement, la tectonique des plaques, (et bien d'autres) sont autant de domaines dans lesquels la géodésie tient dorénavant une place primordiale.

## **2.2 La géodésie physique**

La géodésie physique s'attache surtout à l'étude du champ de pesanteur et à l'altimétrie, mais ses récents progrès viennent aussi aborder diverses branches de la physique du globe touchant à la géodynamique interne.

### **2.2.1 Réseaux de contrôle géodésiques et altimétriques.**

Un réseau de contrôle est essentiellement un ensemble de points matérialisés par des repères au sol espacés et inter-reliés, dont la position et l'altitude sont connues avec précision.

Jusqu'à ces dernières années, les techniques de la géodésie étaient relativement classiques : nivellement, astronomie de position (avec détermination de l'heure et de la distance zénithale des étoiles au lieu mesuré), ou encore la triangulation.

Concernant la technique de mesure des distances, la méthode des minutieuses constitutions de bases rectilignes horizontales de 10 Km que l'on amplifiait a cédé le pas aux mesures par faisceau électromagnétique. La méthode classique aboutit, au sommet, à l'établissement des réseaux géodésiques.

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

## 2.2.2 L'altimétrie.

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

Il existe deux types de système de référence :

1. La hauteur sur l'ellipsoïde (nous préciserons juste après de quoi il s'agit vraiment), qui est celle mesurée par GPS ;
2. L'altitude sur le géoïde (là encore, nous préciserons plus tard de quoi il s'agit).

Le géoïde est la surface équipotentielle servant de référence aux altitudes en France. L'image suivante montre bien les différents types de systèmes de références :

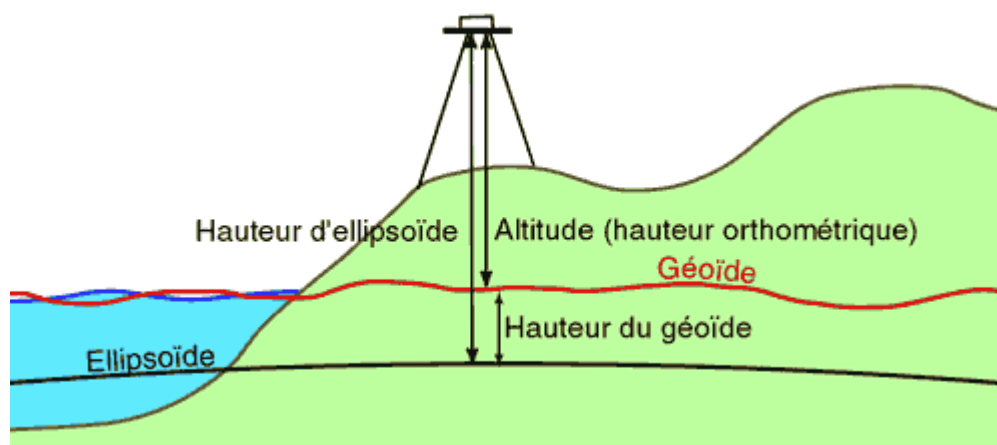


Figure 3 : Différents types de systèmes de références

## 2.2.3 Le géoïde et les ellipsoïdes.

On distingue fondamentalement la notion d'ellipsoïde de référence de la Terre (une surface définie mathématiquement, qui sert de référence pour l'établissement des cartes) et la notion de géoïde (surface qui se confond avec le niveau moyen des océans).

Comme nous venons de l'aborder, les calculs de géodésie exigent le choix préalable d'une surface mathématique de référence, représentant correctement la surface du géoïde pour une région donnée, sur laquelle ils puissent s'effectuer de façon satisfaisante. Ces surfaces sont des ellipsoïdes de révolution, dont les caractéristiques varient en fonction de leur lieu géographique d'utilisation, et de leur objectif d'application. Un grand nombre d'ellipsoïdes de révolution, représentant localement une approximation du géoïde, ont été créés. On peut aujourd'hui en recenser plus de deux cents.

Toute géodésie nationale est développée à partir d'un point fondamental ou ont été déterminés avec le maximum de précision les éléments astronomiques d'orientation de la verticale. Des réseaux de points géodésiques sont constitués sur le "terrain", et les mesures d'angles et de distances entre ces points permettent, après compensation, d'évaluer les caractéristiques d'un ellipsoïde. Cette méthode est appelée triangulation (technique que nous utiliserons plus tard).

Le géoïde est un concept théorique. On ne peut ni le voir, ni le toucher, ni creuser dans le sol pour le trouver. Le géoïde est le prolongement naturel de la surface du niveau moyen de la



mer, sous la masse continentale (voir Figure 3 : Différents types de systèmes de références). Le géoïde peut être considéré comme une surface équipotentielle de pesanteur, passant par l'origine du nivellement, c'est-à-dire ajustée au niveau moyen des mers. Le géoïde est loin de présenter une surface de révolution parfaite, mais comporte, notamment, un aplatissement aux pôles et un renflement à l'équateur. La différence des rayons terrestres entre le pôle et l'équateur est de 21 km.

Voici l'image représentant le géoïde de la Terre que tout le monde connaît :

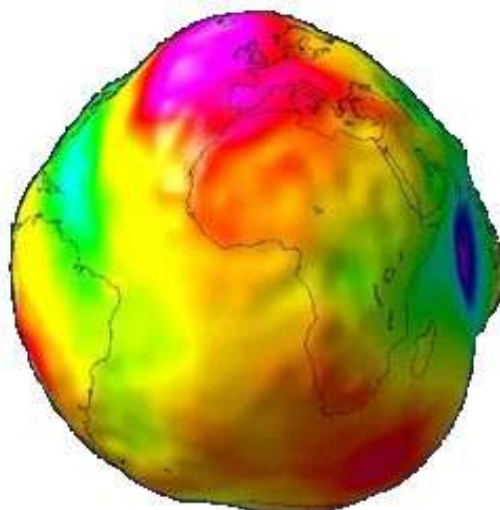


Figure 4 : Géoïde terrestre

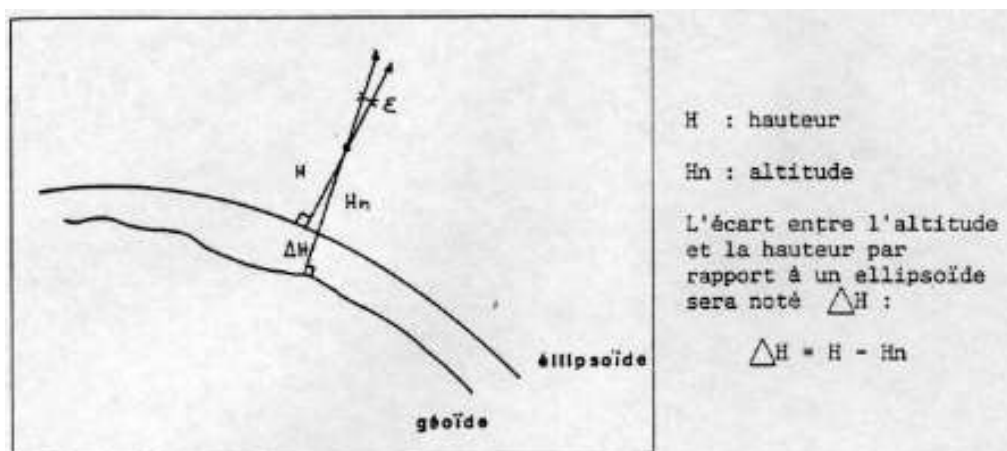


Figure 5 : Schéma montrant l'écart entre le géoïde et un ellipsoïde

Pour un ellipsoïde donné,  $\Delta H$  est fonction de la latitude et de la longitude du point. C'est une donnée expérimentale. L'altitude d'un point ne dépend pas de l'ellipsoïde choisi : c'est la distance entre le point et le géoïde selon la verticale locale de pesanteur. La hauteur est la distance entre le point et l'ellipsoïde selon la normale locale à cet ellipsoïde. On observe donc un écart angulaire entre ces deux verticales, noté  $\varepsilon$ . C'est également une donnée expérimentale dépendant des coordonnées géographiques du point de l'ellipsoïde choisit.

## 2.2.4 La gravimétrie.

La gravité est une force universelle qui, de par sa nature, ne s'exerce pas uniquement sur Terre. D'après Newton et sa Loi universelle de la gravitation, tous les corps matériels de l'univers s'attirent entre eux. De plus, l'attraction est proportionnelle à la masse des corps et inversement proportionnelle à la distance qui les sépare.

Pour la mesurer précisément, deux moyens existent ; Soit par des études menées directement sur Terre, soit par des mesures depuis l'espace :

1. Etudes menées directement sur Terre. Les gravimètres mesurent l'attraction d'une masse suspendue. En connaissant leurs coordonnées (latitude, longitude et altitude) lorsqu'ils effectuent ces travaux, les chercheurs peuvent créer un réseau de données gravimétriques qui leur permet de cartographier les variations du champ de pesanteur de la Terre.
2. Etudes menées depuis l'espace. Les satellites en orbite autour de la Terre mesurent les variations du champ de pesanteur en enregistrant leur position de manière précise et à intervalles réguliers. Un satellite perd de l'altitude et se rapproche de la surface de la Terre lorsqu'il survole une région montagneuse où l'attraction est particulièrement forte.

