



**HAL**  
open science

# Étude comparative des précisions d'approximation de l'ITRF et application à la redéfinition des systèmes géodésiques utilisés au sein du groupe Total

Simon Olivé

► **To cite this version:**

Simon Olivé. Étude comparative des précisions d'approximation de l'ITRF et application à la redéfinition des systèmes géodésiques utilisés au sein du groupe Total. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2013. dumas-00941961

**HAL Id: dumas-00941961**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00941961>**

Submitted on 4 Feb 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS**  
**ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MÉMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**  
**le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

**Spécialité : Géomètre et Topographe**

**par**

**Simon OLIVÉ**

---

Étude comparative des précisions d'approximation de l'ITRF et application à  
la redéfinition des systèmes géodésiques utilisés au sein du groupe Total

**Soutenu le 13 Septembre 2013**

---

**JURY**

**PRÉSIDENT : M. Laurent POLIDORI**

**MEMBRES : M. Frédéric AUGER**  
**M. Laurent MOREL**

## Remerciements

La rédaction des remerciements est toujours un exercice difficile et ce pour deux raisons : tout d'abord, elle signifie la fin d'une expérience et le commencement d'une nouvelle. Ensuite, en dépit de ne vouloir oublier personne, il manque toujours des noms à la liste des contributeurs. Je tiens d'ores et déjà à m'excuser auprès de ceux-là en leur témoignant ma reconnaissance pour leur contribution quelle qu'elle fût.

Parmi les personnes que je tiens à remercier en priorité, je citerai Frédéric AUGER en souhaitant à chaque stagiaire de rencontrer un maître de stage aussi accessible et disponible qu'il l'a été pour moi. Viennent ensuite Émilie BLANCART dont la compétence et la douceur rendent l'ambiance de ce bureau professionnelle et conviviale – et David SIMON qui incarne selon moi la rigueur et le souci du travail bien fait. Ces trois personnes ont largement contribué à mon travail et j'espère avoir été à la hauteur de leurs attentes.

Je remercie également les autres membres du service topographique de TOTAL qui, bien qu'à distance, m'ont apporté leur aide et leurs conseils.

Merci enfin à l'ensemble du corps enseignant de l'ESGT qui nous a amenés avec méthode et beaucoup de patience, je l'avoue, sur la rampe de lancement de notre avenir professionnel.

Je tiens à exprimer toute ma gratitude à tous ceux qui ont fait pour moi de ces 6 mois en entreprise, non seulement une expérience riche d'enseignement en termes de connaissance mais aussi riche en rencontres, partage et échange.

# Table des matières

<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>2</b>
<b>INTRODUCTION</b>	<b>5</b>
<b>I. RAPPELS SUR LES SYSTEMES DE REFERENCE</b>	<b>7</b>
A. LES PRINCIPAUX SYSTEMES DE REFERENCE	7
B. REALISATION DE SYSTEMES DE REFERENCE PAR TECHNIQUES SPATIALES	8
1. <i>Les principaux types de mesure mis en œuvre :</i>	8
2. <i>Les méthodes de réalisation et les éléments de définition d'un système de référence :</i>	8
<b>II. L'INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE SYSTEM (ITRS) ET SA REALISATION, L'ITRF</b>	<b>10</b>
A. LES PRINCIPALES APPLICATIONS DE L'ITRS	10
B. SES CARACTERISTIQUES	10
1. <i>Les éléments de définition de l'ITRS</i>	10
2. <i>Modèle d'équation de l'ITRF</i>	11
3. <i>Problèmes rencontrés dans le calcul de l'ITRF</i>	12
4. <i>L'Histoire de l'ITRF</i>	14
<b>III. LES METHODES DE MESURES GNSS UTILISEES DANS LE DOMAINE OFF-SHORE</b>	<b>16</b>
A. LES TECHNIQUES USUELLES	16
1. <i>Le positionnement statique</i>	16
2. <i>Le positionnement dynamique</i>	16
B. LES FOURNISSEURS DE SYSTEMES D'AUGMENTATION GLOBAUX PAR SATELLITE (SBAS)	19
1. <i>Les solutions proposées par les fournisseurs</i>	19
2. <i>Comparaison des solutions</i>	22
<b>IV. LES BESOINS DE L'EXPLORATION ET DE LA PRODUCTION PETROLIERE EN TERME DE POSITIONNEMENT</b>	<b>25</b>
A. L'ACQUISITION SISMIQUE	25
B. LE FORAGE	26
C. L'ACTIVITE DE PROJET/CONSTRUCTION	27
<b>V. ANALYSE D'UN CAS CONCRET : LE MYANMAR</b>	<b>28</b>
A. ANALYSE DE LA GEODESIE	28
1. <i>Définition de la géodésie locale</i>	28
2. <i>Détermination des paramètres de transformation entre systèmes local et global</i>	29
B. ANALYSE DE LA GEOPHYSIQUE	30
1. <i>Contexte Géodynamique</i>	30
2. <i>Impact des événements tectoniques récents</i>	31
C. ANALYSE DU CONTEXTE D'EXPLOITATION	31
D. TRAITEMENT D'UN CAS PRATIQUE	32
E. CONCLUSIONS RELATIVES A L'ACTIVITE DE TEPM AU MYANMAR	33
<b>VI. ADAPTATION AU CAS GENERAL</b>	<b>35</b>
A. L'APPROCHE GEODESIQUE	35
1. <i>Cas des pays possédant un réseau permanent de station</i>	35
2. <i>Cas des pays possédant une géodésie rattachée à l'ITRF</i>	36
3. <i>Cas où la géodésie utilisée n'est pas rattachée à l'ITRF</i>	36
B. L'APPROCHE GEOPHYSIQUE ET GEOLOGIQUE	37
1. <i>Les zones considérées comme stables d'un point de vue tectonique</i>	38
2. <i>Les formations instables d'un point de vue tectonique</i>	39

C.	LES BESOINS EN FONCTION DES ACTIVITES	39
1.	<i>L'offshore non conventionnel : positionnement des installations</i>	39
2.	<i>Les programmes de construction off-shore</i>	40
3.	<i>La sismique 4D</i>	40
<b>VII.</b>	<b>PROPOSITION D'AMELIORATION ET APPORT POTENTIELS</b>	<b>41</b>
A.	EVOLUTIONS POTENTIELLES DE LA FICHE GEODESIQUE	41
1.	<i>Epoque et ITRF associés à une géodésie locale basée sur un système global</i>	41
2.	<i>Epoque et ITRF associés à une transformation</i>	42
3.	<i>Autres remarques</i>	45
B.	CHOIX DES VITESSES APPLICABLES	45
1.	<i>Les données insérées</i>	46
2.	<i>Perspectives d'amélioration</i>	47
C.	CALCULS DE TRANSFORMATIONS	48
1.	<i>Les grandes étapes du développement de la macro initiale</i>	48
2.	<i>Difficultés dans la rédaction de l'application générale</i>	50
3.	<i>Autres macros réalisées</i>	50
	<b>CONCLUSION</b>	<b>52</b>
	<b>ANNEXE 1 : LES EVOLUTIONS DANS LA DEFINITION DE L'ITRF</b>	<b>54</b>
	<b>ANNEXE 2 : PARAMETRES DE TRANSFORMATION ENTRE L'ITRF2008 ET LES REALISATIONS PRECEDENTES</b>	<b>56</b>
	<b>ANNEXE 3 : EXEMPLES DE FICHES GEODESIQUES UTILISEES AU SEIN DE TOTAL</b>	<b>57</b>
	<b>ANNEXE 4 : MANUEL D'UTILISATION DE LA MACRO GENERALE</b>	<b>59</b>
	<b>ANNEXE 5 : BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>74</b>

## Introduction

Le contexte géopolitique et économique mondial fait des énergies hydrocarbonées un enjeu majeur des 30 prochaines années. La demande croissante des puissances grandissantes d'Asie conjointement aux besoins en énergies fossiles des pays « du Nord » font du gaz et du pétrole des ressources primordiales dans la balance énergétique globale. Objets de convoitise et moyens de pression, les gisements d'hydrocarbures focalisent l'attention des politiques et des acteurs économiques et catalysent les connaissances et les recherches en matière d'exploration et de production. Les avancées technologiques réalisées au cours des dernières décennies ont rendu possible la découverte et la mise en production de ressources inespérées – champs en off-shore profond (plus de 1500 mètres de fond), huiles de roches mères et réservoirs d'huiles extra-lourdes par exemple – repoussant l'hypothèse d'un éventuel « Pick-Oil » annoncé par certains scientifiques à l'horizon 2020 .

D'un point de vue historique, la Compagnie Française des Pétroles, devenue Total CFP en 1985 avant d'être rebaptisée Total en 1991, fut fondée en 1924 sous l'impulsion de Raymond Poincaré et la direction d'Ernest Mercier. Les fusions successives avec PetroFina et Elf Aquitaine en 1999 ont hissé cette multinationale parmi les 6 « Super majeurs » de l'industrie pétrolière aux côtés notamment d'Exxon mobil, Shell et BP.

L'organigramme du groupe, avec à sa tête depuis 2010 Christophe de Margerie, est divisé entre les activités amont (exploration et production) et aval (raffinage, trading, marketing, etc.) ainsi que les divisions régionales en charge des opérations des filiales locales (Moyen-Orient, Asie, etc.). Le groupe Total, première capitalisation boursière du Cac 40, exerce ses activités d'exploration et de production dans plus de 130 pays à travers le monde ; face à une demande grandissante en dépit de ressources s'amenuisant, les réservoirs sous-marins constituent près de 60% de la production en pétrole et en gaz du Groupe.

Le département EXPLO/TE/MTG/TTP<sup>1</sup>, au sein duquel je réalise mon stage, est en charge de la supervision de l'ensemble des activités de positionnement pour la partie amont. Dans cette optique, des géodésies locales ont été définies par le passé afin d'harmoniser les systèmes de coordonnées sur une même zone, d'y faciliter l'intervention des différentes entreprises et la « communication » entre ces dernières. Toutefois, ces datum datent parfois de plusieurs décennies et ne répondent plus toujours à la précision rendue possible par les avancées technologiques et techniques réalisées depuis 20 ans en matière de modélisation de la Terre et de mesure de coordonnées (avènement du GNSS par exemple et développement de nouvelles méthodes de mesure).

Total se retrouve aujourd'hui confronté à un véritable dilemme concernant la définition de ses systèmes de coordonnées : ce qui était acceptable il y a quelques années en matière de précision ne l'est plus de nos jours avec la réalisation de systèmes globaux plus précis, homogènes et d'une cohérence interne élevée servant de base à la définition de nombreux référentiels géodésiques nationaux. Les écarts entre les mesures réalisées à l'instant T et les informations extraites de données acquises il y a plusieurs années peuvent se révéler importants et engendrer des confusions préjudiciables.