## 2.3 La géodésie spatiale

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

### 2.3.1 L'interférométrie

L'interférométrie vise à estimer la différence de phase entre deux acquisitions afin de quantifier la variation de distance. Le but est de mesurer les déplacements d'une surface entre deux prises. Idéalement, il suffit de disposer de deux acquisitions prises dans des conditions d'observation strictement identiques, afin de ne mesurer que les déplacements de surface et non le relief ; mais comme cela est rarement envisageable, le recours à une acquisition en stéréovision est indispensable pour s'affranchir du déphasage introduit par le relief.

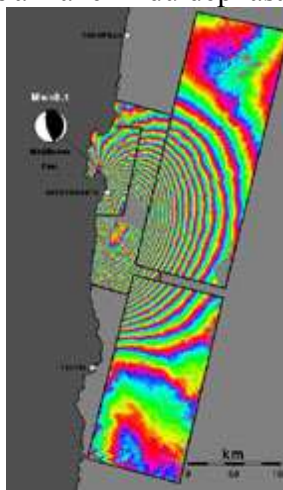


Figure 6 : Image obtenue par interférométrie

Sur la figure ci-dessus, les dégradés montrent le décalage entre les deux prises de vue ayant permis d'obtenir cette image.

### **2.3.2 L'altimétrie radar**

L'altimétrie radar utilise des émetteurs-récepteurs d'impulsions radar embarqués sur des satellites. La mesure du temps de trajet des ondes, qui vont se réfléchir à la surface des océans, permet de calculer l'altitude du satellite avec une précision de quelques centimètres.

Cette technique a été appliquée avec succès à la mesure de l'amplitude des marées, à l'étude des courants marins, et, en planétologie, à la représentation de la topographie de Vénus (sonde Magellan lancée en 1989).

### **2.3.3 La télémétrie radioélectrique**

La télémétrie radioélectrique utilise les mesures radioélectriques de distances, l'effet Doppler-Fizeau ou l'interférométrie. Le Global Positioning System (GPS), le Navigation System with Time and Ranging (NAVSTAR) et le Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégrés par Satellite (DORIS) en sont les applications les plus marquantes. Elles permettent en géodynamique d'étudier la tectonique des plaques, le mouvement des failles, le tracé des zones de subduction sous la surface des océans.

### **2.3.4 La télémétrie laser**

La télémétrie laser utilise des émetteurs installés soit sur télescopes (mesures sol-satellite-sol ou sol-Lune-sol), soit sur satellites (mesures satellite-sol-satellite). La précision varie, suivant les instruments, de 1m à quelques centimètres.

Comme dans les méthodes précédentes, c'est la gestion informatique qui permet la consolidation des données rassemblées dans les observatoires du monde entier, ce qui fait de la géodésie l'une des sciences les plus exemplaires de l'esprit de coopération des chercheurs, car tributaire de la qualité et de la densité des échanges interdisciplinaires internationaux.

### **2.3.5 Système de référence spatiale**

Il faut d'une manière ou d'une autre attribuer des valeurs numériques du monde réel aux coordonnées de points qui existent réellement. Des procédures hautement spécialisées sont utilisées pour positionner avec exactitude quelques points judicieusement choisis. Les observations exhaustives et d'une très grande précision ne sont effectuées qu'en quelques points seulement puisque ces travaux exigent beaucoup de temps et sont extrêmement coûteux. Ces points deviennent les points de référence, auxquels peuvent être rattachés et référés tous les autres levés, et ainsi l'ossature même de notre cadre de référence spatiale.

### **2.3.6 Le GPS**

C'est un des principaux aspects de notre travail d'étude (analyse de déformation à partir de données satellitaires GPS).

Le système de positionnement global (Global Positioning System), ou le GPS comme on l'appelle couramment, est un système de navigation basé sur un réseau de satellites qui émettent des signaux radio. Le système permet de déterminer avec exactitude la position à n'importe quelle heure, n'importe où dans le monde et quelles que soient les conditions météorologiques.

De nos jours les récepteurs GPS sont partout. Les entreprises de camionnage et de taxis les utilisent à des fins de navigation et certains peuvent même communiquer votre position aux services d'urgence si vous avez un accident. Grâce aux récepteurs GPS il est plus que jamais facile de déterminer sa position sur la surface de la Terre.

On sait déjà que le GPS se compose d'un groupe de satellites, mais comment fonctionne-t-il ? Le GPS comprend trois segments : le segment de contrôle, le segment spatial et le segment utilisateurs. Ces trois composantes doivent bien fonctionner pour que le GPS soit utilisable :

1. Segment de contrôle. Le segment de contrôle est le cerveau du GPS. C'est lui qui permet la gestion de tous les satellites. Il suit les satellites dans leur ronde autour de la Terre; il examine l'information acheminée dans le signal radio; il apporte les changements nécessaires pour maintenir les satellites sur leur trajectoire et en bon état de fonctionnement.
2. Segment spatial. Le segment spatial comprend les satellites eux-mêmes. Ils sont appelés satellites NAVSTAR. L'acronyme NAVSTAR se compose des premières lettres des mots de l'expression NAVigation Satellite Timing And Ranging (système de navigation par repérage de temps et mesurage de distances). Le système exige au total 24 satellites. Chaque satellite doit durer environ 10 ans. Des satellites de remplacement sont lancés à intervalles réguliers, même lorsqu'ils ne sont pas nécessaires.
3. Segment utilisateurs. Les utilisateurs sont en fait « nous-mêmes ». Toutes sortes de gens utilisent le GPS à toutes sortes de fins. Bien que le GPS ait été conçu pour les militaires, le nombre des utilisateurs civils est plus grand que celui des utilisateurs militaires.

### **2.3.7 DORIS**

Le système DORIS (Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégré par Satellite) est un système radioélectrique de détermination fine d'orbites et de localisation précise de stations au sol. Il a été conçu et développé par le Centre National d'Études Spatiales, le Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale et l'Institut Géographique National. Le système DORIS se compose des éléments suivants : Un réseau de stations émettrices permanentes, réparties à la surface de la Terre, des récepteurs installés à bord de plusieurs satellites, des stations dites « de localisation », de position inconnue a priori, et un centre de réception et de traitement des données recueillies par les récepteurs embarqués.

Principe de fonctionnement : Le récepteur embarqué effectue des mesures de décalage Doppler. Les données recueillies sont stockées dans la mémoire de l'instrument et retransmises vers le sol à chaque passage du satellite au-dessus d'une station de réception.

Après modélisation des forces agissant sur le satellite, le traitement des mesures effectuées sur le réseau permanent, appelé réseau d'orbitographie, permet une restitution précise de sa trajectoire. À partir de ces résultats et des mesures effectuées sur des balises de position inconnue, les coordonnées de ces balises peuvent être calculées. Deux des balises du réseau permanent, dites balises maîtresses, ont un rôle particulier : elles sont chargées d'assurer la

synchronisation du système avec le Temps Atomique International ainsi que la transmission vers les récepteurs embarqués de données nécessaires au bon fonctionnement du système.

### **2.3.8 V.L.B.I.**

La V.L.B.I. (Very Long Baseline Interferometry) est l'interférométrie à très longue base. Elle est fondée sur la mesure de différence de temps de réception entre deux observatoires au sol munis d'antennes radioélectriques et des sources radioélectriques naturelles que sont les quasars. C'est une technique qui permet des résultats très précis.

## **2.4 Conclusion**

Nous avons fait « un bon bout de chemin » depuis l'époque où l'on mesurait la Terre en comparant les ombres. En fait, il existe différentes façons d'étudier la forme de la Terre et de mesurer ses dimensions. Chaque méthode vient compléter nos connaissances dans ce domaine et en facilite la compréhension.

### 3 Méthodes de recherche de failles

L'ensemble des stations géodésiques forme un réseau géodésique. Grâce au GPS, nous pouvons obtenir les positions des stations géodésiques très précisément. Nous devons aussi connaître le déplacement général à la surface de la Terre du réseau géodésique considéré pour calculer les déplacements relatifs à la zone géographique en cours d'étude. En connaissant les positions des stations à deux moments différents, nous en déduisons un mouvement sous la forme d'un vecteur de déplacement. Chaque vecteur de déplacement est noté  $\vec{d}$  et se décompose en deux vitesses  $\vec{u}$  et  $\vec{v}$  mesurées (station géodésique) ou calculées (nœud de la grille) selon les axes cartésiens X et Y correspondant respectivement aux sens Ouest-Est et Sud-Nord.

#### 3.1 Méthode 1: Recherche de failles sur bloc rigide

Un bloc rigide est une zone géographique qui ne subit que de très faibles déformations internes. Ces faibles déformations sont généralement dues aux types de roches qui composent le sol. Les failles se trouvent alors aux frontières de ces blocs, là où les frictions des blocs s'effectuent.

##### 3.1.1 Identification des blocs

Pour trouver les différents blocs d'une zone géographique, il faut grouper les vecteurs de déplacement des stations géodésiques d'après leur direction et sens puis par leur amplitude. Les ensembles de vecteurs ainsi formés désignent les régions où les déplacements sont équivalents: ces régions sont les blocs rigides.

##### 3.1.2 Représentation graphique sur une carte

Les failles sont tout simplement tracées aux frontières des blocs. Ensuite, pour chaque bloc identifié, il faut calculer et dessiner un vecteur qui représentera leur déplacement général. Ce vecteur est une moyenne des vecteurs de déplacements des stations géodésiques contenues dans le bloc.

##### 3.1.3 Analyse de la carte

Sur la carte obtenue, les failles sont repérées aux frontières des blocs. Les vecteurs de déplacement sont comparés pour en déduire les déplacements relatifs entre blocs. Nous pouvons distinguer trois types simples de déplacements relatifs:

- vecteurs de même direction générale à peu près perpendiculaire à la frontière:
  - o sens convergent: écrasement, collision, subduction ;
  - o sens divergent: étirement ;
- vecteurs de même direction générale à peu près parallèle à la frontière:
  - o coulissement: décrochement.

### 3.2 Méthode 2: Recherche de failles sur bloc rigide ou élastique

La première méthode n'est pas fiable lorsque la zone géographique comporte un sol où les blocs subissent des déformations internes. Pour étudier ces blocs élastiques, il faudrait un réseau géodésique très dense mais ce n'est pas le cas. Il faut alors simuler cette densité par une grille où seront calculés en chaque nœud les déplacements des stations fictives en fonction des déplacements des stations réelles.

#### 3.2.1 Détermination de la grille

Les stations géodésiques sont réparties de manière hétérogène géographiquement. Afin de faciliter les calculs et avoir une meilleure vision du morphisme de la zone à étudier, il est préférable d'avoir une grille sur laquelle nous pouvons lire en chaque nœud un vecteur de déplacement.

La résolution doit être la plus élevée possible; Le facteur limitant est la densité du réseau géodésique. Il faut savoir que la distance entre deux stations géodésiques est rarement inférieure à 10 km.

#### 3.2.2 Interpolation des vecteurs de déplacement aux nœuds de la grille

Pour passer du réseau géodésique à la grille, c'est-à-dire des vecteurs de déplacement des stations géodésiques aux vecteurs de déplacement à chaque nœud de la grille, il faut procéder à une interpolation linéaire.

#### 3.2.3 Calcul des tenseurs de déformation pour chaque case de la grille

Au lieu de définir une grille d'interpolation et de calculer un tenseur par case de la grille, nous aurions pu trianguler le réseau géodésique et calculer un tenseur de déformation pour chaque triangle trouvé.

A partir des vecteurs de déplacement présents sur la grille, nous voulons trouver le tenseur de déformation de chaque case. Voici la méthode de calcul d'un tenseur de déformation d'une case. Pour l'expliquer, le schéma suivant sera considéré:

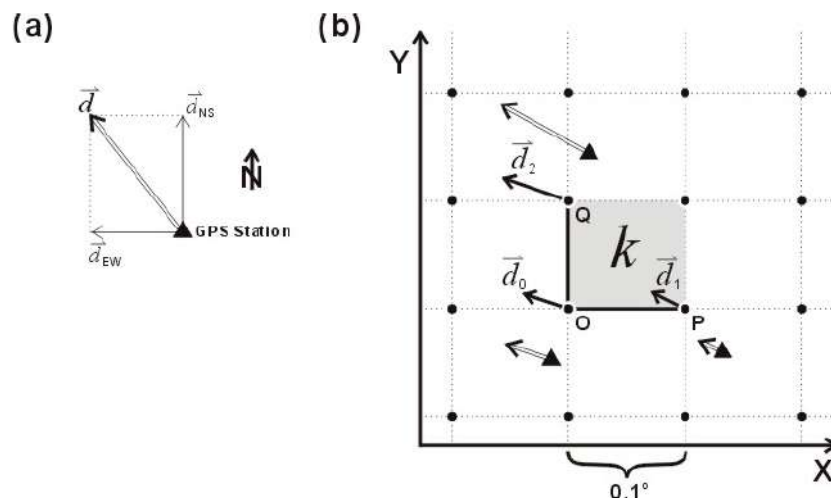


Figure 7 : Vecteurs de déplacement aux noeuds de la grille

Le tenseur de déformation  $\epsilon_k$  de la case K se dérive des vecteurs des nœuds P et Q par rapport à un vecteur de référence, celui du nœud O; Utiliser le vecteur du nœud au Sud-Ouest comme référence est une convention.

L'effort normal exercé sur le bloc se définit ainsi:

$$\begin{cases} \epsilon_{xx} = \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} = \frac{\vec{u}_1 - \vec{u}_0}{\Delta x} \\ \epsilon_{yy} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} = \frac{\vec{v}_2 - \vec{v}_0}{\Delta y} \end{cases}$$

Aussi, l'effort de cisaillement est:

$$\begin{cases} \epsilon_{xy} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\vec{u}_2 - \vec{u}_0}{\Delta y} + \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_0}{\Delta x} \right) \\ \epsilon_{yx} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_0}{\Delta x} + \frac{\vec{u}_2 - \vec{u}_0}{\Delta y} \right) \end{cases}$$

Le tenseur de déformation est constitué par les équations ci-dessus et est obtenu par la matrice suivante:

$$\epsilon_k = \begin{bmatrix} \frac{\partial \vec{u}}{\partial x} & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial x} + \frac{\partial \vec{u}}{\partial y} \right) & \frac{\partial \vec{v}}{\partial y} \end{bmatrix}$$

### 3.2.4 Calcul du raccourcissement et de l'allongement pour chaque case

Le raccourcissement et l'allongement correspondent à la déformation du bloc. Ils se calculent en résolvant l'équation suivante où I est la matrice identité,  $\lambda$  est une constante d'échelle et  $\epsilon_k$  le tenseur de déformation :

$$|\epsilon_k - \lambda \mathbf{I}| = 0$$



### 3.2.5 Représentation graphique sur une carte

A chaque nœud de la grille est associé un tenseur de déformation duquel on en déduit le taux de raccourcissement et le taux d'allongement. Ces deux taux sont représentés graphiquement par deux barres perpendiculaires indiquant l'orientation et l'amplitude du déplacement dans le plan horizontal.

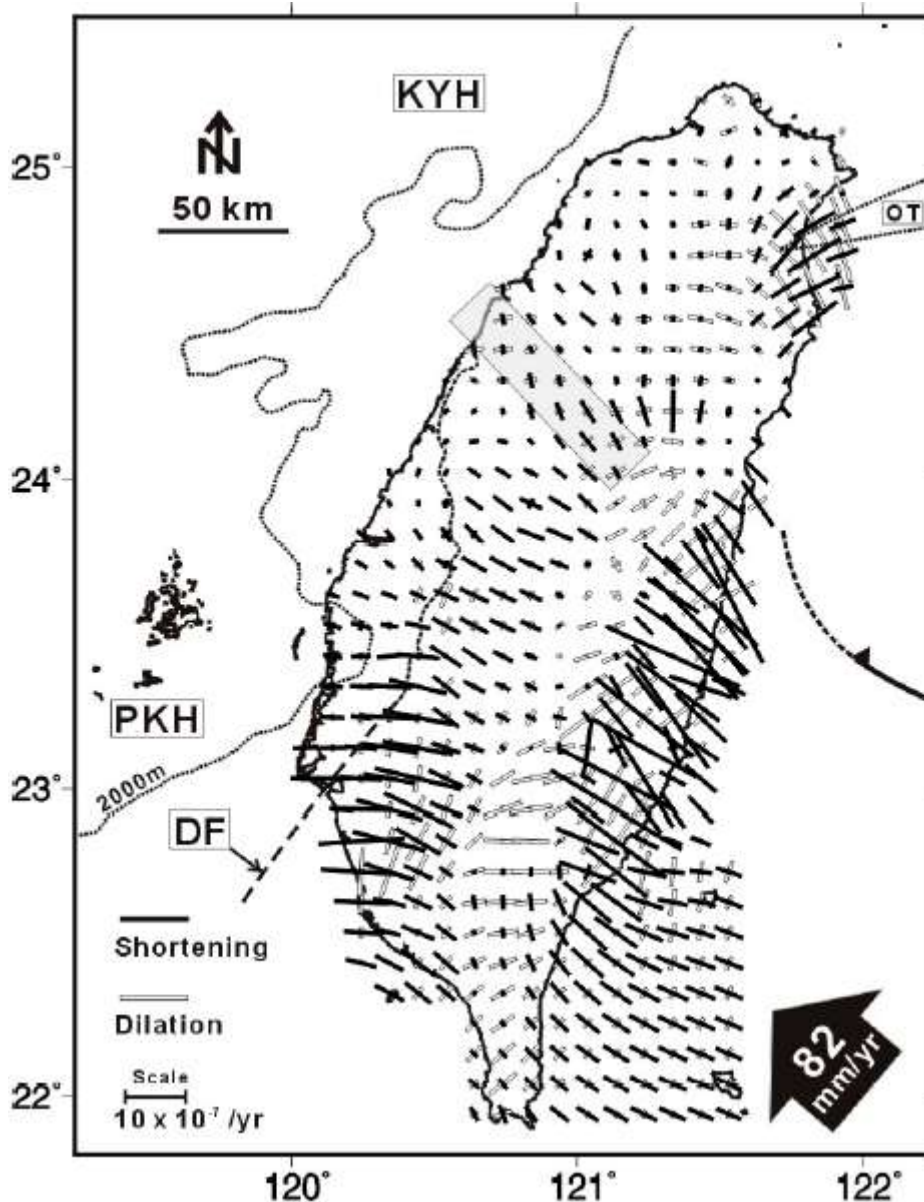


Figure 8: Représentation des taux de raccourcissement de d'allongement

### 3.2.6 Analyse de la carte

Pour trouver les positions des failles, il faut localiser les zones de déformations les plus importantes car c'est aux niveaux des failles que se trouvent les fronts de déformations. Ces fronts sont repérés grâce au taux élevé de raccourcissement ou d'allongement.