---

<sup>1</sup> Exploration/Techniques d'Exploration/Mesures et Traitements Géophysiques/Topographie Télédétection et méthodes Potentielles

Si le géo-référencement sur terre ne présente plus de grandes difficultés compte tenu de la capacité et de la facilité à mettre en place des réseaux géodésiques, le positionnement précis en mer s'avère beaucoup plus complexe et nécessite pour le moment de recourir aux services de fournisseurs d'augmentation de données GNSS (*Fugro, C and C technology, Veripos*) permettant de réaliser des mesures GPS différentielles (DGPS) ou du Positionnement Point Précis (PPP) en temps réel avec une précision décimétrique.

Le sujet de ce Travail de Fin d'Etudes, intitulé « *Etude comparative des précisions d'approximation de l'ITRF et application à la redéfinition des systèmes géodésiques utilisés au sein du groupe Total* », réside en l'analyse de différents exemples de géodésies posant problèmes et en la recherche de l'origine de ces derniers afin de proposer des améliorations au niveau des Spécifications Générales de Total et des fiches de géodésie éditées pour chaque zone d'intérêt.

Nous étudierons pour cela la genèse du système de référence international (ITRS) et notamment ses différentes réalisations (ITRF) avant de nous intéresser aux techniques de mesure de positions utilisées dans le domaine offshore (méthodes, caractéristiques, précisions, systèmes de coordonnées attachés à ces mesures). Un paragraphe sera ensuite dédié aux spécifications du cahier des charges de Total relatives au géo-référencement après quoi nous porterons notre attention sur des cas concrets qui permettront une mise en exergue du problème. En guise de conclusion, nous proposerons des pistes d'amélioration concernant l'attitude à adopter face à ce type de problème, la définition des géodésies ainsi que la rédaction du cahier des charges et des fiches géodésiques.

Dans le cadre des études de cas, l'un des axes de réflexion sera consacré au contexte géophysique de la région concernée puisque la tectonique des plaques constitue l'une des sources majeures de déformation des réseaux géodésiques.

# I. Rappels sur les systèmes de référence

Ce chapitre a pour but de définir un cadre d'étude pour le lecteur tout en rappelant les principales notions relatives aux systèmes de référence. Cette partie constitue une synthèse nécessaire à la compréhension du développement du sujet à proprement parler. Tout système de coordonnées nécessite la définition d'une origine, d'une orientation de ses axes ainsi que d'une échelle.

## A. Les principaux systèmes de référence

Les besoins de référencement dans l'espace s'appliquant à une multitude d'éléments et de domaines d'études, il fut nécessaire de définir plusieurs systèmes de référence tout en conservant la capacité de passer de l'un à l'autre sans grandes difficultés. De cette manière, un point de l'espace peut être exprimé dans différents repères.

### *Barycentric Celestial Reference System (BCRS)*

- Réservé à l'étude du système solaire
- Origine : barycentre du système solaire
- Axes : ceux de l'Inertiel Celestial Reference System (système quasi-inertiel privilégié) : plan principal proche de l'équateur moyen à J 2000.0 ; origine des longitudes proche de l'équinoxe dynamique à J 2000.0
- Echelle de temps : Temps-Coordonnée Barycentrique (TCB)



### *Geocentric Celestial Reference System (GCRS)*

- Etude de la Terre
- Origine : centre des masses de la Terre
- Axes : dans la même direction que ceux du *BCRS* (pas de rotation différentielle par rapport à ceux du *BCRS*)
- Référentiel utilisé pour la définition de l'équation du mouvement d'un satellite artificiel en rotation autour de la Terre

↓ Rotation spatiale

### *Geocentric Terrestrial Reference System (GTRS)*

- Système d'espace/temps géocentrique en co-rotation avec la Terre
- Origine : centre des masses de la Terre
- Rotation de la Terre définie par des paramètres d'orientation de la Terre (Earth Orientation Parameters EOPs) donnés dans des tables se référant à un GTRS spécifique (ex. : l'ITRS)

## B. Réalisation de systèmes de référence par techniques spatiales

Historiquement, les premiers réseaux géodésiques ont été réalisés par des méthodes terrestres basées sur l'observation d'angles et de distances sur des objets terrestres aussi bien que célestes. Les développements technologiques en matière de satellite et de télécommunication ont peu à peu permis de réaliser des mesures depuis l'espace tout en assurant un suivi depuis le sol. Ils ont ainsi fortement contribué à l'amélioration de la qualité des systèmes de référence.

### 1. Les principaux types de mesure mis en œuvre :

Quatre techniques principales sont utilisées dans la réalisation de tels systèmes.

- La « Very Long Baseline Interferometry » (VLBI – interférométrie à très longue base en français) correspond à l'analyse du retard de réception par deux radiotélescopes (éloignés de plusieurs milliers de kilomètres) du front d'onde émis par une radiosource (ou quasar) de direction connue.