Nous pouvons aussi trouver le type de déplacement relatif qui s'exerce sur chaque front en observant l'orientation des deux barres (des deux taux) et l'amplitude de ces déplacements.

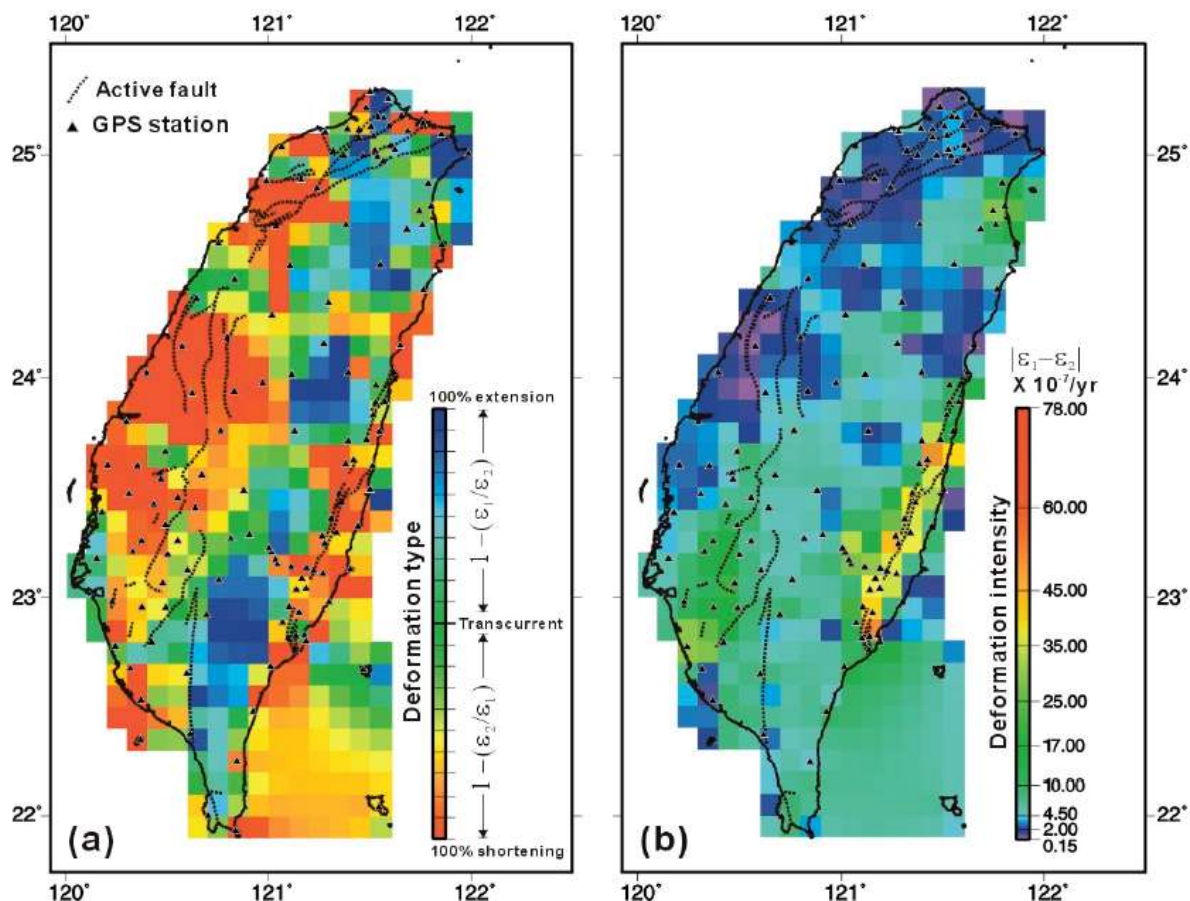


Figure 9 : Types et intensités des déformations

### 3.3 Validation des résultats

Une fois cette carte obtenue, ces données sont recoupées avec les sondages/carottages, les tremblements de terre/sismographe, mesure co-sismique... La validité de la position de la faille trouvée avec la seule analyse de la carte est alors vérifiée ou corrigée. Cette analyse fait appel aux techniques de la géologie et de la géophysique et sort donc du cadre de la présente étude.

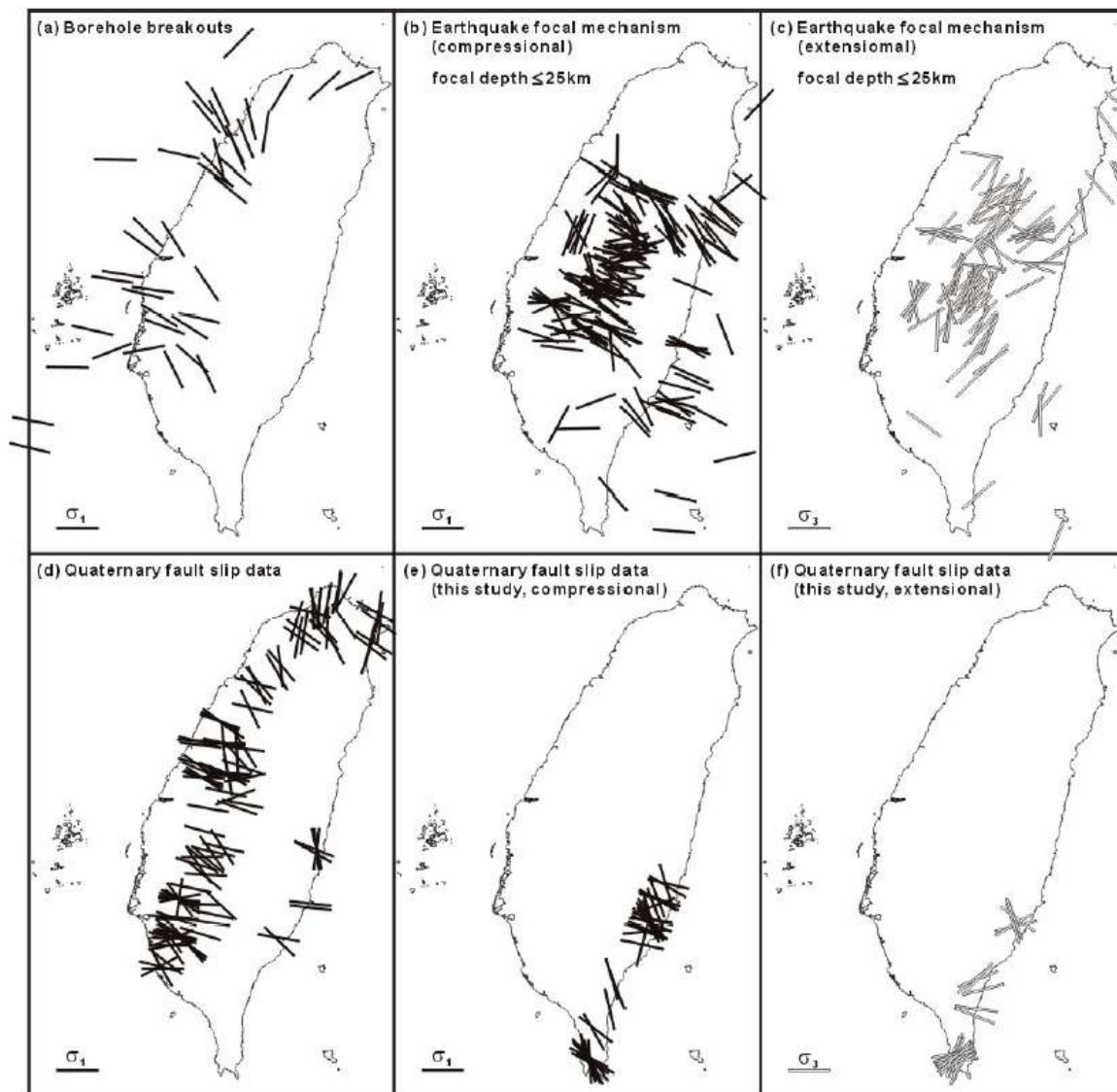


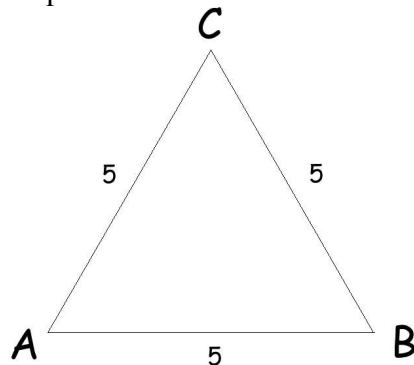
Figure 10 : Autres sources pour déterminer les positions des failles

## 4 Etude de cas

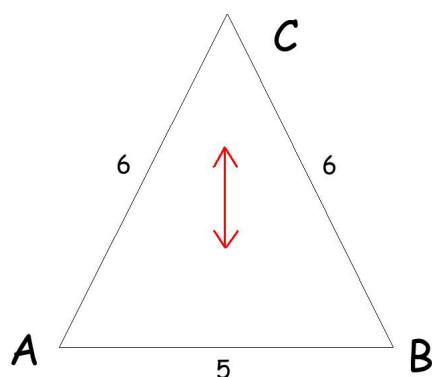
Dans cette partie, nous allons montrer par des exemples concrets comment trouver l'emplacement des failles.