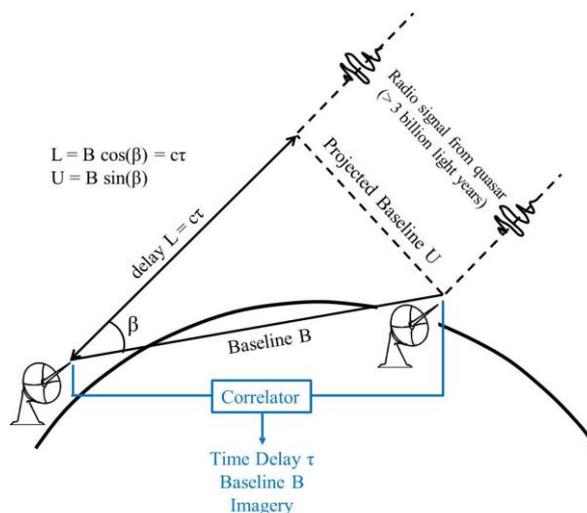


Figure 1 : VLBI principe ([http:// www.cpi.com/projects/vlbi.html](http://www.cpi.com/projects/vlbi.html))

- Le « Satellite Laser Ranging » (SLR) qui est une mesure laser de distance entre un émetteur et un coin-cube placé sur un satellite.
- Le « Lunar Satellite Ranging » (LLR) correspond au même principe de mesure que le SLR à la différence près que les réflecteurs sont positionnés à la surface de la Lune.
- Les observations GNSS basées sur des mesures de pseudo-distances et de déphasages sur des constellations données (GPS est la constellation américaine, GLONASS est son homologue russe en attendant notamment les satellites de l'Union européenne (Galileo)).
- Le système de « Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégré par Satellite » (DORIS) qui est un système de mesure de l'effet Doppler entre une balise émettrice au sol et un récepteur embarqué sur un satellite. Avant que le GPS ne soit déclaré pleinement opérationnel en 1994, le système Transit – basé sur le même phénomène physique que Doris – était également utilisé.

### 2. Les méthodes de réalisation et les éléments de définition d'un système de référence :

Un système de référence peut être calculé soit sur la base de mesures acquises au moyen d'une seule méthode comme c'est le cas de la réalisation de l'International GNSS Service (IGS08 à l'heure

actuelle) qui ne repose que sur des données GNSS soit par le biais d' une combinaison des solutions des techniques énumérées ci-dessus ; l' « International Terrestrial Reference Frame » (ITRF2008) en est le meilleur exemple d'application. On notera que l'ITRF est une réalisation physique de l' « International Terrestrial Reference System » (ITRS) défini par des concepts théoriques, sans réalité physique et par conséquent inaccessible à l'utilisateur.

La définition d'un tel réseau nécessite la détermination de 7 paramètres relatifs à l'origine, l'échelle et l'orientation, respectivement : 3 translations, 1 facteur d'échelle et 3 rotations. De plus, afin d'assurer la stabilité du repère dans le temps, il est également nécessaire de calculer les dérivées temporelles de ces 7 paramètres de transformation. Ainsi, le modèle d'équation de base se résume à un système à 14 inconnues.

## II. L'International Terrestrial Reference System (ITRS) et sa réalisation, l'ITRF

### A. Les principales applications de l'ITRS

Ce système de référence, par l'intermédiaire de ses réalisations successives depuis 1988, constitue le référentiel d'étude et de mesure des différents phénomènes terrestres et atmosphériques adopté par la communauté scientifique internationale et développé par et pour elle. Quelques-unes de ces applications scientifiques majeures sont la sismologie, la volcanologie, la géophysique et la météorologie. Au-delà de cette finalité académique, la consistance accrue des dernières réalisations de l'ITRS en ont fait un cadre de premier ordre pour la mise en place de réseaux géodésiques à des échelles régionales (comme l'ETRF2000<sup>2</sup>) ou locales (RGF93<sup>3</sup>) qui constituent une densification du canevas global.

Ces éléments font de l'ITRF un cadre de référencement idéal pour les différents acteurs de l'industrie pétrolière, grands consommateurs des produits de l'IGS (orbites précises, etc.) fournis dans des repères, si ce n'est l'ITRF, du moins homogènes à ce dernier. Par ailleurs, comme nous aurons l'occasion de le voir plus en détail, les réseaux de stations des fournisseurs d'augmentation de données GNSS sont rattachés aux ITRF2008 ou ITRF2005.

### B. Ses Caractéristiques

#### 1. Les éléments de définition de l'ITRS

Ces paramètres sont définis de manière conventionnelle par l'International Earth Rotation Service et sont répertoriés dans les notes techniques de l'IERS qui regroupent l'ensemble des conventions utilisées dans l'étude de la Terre. L'ITRS présente les paramètres suivants :

- Son origine correspond au centre des masses de la Terre.
- Son orientation est définie de manière conventionnelle par celle du Bureau International de l'Heure (BIH) à J 1984.0.
- Son évolution temporelle est guidée par la condition de Tisserand qui réside en l'annulation du moment cinétique relatif de la croûte. L'équation décrivant la condition de non-rotation du réseau au niveau de la croûte terrestre définie dans un système de Tisserand minimisant l'énergie cinétique est la suivante [Boucher, 1989] :

$$h = \int_C X \times V dm = 0 \quad (1)$$

Où  $h$  est le moment angulaire,  $X$  le vecteur position,  $dm$  la masse élémentaire et  $V$  sa vitesse. En faisant l'hypothèse d'une plaque rigide, la forme discrétisée et simplifiée de l'équation ci-dessus s'exprime [Solomon and Sleep, 1974] :

$$h = \sum_{p \in P} Qp \times \omega p = 0 \quad (2)$$

---

<sup>2</sup> European Terrestrial Reference Frame : réalisation de l'European Terrestrial Reference System (ETRS89 coïncide avec l'ITRS à l'époque 1989.0) basée sur une densification de l'ITRF à l'échelle européenne

<sup>3</sup> Réseau Géodésique Français 1993 : système de référence français basé sur une densification des points de l'ETRF

Où  $Q_p$  est le tenseur inertiel de la plaque  $p$  et  $\omega p$  son moment angulaire. Ces équations reflètent la contribution au sein d'un repère, des déplacements de tous les points de la Terre exprimée dans ce repère, au moment cinétique total.

- L'unité de distance est le mètre (Système International SI); le temps de référence est le Temps-Coordonnée Géocentrique (TCG) compatible avec le Temps Terrestre (TT) dont l'unité de base est la seconde (SI).
- Bien que cela ait été cité à plusieurs reprises, rappelons que la réalisation physique de l'ITRS est l'« International Terrestrial Reference Frame » (ITRF).

## 2. Modèle d'équation de l'ITRF

Depuis l'ITRF2005, les arguments d'entrée du système d'équation sont des séries temporelles de position des stations (dont le pas d'échantillonnage est fonction de chaque technique) ainsi que des paramètres journaliers d'orientation de la Terre. Nous reviendrons plus tard sur les principales évolutions liées au calcul des différents ITRF mais nous pouvons déjà décrire le modèle général de combinaison des solutions employé à l'heure actuelle [Altamimi & al, 2007]:

$$\begin{cases} X_s^i = X_c^i + (t_s^i - t_0) \dot{X}_c^i + T_k + D_k X_c^i + R_k X_c^i + (t_s^i - t_k) [\dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i] \\ \dot{X}_s^i = \dot{X}_c^i + \dot{T}_k + \dot{D}_k X_c^i + \dot{R}_k X_c^i \end{cases} \quad (3)$$

Où  $X_s^i$  sont les positions X, Y, Z (les caractères surmontés d'un point étant les vitesses) de la solution,  $X_c^i$  correspondent aux positions et vitesses que l'on cherche à estimer dans le repère combiné « c » à une époque de référence  $t_0$ . De même,  $T_k$ ,  $D_k$  et  $R_k$  sont respectivement les paramètres de translation, de facteur d'échelle et de rotation à une époque k ainsi que leurs vitesses entre le repère combiné et le repère terrestre k de la solution. L'ajout des EOP's<sup>4</sup> dans le modèle de combinaison se traduit pour sa part par l'équation :

$$\begin{cases} x_s^p = x_c^p + R2_k \\ y_s^p = y_c^p + R1_k \\ UT_s = UT_c - \frac{1}{f} R3_k \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_s^p = \dot{x}_c^p + \dot{R}2_k \\ \dot{y}_s^p = \dot{y}_c^p + \dot{R}1_k \\ LOD_s = LOD_c + \frac{\Lambda_0}{f} \dot{R}3_k \end{cases} \quad (5)$$

Où  $x_s^p$ ,  $y_s^p$  sont les coordonnées du pôle,  $UT_s$  le temps universel et  $\dot{x}_s^p$ ,  $\dot{y}_s^p$  et  $LOD_s$  (Length of Day : durée du jour) leurs dérivées journalières,  $f$  le facteur de conversion entre temps universel et temps sidéral et  $\Lambda_0$  est homogène à une différence de temps ( $\Lambda_0=1$  sur une base quotidienne d'échantillonnage).

On notera que les EOP's sont rendus parfaitement consistants avec le repère combiné par l'intermédiaire des rotations  $R1$ ,  $R2$  et  $R3$  et de leurs dérivées. Enfin, par convention, les rotations sont définies positivement dans le sens horaire.

<sup>4</sup> Earth Orientation Parameters : paramètres d'orientation de la Terre

### 3. Problèmes rencontrés dans le calcul de l'ITRF

#### a) *Sensibilité des techniques spatiales*

Par définition, les différentes techniques spatiales ne sont pas toutes sensibles à tous les paramètres de définition de ce système géodésique. Ainsi, l'origine est en théorie accessible par les techniques dynamiques (GNSS, SLR) puisque les orbites des satellites de la Terre admettent pour foyer le centre des masses de cette dernière. De son côté, l'échelle est accessible par le biais des techniques satellites et VLBI mais elle est fonction d'un certain nombre de constantes ( $c$  la célérité de la lumière dans le vide,  $GM$  la constante gravitationnelle) ainsi que des modèles de correction relativiste adoptés. Enfin, l'orientation et son évolution temporelle, accessibles par aucune technique, sont définies conventionnellement par une condition de non-rotation globale par rapport aux mouvements horizontaux de la surface de la Terre (condition de Tisserand énoncée au-dessus) [Altamimi, Nov 2006].

#### b) *Conséquences sur la définition du système*

Le logiciel CATREF, utilisé par le LAREG (Laboratoire de Recherche en Géodésie de l'Institut national de l'information géographique et forestière), fait appel à un ajustement par moindres carrés pour réaliser la combinaison des repères terrestres individuels à l'origine de l'ITRF. L'insensibilité évoquée dans le paragraphe précédent des différentes techniques de mesures à certains paramètres se traduit lors de la formation du système d'équation par une matrice normale  $N (= A'PA$  où  $A$  est la matrice des observations et  $P$  la matrice de variance-covariance à priori) singulière (et donc non inversible) en raison d'un défaut de rang (certaines lignes ou colonnes de  $N$  ne sont pas linéairement indépendantes).