### 4.1 Exemples sur un simple triangle isolé

Ici, il s'agit d'un simple triangle isocèle que nous allons déformer afin de bien voir les tenseurs de taux de déformations (ou plus communément appelés « tenseur de déformation »). Voici le triangle isocèle considéré pour la suite :



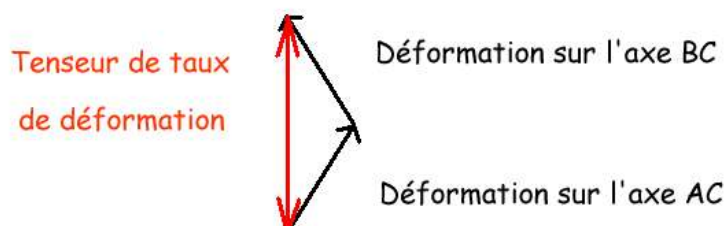
Dans un premier temps, nous allons faire un étirement de C « vers le haut » et obtenir donc la figure suivante :



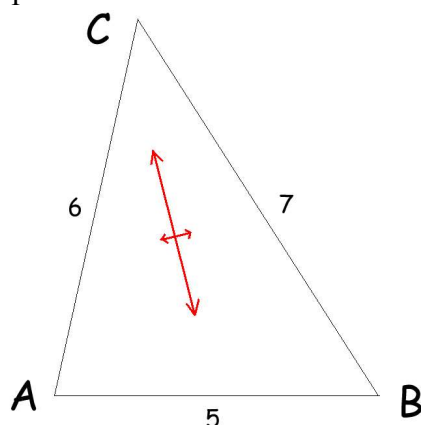
Le tenseur de taux de déformation apparaît bien entendu dans l'axe Nord-Sud (en rouge).

Il représente l'axe de la déformation par sa direction, et son amplitude par sa norme. Cette unique flèche symbolise la déformation maximale, mais nous verrons plus tard que dans la majorité des situations nous aurons deux flèches perpendiculaires, l'une représentant la déformation maximale, et l'autre la déformation minimale.

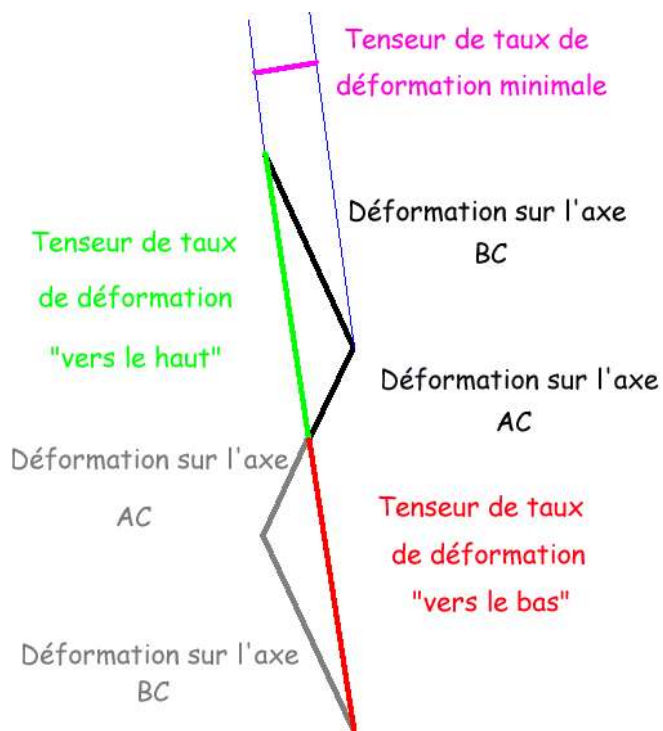
Pour le trouver il a suffi d'ajouter les 2 déformations sur les axes AC et BC, de la manière suivante :



Voici un deuxième exemple légèrement plus compliqué. Cette fois, la déformation ne va pas être dans l'axe de l'un des trois point.



On note tout de suite l'arrivée d'une déformation minimale qui n'apparaissait pas dans l'exemple précédent. Le calcul du tenseur de taux de déformation a donc été légèrement plus difficile cette fois.



Une première chose importante est que ce calcul de tenseur de taux de déformation montre que pour l'obtenir, la manière de procéder est de toujours engendrer un tenseur le plus grand possible.

Après avoir tracé le premier tracé noir, qui correspond à l'allongement +1 sur l'axe AC, on ne sait pas dans quel sens ajouter la déformation +2 sur l'axe BC.

Ici, elle a été ajoutée « vers le haut », car nous avons fait le choix de partir vers le haut lors de l'ajout de la déformation sur l'axe AC.

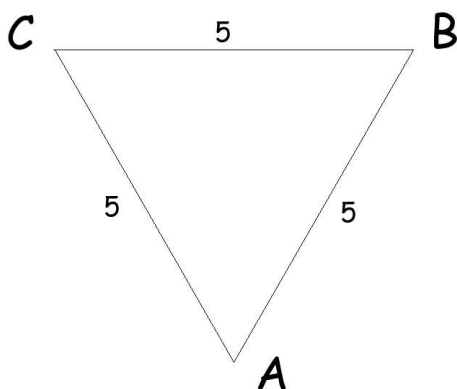
Le tracé en gris montre ce qui se serait passé si l'on avait ajouté la déformation sur l'axe AC « vers le bas ».

Bien entendu, les 2 tenseurs obtenus (en rouge et vert) sont égaux !

La deuxième chose intéressante ici est le calcul de la déformation minimale (en violet).

Il suffit en fait de trouver l'écart (la perpendiculaire) maximal avec la déformation maximale.

Ce troisième et dernier exemple montre que la **seule** chose qui importe est la déformation du triangle et non son mouvement (rotation ou déplacement).

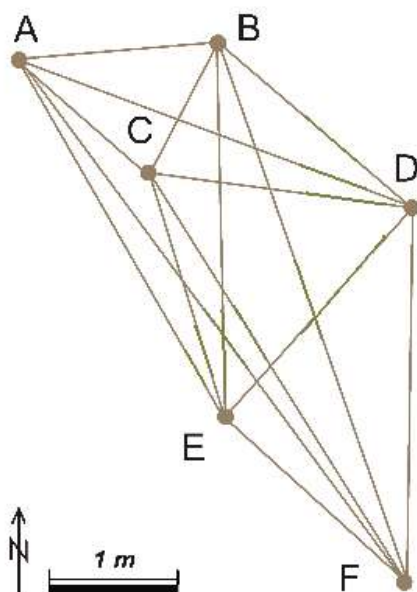


Ici, le tenseur de déformation est nul! En effet, dans les exemples précédents, on voit bien que pour calculer le tenseur, on regarde l'allongement (+1 +2 ...) et **uniquement** l'allongement.

## 4.2 Exemple du Canal Chinyuan Radier

Cet exemple, fournit par notre responsable Jacques ANGELIER, est déjà beaucoup plus complet. En effet, il va nous permettre de voir l'application des tenseurs afin de permettre le positionnement d'une faille!

Voici le document en question avec les données nécessaires indiquant l'évolution des écarts de distance au fil du temps.



<i>Segment</i>	<i>Azimut approx.</i>	<i>L (cm) 5-2-96</i>	<i>L (cm) 27-2-97</i>	<i>L (cm) 11-11-97</i>
AB	090	159.8	159.85	<i>non mesuré</i>
AD	109	325.2	324.35	<i>non mesuré</i>
AF	141	511.1	510.2	<i>non mesuré</i>
AE	140	340.8	339.8	<i>non mesuré</i>
AC	133	145.15	145.15	<i>non mesuré</i>
CB	028	109.5	109.3	109.4
CD	096	198.05	197.55	197.0
CF	145	369.55	367.75	366.95
CE	148	199.6	198.5	197.85
BE	169	272.1	271.0	270.5
ED	033	181.7	181.7	181.65
BF	157	428.3	427.05	426.5
BD	127	183.35	182.25	181.8
DF	174	284.8	284.8	284.85
EF	138	170.5	170.4	170.45

<i>Segment</i>	<i>Azimut approx.</i>	$\Delta L$ (cm) 5/2/96 au 27/2/97	$\Delta L$ (cm) 27/2/97 au 11/11/97	$\Delta L$ (cm) 5/21/96 au 11/11/97
AB	090	+0.05	<i>non mesuré</i>	<i>non mesuré</i>
AD	109	-0.85	<i>non mesuré</i>	<i>non mesuré</i>
AF	141	-0.9	<i>non mesuré</i>	<i>non mesuré</i>
AE	140	-1.0	<i>non mesuré</i>	<i>non mesuré</i>
AC	133	0.0	<i>non mesuré</i>	<i>non mesuré</i>
CB	028	-0.2	+0.1	-0.1
CD	096	-0.5	-0.55	-1.05
CF	145	-1.8	-0.8	-2.6
CE	148	-1.1	-0.65	-1.75
BE	169	-1.0	-0.5	-1.5
ED	033	0.0	-0.05	-0.05
BF	157	-1.25	-0.55	-1.8
BD	127	-1.1	-0.45	-1.55
DF	174	0.0	0.05	0.05
EF	138	-0.1	+0.05	-0.05



Cette fois les variations de longueur seront presque négligeables par rapport aux longueurs. Ainsi, les proportions des tenseurs seront différentes.

Pour les longueurs, nous prendrons 1 centimètre = 1 mètre.

En ce qui concerne les tenseurs, nous prendrons 1 centimètre = 1 centimètre.

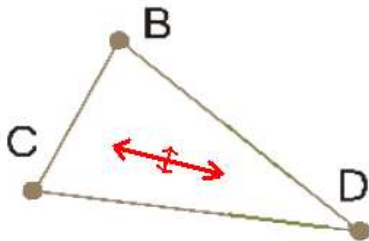
Autre point important, comme nous n'avons aucune donnée de la station A le 11/11/97, nous ne considérerons que le premier écart de longueur (écarts entre les dates 5/2/96 et 27/2/97 donc).

Nous allons ici prendre 3 triangles comme exemples qui seront : ABC, CDE, et BCD.

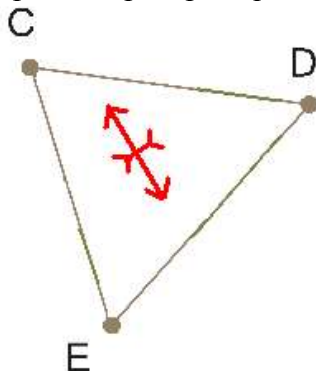
- ABC. Il y a en réalité une très légère déformation minimale dû au très léger allongement sur l'axe AB, mais celle-ci ne se voit pas étant trop légère par rapport à l'échelle que nous avons choisie.



- BCD. La seule chose à noter ici est que le signe des variations de longueur n'importe pas! Comme nous l'avons dit auparavant, le principe est de toujours chercher à maximiser le tenseur que l'on obtiendra.



- CDE. Tout d'abord, la représentation du tenseur minimal est différente mais n'a de différent que le visuel et représente ainsi la même chose. Cette représentation est simplement plus pratique sur de petites distances.



On notera également qu'il n'y a que deux vecteurs qui sont sommés pour obtenir le tenseur maximal. A l'instar du premier triangle (ABC), c'est la déformation sur l'axe DE qui est nulle.

Nous n'allons pas détaillé plus de triangles, mais les calculs une fois terminés donnent le résultat suivant :

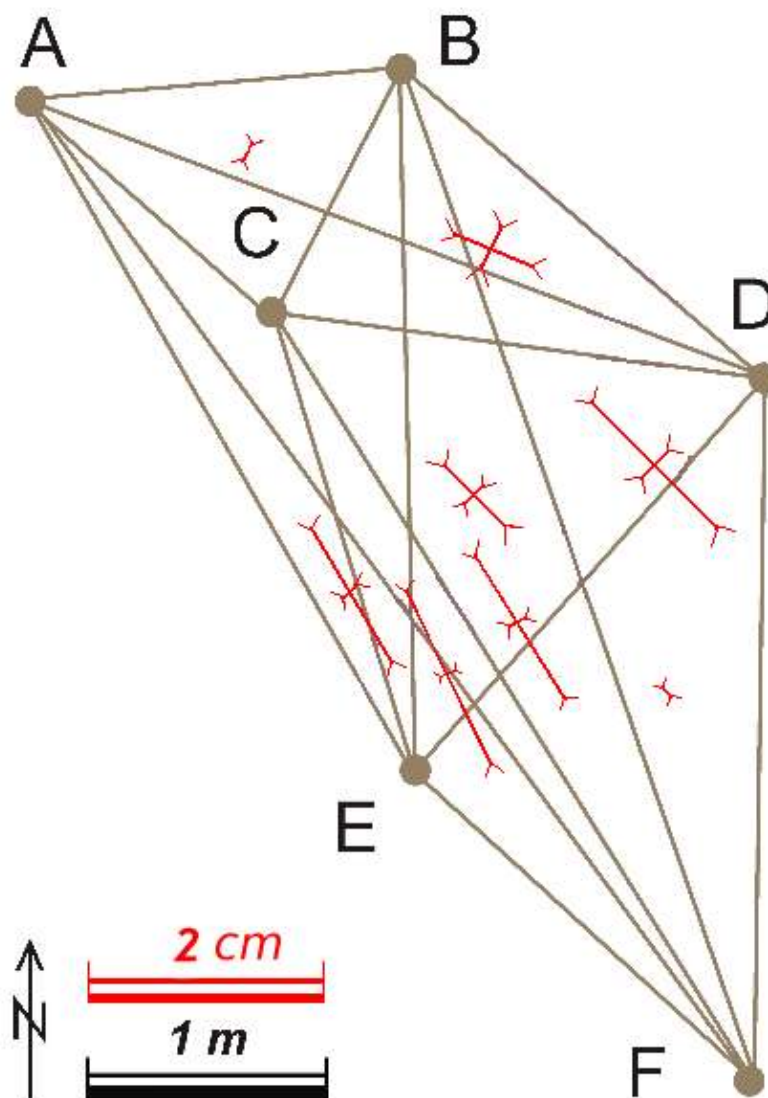


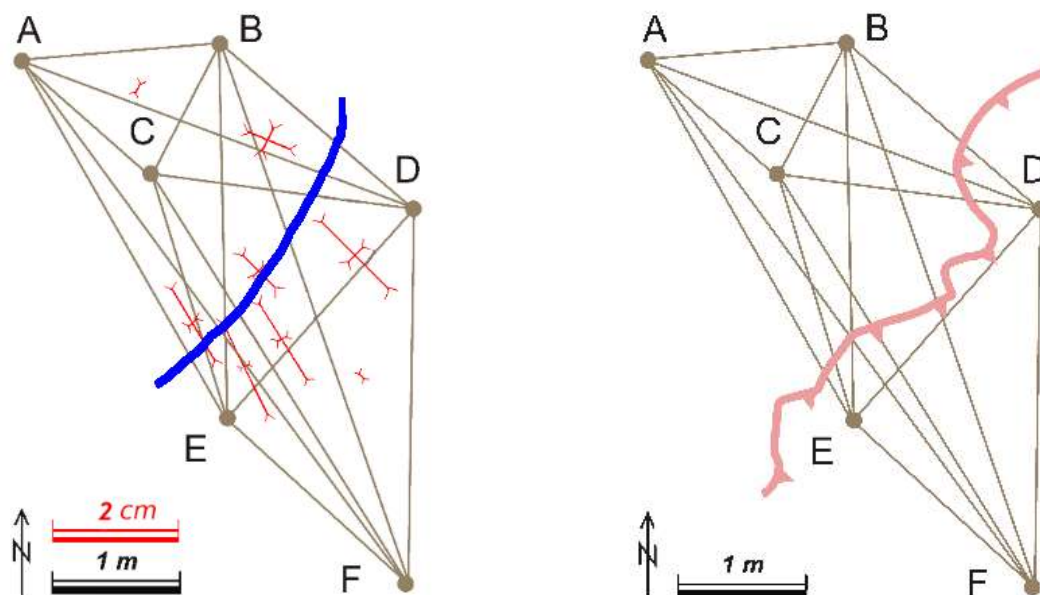
Figure 11 : Représentation des taux de déformation

Nous n'avons pas représenté l'intégralité des tenseurs sinon le résultat devient brouillon.

A première vue, on remarque que les tenseurs dans les triangles ABC et DEF sont beaucoup moins importants que les autres. On en conclut facilement que la faille ne doit pas passer par ces triangles.

Tous les autres triangles ont des taux de déformation plus élevés. La faille se trouve alors quelque part dans ces triangles. Aussi, la direction de ces tenseurs nous indique la direction de la faille. En effet, les tenseurs nous montrent le sens dans lequel l'amplitude est maximale, et à la perpendiculaire de ces tenseurs se trouvent donc logiquement la direction de la faille.