Afin de lever la singularité de cette matrice, il est donc nécessaire d'ajouter des contraintes externes c'est-à-dire des informations dans le système d'équation qui vont permettre sa résolution.

#### c) *Les contraintes externes*

Il existe 3 sortes de contraintes externes [Altamimi, Nov 2006], [Altamimi&Al., 2007], appliquées sur un sous-ensemble du réseau traité lors du calcul des solutions individuelles par les centres d'analyses :

- Les contraintes détachables sont les solutions pour lesquelles les positions des stations sont contraintes à des valeurs externes avec une incertitude de  $\sigma = 10^{-5}$  m et les vitesses à  $\sigma = 10^{-5}$  m/an.
- Les contraintes lâches qui sont des solutions pour lesquelles les incertitudes appliquées aux contraintes sont  $\sigma \geq 1$  m et  $\sigma = 10$  cm/an.
- Les contraintes minimales, privilégiées aujourd'hui, consistent en un ajout d'informations servant à définir le repère combiné ou estimé à partir d'un repère de référence externe constitué de vecteurs positions et vitesses. L'idée est de contraindre le repère combiné en minimisant ses paramètres de transformation avec le repère de référence.

Ce dernier type de contrainte est obtenu en choisissant une solution de référence de positions et de vitesses notée  $X_R$  liée à la solution combinée par la relation :

$$X_R - X_C = A\theta \quad (6)$$

Avec  $\theta$  le vecteur des paramètres de transformation et  $A$ , la matrice des dérivées partielles du modèle.

La solution du système de moindres carrés obtenu à partir de l'équation précédente est donnée par :

$$\theta = (A^T A)^{-1} A^T (X_R - X_C) \quad (7)$$

L'équation de contrainte minimale (8) est obtenue à partir de la précédente en faisant tendre  $\theta$  vers 0. De cette façon, la solution combinée est exprimée dans le même repère que la solution choisie comme référence.

$$0 = (A^T A)^{-1} A^T (X_R - X_C) \quad (8)$$

Cette équation (8) s'applique aux paramètres de transformation contrairement aux autres contraintes externes qui s'appliquent sur les vitesses ce qui permet de conserver « l'intégrité interne » de la solution combinée. Ajoutée à la matrice normale singulière, elle permet de combler la déficience de rang de cette dernière qui est alors inversible.

#### d) *Un autre type de contraintes : les contraintes internes*

Ces contraintes ont été introduites avec le début de l'utilisation des séries temporelles en tant que paramètres d'entrée du modèle de combinaison (depuis l'ITRF 2005). L'objectif est de conserver les caractéristiques physiques des paramètres observables par chaque technique (*ie.* origine et échelle pour les techniques satellites et échelle pour la technique VLBI) en évitant de les contraindre à un repère de référence externe.

Considérant le modèle fournit par l'équation (3) et en admettant une évolution linéaire dans le temps des positions et des paramètres de transformation, on a pour chacun des 7 paramètres  $P_k$  [Altamimi&Al. ,2007] :

$$P_k = P_k(t_0) + (t_k - t_0) * \dot{P}_k \quad (9)$$

Avec  $t_0$  l'époque de référence conventionnelle de la combinaison.

Si l'on considère désormais le fait que l'on calcule les paramètres de transformation entre chaque solution (journalière ou hebdomadaire)  $k$  et la solution combinée sur le long-terme, on peut appliquer les conditions (contraintes minimales) suivantes sur les paramètres de transformation :

$$\begin{cases} P_k(t_0) = 0 \\ \dot{P}_k = 0 \end{cases} \quad (10)$$

Les séries temporelles de chaque paramètre de transformation peuvent être modélisées par une régression linéaire dont la résolution par moindres carrés conduit à un système d'équation normal d'inconnues  $P_k(t_0)$  et  $\dot{P}_k$  :

$$\begin{pmatrix} K & \sum_{k \in K} (t_k - t_0) \\ \sum_{k \in K} (t_k - t_0) & \sum_{k \in K} (t_k - t_0)^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_k(t_0) \\ \dot{P}_k \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{k \in K} P_k \\ \sum_{k \in K} (t_k - t_0) P_k \end{pmatrix} \quad (11)$$

Les équations (10) et (11) se traduisent dans le système par les sommations nulles :

$$\begin{cases} \sum_{k \in K} P_k = 0 \\ \sum_{k \in K} \frac{P_k}{(t_k - t_0)} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

L'équation (9) comble la déficience de rang de la matrice normale initiale tout en définissant le repère de référence à l'époque  $t_0$  et son évolution dans le temps.

Finalement, ce type de contrainte équivaut à la définition d'un repère naturel de référence libre de toute contrainte externe (du moins pour les paramètres physiques que sont l'échelle et l'origine) tout en préservant les variations semaine après semaine des paramètres de transformation de la même façon que le font les contraintes externes.

Pour de plus amples informations concernant les contraintes minimales, le lecteur pourra se référer à [Sillard et Boucher, 2001 ; Altamimi & Al, 2002a] et à [Dermanis, 2000] pour ce qui est des contraintes internes.

#### 4. L'Histoire de l'ITRF

Le premier système géodésique de référence basé sur des mesures multi-techniques (VLBI, SLR/LLR, DORIS et TRANSIT) fut initié par le Bureau International de l'Heure (BIH). Les réalisations du « BIH Terrestrial System » (BTS) (ou système terrestre du BIH en français) s'échelonnèrent tous les ans du BTS84 au BTS 87.