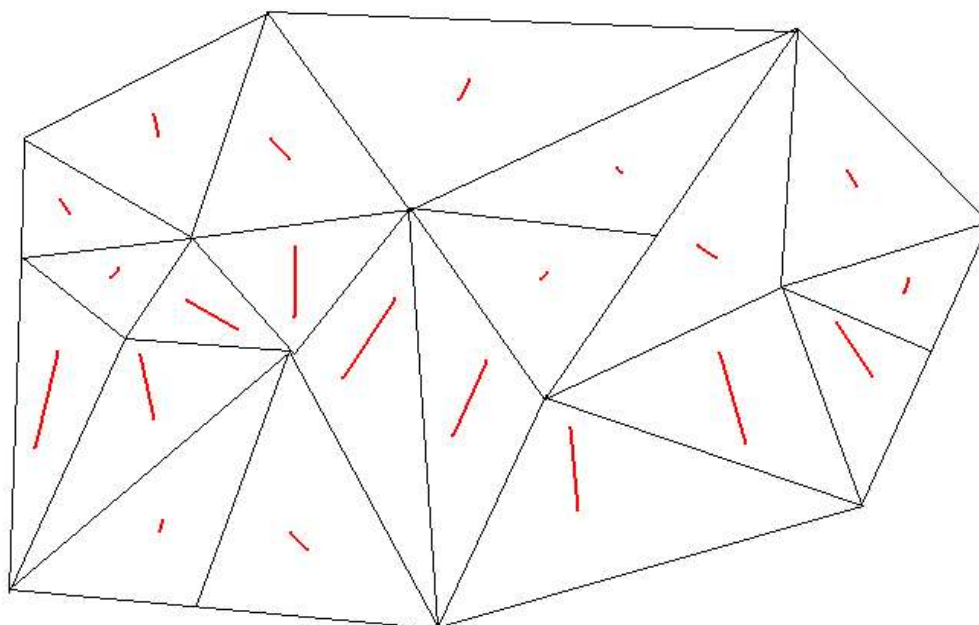
Cependant, le faible nombre de stations dans cet exemple ne permet pas de déterminer avec précision l'emplacement de la faille.



On ne peut pas déterminer avec plus de précision la faille en bleu sur l'image de gauche. La faille réelle se trouve à droite, en rose. On remarque que la forme globale y est.

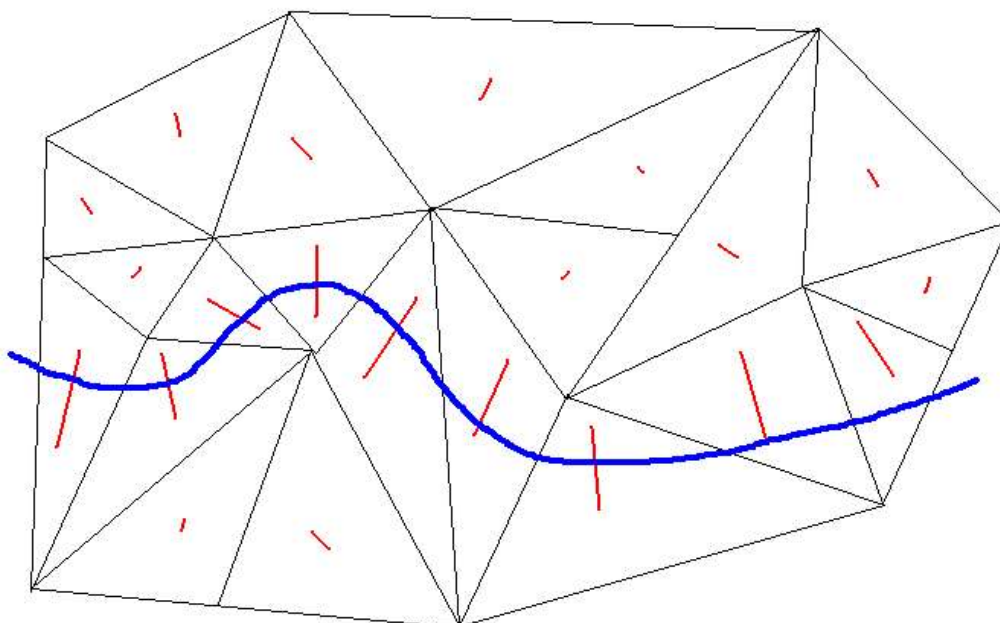
### 4.3 Autre exemple

Ce troisième exemple est totalement créé par nous-même. Il montre ce qu'il faudrait faire pour obtenir un positionnement bien plus optimal de la faille. La technique est de mettre un nombre beaucoup plus importants de stations près de la faille. Voici ce que l'on pourrait obtenir :



Nous n'avons représenté ici que les taux de déformation maximaux pour que plus de clarté.

Ici, le nombre de station étant beaucoup plus concentré aux abords de la faille nous pouvons aisément repérer l'emplacement de la faille avec précision :



Si l'on veut obtenir quelque chose d'encore plus précis, il faut positionner de nouvelles stations aux abords de la faille !

#### 4.4 Faille en Islande

Ce quatrième et dernier exemple montre que les relevés des stations peuvent nous apprendre beaucoup plus que le simple emplacement de la faille.

Voici donc de quoi il s'agit :

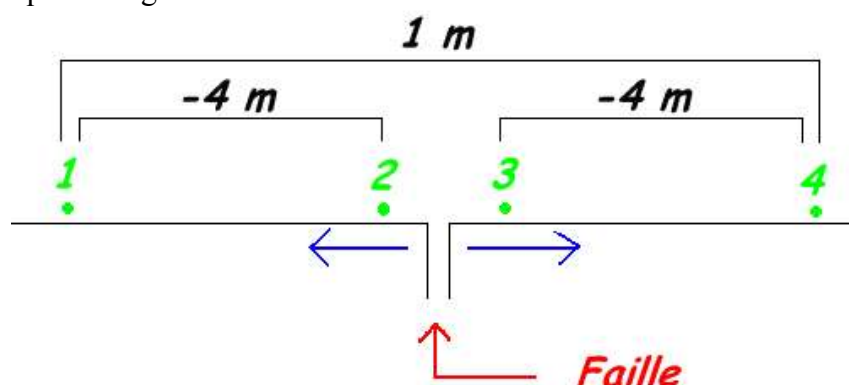


Figure 12 : Schéma de la dilatation des roches au niveau d'une faille

Ici, on constate que l'écart entre les stations 1 et 4 confirme bien le mouvement de la faille avec une augmentation de l'écart entre ces 2 stations. Cependant, l'écart entre les stations 1 – 2 et 3 – 4 diminue ! Les chercheurs ont été très étonnés de ce phénomène. Ce fait surprenant est dû à l'élasticité de la roche. En effet, tel un élastique, la roche se tendait au fil du temps à cause des courants magmatiques. Mais entre les deux prises de mesures qui ont permis l'élaboration de l'image ci-dessus, la roche céda comme un élastique qui casse. Entre les stations 1-2 et 3-4, la roche s'est alors comprimée. On en déduit facilement de ces données que l'écartement de la faille a été de 9 mètres entre les stations 2 et 3.

## 5 Courte Analyse d'un Système Informatisé

La charge de travail de ce projet dépassait largement celle accordée pour un Travail d'Etude. C'est pourquoi seule une ébauche d'analyse d'un système informatisé à été envisagée. La conception et l'implémentation aurait demandée au moins un mois supplémentaire. La méthode utilisée pour concevoir ce système est la seconde méthode : recherche de failles sur bloc rigide ou élastique.

### 5.1 Données d'entrée du système informatisé

L'utilisateur doit fournir les données suivantes au système:

- Une carte/image de la zone géographique à étudier (par défaut, une carte du monde intégrée au programme ou ne figure que les frontières terres / mers et entre pays).
- Soit un point de référence et l'échelle de la carte. La vue de la carte sera centrée sur le point de référence.
- Soit deux points de références correspondant aux coins Nord-Est et Sud-Ouest de la carte. La vue de la carte sera alors la zone comprise entre ces deux points.
- Le déplacement global sur la Terre de la zone géographique étudiée.
- Les positions des stations qui constituent le réseau géodésique couvrant la zone à étudier.

Ces données peuvent être importées dans le programme grâce à un fichier comme ci-dessous:

```
Zone étudiée: Taiwan
Image de la carte: "taiwan-1995.jpg"
Position de la carte:
    Coin Nord-Est=24.2°N-120.70°E
    Coin Sud-Ouest=10.9°N-92.5°E
Date d'analyse: 1995
//Commentaire: [NomSation,Longitude, Latitude]
[Sation 1,10N,20E] [] [] [] [] []...
[] [] [] [] []...
...
Date d'analyse: 2000
//Commentaire: [NomSation,ΔPositionHorizontal, ΔPositionVertical]
[Sation 1,+7,-2]...
...
```

Une fois le fichier traité, il apparaît dans la fenêtre principale l'image de la carte de la région étudiée avec une flèche valuée représentant le déplacement global sur la Terre de la zone géographique étudiée, l'échelle de la carte, les coordonnées d'un point de référence de la carte et la direction du nord.

### 5.2 Choix de l'échelle de temps

Avant de commencer la phase de calcul, il faut spécifier l'échelle de temps. Nous pourrions proposer à l'utilisateur une liste des dates d'analyse parmi lesquelles il devrait en choisir deux. Pour aller encore plus loin, on pourrait calculer les positions des stations géodésiques aux dates fournies par l'utilisateur; Par exemple, si nous avons les données des

années 1995, 2000 et 2003 et que l'utilisateur veuille appliquer le calcul entre 1998 et 2002, il faudra interpoler toutes les positions des stations à ces deux dates.

L'utilisateur voit maintenant sur sa carte les différentes stations géodésiques avec leur vecteur de déplacement.

### **5.3 Elaboration de la grille**

Cette étape est automatiquement exécutée après avoir choisi l'échelle de temps. L'utilisateur n'intervient donc pas ici.

La résolution de la grille est dépendante de la distance minimale entre deux stations du réseau géodésique. Il faut donc un algorithme qui retourne les deux stations qui sont les plus proches entre elles afin de trouver la distance verticale et horizontale qui les séparent ; Ces deux distances correspondent à la résolution verticale et horizontale de la grille. Pour travailler avec une grille carrée, il suffit de prendre la valeur minimale de ces deux distances.

Ensuite sont calculés tous les vecteurs de déplacement à chaque nœud; Ils ne sont pas affichés sur la carte pour plus de clarté.

### **5.4 Calcul des tenseurs de déformation de chaque nœud**

L'utilisateur doit signifier qu'il désire lancer le calcul des tenseurs de déformation en cliquant sur un bouton. Cette action ajoutera à la carte les tenseurs pour que l'utilisateur puisse commencer sa recherche de failles.

### **5.5 Calcul du raccourcissement et de l'allongement pour chaque tenseur**

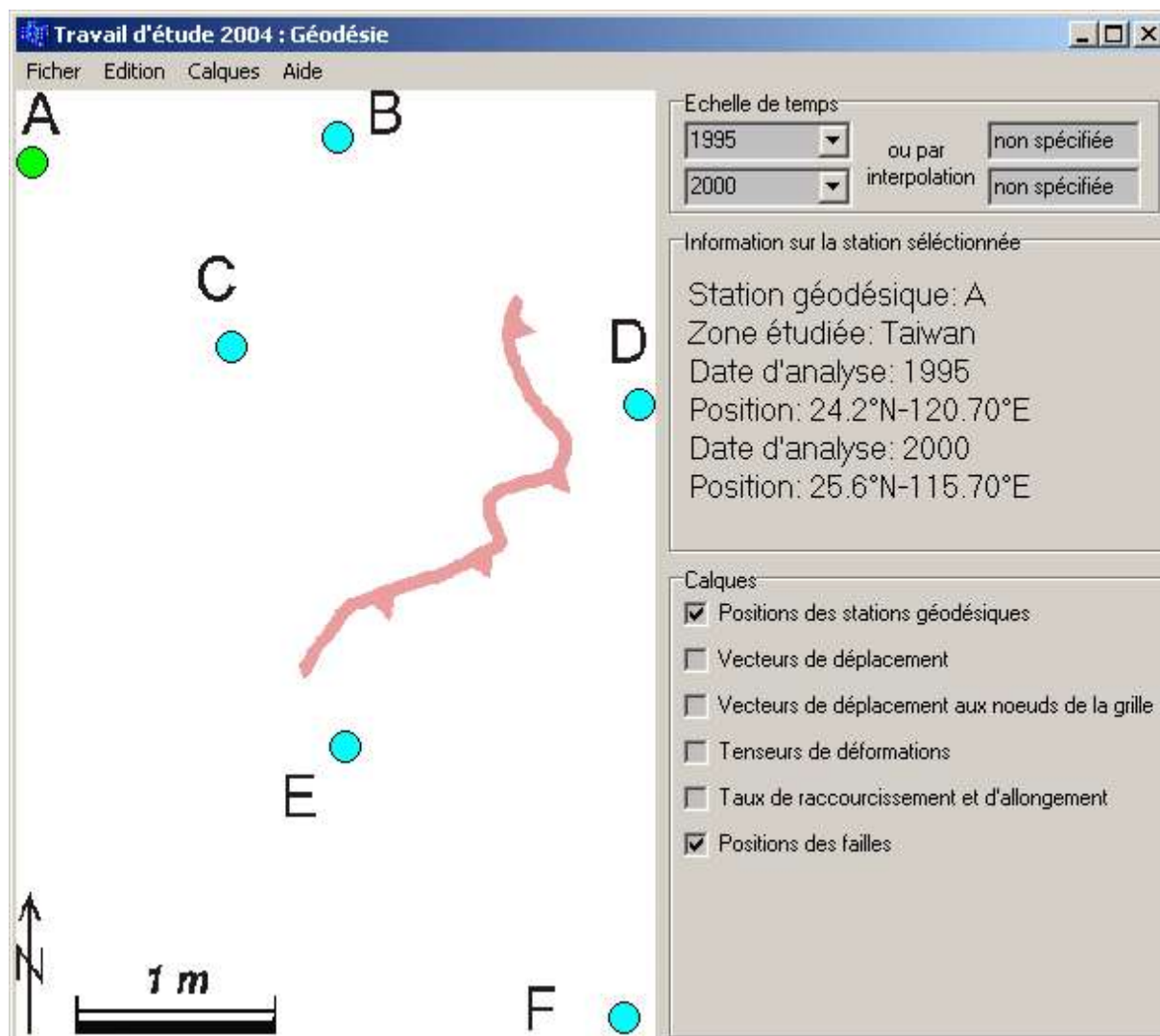
Comme pour le calcul des tenseurs de déformation, l'utilisateur doit signifier qu'il désire lancer le calcul des taux de raccourcissement et d'allongement en cliquant sur un bouton. Cette action effacera de la carte les tenseurs de déformation et affichera à la place les taux pour que l'utilisateur finisse sa recherche de failles.

### **5.6 Affichage graphique du résultat**

L'affichage graphique du résultat peut être implémenter avec une gestion de calques où le calque d'arrière plan serait la carte de la région étudiée avec une flèche valuée représentant le déplacement global sur la Terre de la zone géographique étudiée, l'échelle de la carte, les coordonnées d'un point de référence de la carte et la direction du nord. Ensuite, l'utilisateur pourrait sélectionner des calques supplémentaires à sa guise:

- Les positions des stations géodésiques;
- Leurs vecteurs de déplacement;
- Les vecteurs de déplacement aux nœuds de la grille;
- Les tenseurs de déformations;
- Les taux de raccourcissement et d'allongement;
- Les positions des failles.

Pour rendre encore plus convivial l'interface graphique, nous pourrions proposer à l'utilisateur, sous forme d'une liste de case à cocher, les calques qu'il souhaite afficher. Le programme effectuerait tous les calculs nécessaires pour parvenir à dessiner les calques sélectionnés.



## 5.7 Exportation des résultats

Pour sortir les résultats du programme, l'utilisateur pourrait enregistrer les cartes obtenues dans différents formats d'images mais aussi sauvegarder les données calculées dans un fichier texte au format A.S.C.I.I. comme ci-dessous:

```
Zone étudiée: Taiwan
Périodes d'analyse: 1995-2000
Position de la grille: 24.2°N-120.70°E
Espacement horizontal de la grille: 12 Km
Espacement vertical de la grille: 12 Km
Dimension de la grille: 50x100
//Commentaire: [Raccourcissement,Allongement,Azimut]
[10,20,310°]...
...
```

## **5.8 Interprétation par réseau neuronal**

L'interprétation peut être déléguée à un second programme qui prendrait en entrée le fichier exporté par le programme principal. Ce second programme retournerait au programme principal le résultat sous forme d'une liste de coordonnées qui correspondrait à la faille.

Un réseau neuronal est une fonction qui associe une donnée d'entrée à une donnée de sortie pendant la phase d'apprentissage et qui a la capacité de fournir un résultat à une nouvelle donnée d'entrée jamais encore calculée. La fiabilité du résultat ainsi obtenu est fonction des caractéristiques du réseau neuronal utilisé (taille, forme, changement dynamique de taille et de forme) mais aussi de la qualité et du nombre d'exemples appris par ce réseau.

Ainsi, pour résoudre le problème de la localisation d'une faille, nous pouvons fournir au réseau en entrée les taux de raccourcissement et d'allongement, leur orientation et leurs coordonnées. En sortie, le réseau nous calculerait la position de la faille en nous retournant les coordonnées des taux où semble se situer la faille. De plus, la phase d'apprentissage s'effectuerait grâce aux nombreux exemples dont la position des failles est connue.



## **6 Conclusion**

Ce projet fut extrêmement instructif tant par les techniques et technologies employées en géodésie que par les comportements du sol de notre Terre. Hélas, le court temps alloué dans le cadre des Travaux d'Etude ne nous a pas permis de terminer l'analyse, la conception et l'implémentation de ce projet. Nous aurions vraiment appréciés pouvoir approfondir la partie interprétation par réseau neuronal, autre sujet intéressant que nous avons proposé en second choix.

Malgré les progrès considérables de cette science réalisé durant ce dernier siècle, surtout dans le développement des informations satellitaires, il n'est toujours pas possible de prédire quand se produira un tremblement de terre. Mais le pourrons nous un jour ?

## Bibliographie

<http://ganymede.ipgp.jussieu.fr/frog/geodesie.htm>

Bureau français de coordination des utilisateurs de GOCE

[http://www.sciences-en-ligne.com/momo/chronomath/anx1/geodesie\\_trg.html](http://www.sciences-en-ligne.com/momo/chronomath/anx1/geodesie_trg.html)

Auteur : Serge MEHL

<http://www.ign.fr/>

Institut Géographique National

<http://www.obs-azur.fr/>

Observatoire de la Côte d'Azur.

Rapport fait par Chung-Pai Chang, Tsui-Yu Chang, Jacques Angelier, Honn Kao, Jian-Cheng Lee, Shui-Beih Yu : *Strain and stress field in Taiwan oblique convergent system : constraints from GPS observations ans tectonic data.*