##### a) Bases de définition de l'ITRS

L'« International Earth Rotation Service » (IERS) est l'organisme actuellement en charge de la définition, de la réalisation et de la diffusion de l'ITRS tel qu'il fut défini lors de la convention de Vienne de 1991 dans la résolution numéro 2 de l'IUGG (International Union of Geodesy and Geophysics) en définissant le système de référence terrestre conventionnel (CTRS) servant de base à l'ITRS. Les principales résolutions adoptées pour la définition du CTRS sont <sup>5</sup> :

- Le CTRS est un système quasi-cartésien défini par rotation spatiale à partir d'un système géocentrique en translation
- Le système géocentrique en translation est identique au Système de Référence Géocentrique (GRS) tel que défini par l'Union Astronomique Internationale (IAU)
- L'échelle de temps du CTRS comme celle du GRS est le Temps-Coordonnée Géocentrique (TCG)
- L'origine du système est le centre des masses de la Terre incluant les océans et l'atmosphère.
- Le système n'a pas de rotation globale vis-à-vis des déplacements horizontaux de la croûte terrestre

##### b) Grandes évolutions dans la méthode de calcul

Depuis le premier ITRF (l'ITRF88), pas moins de 12 réalisations se sont succédé. Celui actuellement en service est l'ITRF2008 mais une nouvelle version devrait voir le jour courant 2013. Le lecteur pourra se reporter à l'Annexe 1 afin d'obtenir plus d'informations quant à la définition de chaque ITRF.

Toutefois, nous pourrions noter que le premier champ de vitesse des stations fut obtenu lors de la combinaison de l'ITRF91. L'ITRF94 fut le premier à recevoir dans le modèle de combinaison les matrices complètes de variances-covariances des solutions individuelles tout comme la solution combinée fut la première à faire apparaître explicitement les vitesses des stations obtenues par ajustement. Par la suite, l'ITRF2000 vit son échelle de temps être définie de façon compatible avec le Temps Terrestre afin de satisfaire les centres d'analyse tandis que les ITRF précédents étaient homogènes au Temps-Coordonnée Géocentrique (TCG) conformément aux recommandations de l'IUGG de 1991. L'ITRF 2005 restera pour sa part comme le premier à résulter d'une combinaison de séries temporelles de position et de paramètres d'orientation de la terre. Depuis lors, un repère séculaire est

---

<sup>5</sup> Informations issues du site de l'ITRF : « [http://itrf.ensg.ign.fr/itrs\\_itrf.php](http://itrf.ensg.ign.fr/itrs_itrf.php) »

calculé pour chaque méthode avant d'être combiné à ceux obtenus par les autres techniques afin de déterminer la solution finale. On notera que des contraintes minimales et internes sont ajoutées au cours des différents processus de calcul afin de définir le repère de référence. L'ITRF final est ensuite calculé à partir d'un sous-réseau de stations stables, bien définies et bien réparties à la surface du globe. Par ailleurs, la combinaison des stations est rendue possible par les rattachements des sites co-localisés qui sont des zones où plusieurs techniques de mesure cohabitent.

### c) *Perspectives d'améliorations*

A l'heure actuelle, la cohérence interne de l'ITRF pâtit d'une répartition inégale des stations entre les pays développés et les pays dits sous-développés susceptible d'engendrer un effet de réseau [Collilieux, 2008]. Par ailleurs, la faible précision du rattachement des sites co-localisés voire son inexistence à certains endroits mène à un manque de rigidité dans la combinaison des techniques. Enfin, le traitement des séries temporelles ne sera optimal que lorsque toutes les stations auront, pour chaque technique, des durées d'observation suffisamment longues dans le temps et régulières.

Toutefois, l'ITRF 2008 présente une cohérence interne et une précision jamais atteinte auparavant puisque plus de 900 stations présentent une erreur sphérique de moins de 1,5 millimètre en position et 500 ont une erreur sphérique sur la vitesse inférieure au mm/an [Altamimi, Collilieux et Métivier, 2011]. Ces résultats, bien qu'apparaissant généralement un peu optimistes [Williams et al. 2004] suffisent amplement aux besoins du milieu pétrolier sur lequel nous nous focaliserons dans la suite de notre étude.

### III. Les méthodes de mesures GNSS utilisées dans le domaine off-shore

Il convient de distinguer différentes techniques de mesure GNSS menées dans le cadre des activités d'exploration et de production pétrolière. En l'absence d'installations existantes à proximité de la zone concernée, seules les techniques via l'intermédiaire de fournisseurs de services d'augmentation de données GNSS (mesures DGNSS en temps-réel) sont envisageables à l'heure où ce document est rédigé. Lorsque des infrastructures sont déjà en place sur site, l'acquisition de données peut également se faire au moyen de méthodes traditionnelles telles que le GNSS dynamique ou statique. Un autre procédé d'observation devrait être disponible sous peu à une échelle globale : le Precise Point Positioning (Positionnement Point Précis ou PPP) en accès « libre ». Nous reviendrons rapidement dans ce chapitre sur les principes généraux des méthodes traditionnelles avant de présenter plus en détail les mesures temps réel par augmentation de données GNSS et les entreprises proposant ces services.

#### A. Les techniques usuelles

##### 1. Le positionnement statique

Ces méthodes sont utilisées à des fins de mise en place de réseaux géodésiques comme par exemple la mesure de lignes de base entre des points caractéristiques de structures off-shore ou la détermination de géodésies locales et de paramètres de transformation avec les systèmes géodésiques globaux. Le principe réside en des observations de phases et de pseudo-distances simultanément en plusieurs points. On distingue le statique rapide, le statique et le statique ultra-précis (ou géodésique). Le tableau suivant dresse un récapitulatif des différentes stratégies d'observations (informations extraites de *Duquenne, Botton & autres, 2005* et du cours de géodésie de *Laurent Morel* de deuxième année de l'ESGT (2012)):

	Statique rapide	Statique « moyen »	Statique
Longueur des lignes de base	0-30km	30 à 100 km	>100 km
Type de récepteurs	Bi -fréquence	Bi-fréquence	Bi-fréquence
Temps d'observation	15 min + 1 min/ km +1 min par 100 de dénivelée	15 min + 2 min/ km +1 min par 100 de dénivelée	Plusieurs heures ou observations continues
Logiciel	Commercial	Commercial	Scientifique
Ambiguïté	Résolues	Résolues	Résolues (si possible : pas toujours évident lors de rattachements au réseau ITRF)
Orbites	Radiodiffusées	Radiodiffusées	Orbites IGS précises

Tableau 1: stratégies d'observation en mode statique pour une précision centimétrique

On notera que des antennes choke-ring sont utilisées afin de limiter l'impact des multi-trajets fréquents lors de mesures aux alentours de structures métalliques telles que les plateformes pétrolières.

##### 2. Le positionnement dynamique

Parmi les différentes techniques entrant dans la catégorie de cette classe de positionnement, les principales méthodes utilisées au sein de Total sont le cinématique temps réel (RTK), le positionnement différentiel par augmentation de données GNSS (DGNSS) et le Positionnement Point Précis (Precise

Point Positioning) basé lui aussi sur des services d'augmentation de données GNSS. Le premier principe d'observation, compte-tenu de la limite de son champ d'action en termes de précision (2 à 5 cm pour 15km) est principalement utilisé lors de mesures dans les environs de plateformes déjà en place et dont un point est connu en coordonnées. Les autres procédés nécessitent la souscription de services auprès de fournisseurs de solutions d'augmentation de données GNSS comme nous le verrons par la suite. On notera la difficulté de réaliser un classement précis entre les différentes méthodes compte tenu du manque de clarté de la part des fournisseurs de service et des auteurs d'ouvrage spécialisés. Nous considérerons par la suite les méthodes telles que définies dans les 3 paragraphes suivant.

#### a) *Le RTK*

Il s'agit de mesures de pseudo-distances de code C/A et de phases sur L1 et L2 permettant d'obtenir le vecteur entre un récepteur stationné sur un point connu et un mobile. La base envoie ses corrections chaque seconde ainsi que ses coordonnées en direction de la seconde antenne. On parle de GPS différentiel temps réel centimétrique. La transmission des informations entre base et mobile peut se faire par onde radio, GSM ou wifi. L'acquisition de données nécessite la résolution des ambiguïtés entières pour chaque satellite visible ou entrant en visibilité. Des informations complémentaires concernant le RTK tout comme les mesures GNSS de façon générale pourront être trouvées sur le très bon site de l'ESA (European Space Agency) [http://www.navipedia.net/index.php/Main\\_Page](http://www.navipedia.net/index.php/Main_Page).

#### b) *Le DGPS par augmentation de données GNSS*

Cette méthode consiste à utiliser les données de plusieurs stations de référence situées « à proximité » de la zone d'intérêt afin d'effectuer des corrections sur les pseudo-distances et sur les phases. Les réseaux de stations utilisés, rattachés à un ITRF, sont la propriété des prestataires de service. Initialement basés sur la mesure de code C/A et de phase sur L1 qui offrait une précision de l'ordre du mètre, les algorithmes de traitement des données se rapprochent de plus en plus du RTK réseau puisque il n'est pas rare que le code P<sup>6</sup> et les mesures de phase sur L2 soient utilisés. La précision obtenue est ainsi décimétrique avec un intervalle de confiance à 95%. Malgré tout, cette technique reste fortement basée sur des mesures de pseudo-distance qui, compte-tenu de leurs longueurs d'onde, sont moins précises que les mesures de phase.

#### c) *Le PPP*

##### (1) *Le PPP par augmentation de données GNSS*

Du point de vue des infrastructures mises en place dans la chaîne de traitement, ce principe est similaire à celui du paragraphe précédent. Les principales différences résident dans le fait qu'un modèle global de correction est établi et appliqué en fonction de la position du récepteur et que le traitement est essentiellement basé sur des mesures de phase plutôt que de pseudo-distances. Le calcul de la position repose sur un filtre de Kalman. Le temps de convergence (lié dans les deux cas à la non résolution des ambiguïtés) est comparable à celui des techniques DGNSS offrant des précisions similaires (de l'ordre du décimètre) mais le caractère global des corrections permet de s'affranchir de la distance à une station de référence. Il s'agit par conséquent d'une méthode de positionnement absolu contrairement au caractère relatif du DGNSS. La précision élevée de cette technique par rapport à la plupart des solutions différentielles réside dans la détermination de modèles de valeurs d'horloges et

---

<sup>6</sup> Code Y pour être plus précis – ou code P auquel est ajouté un code W classifié par le département de la défense américaine dans le cadre de l'antileurrage (Anti-spoofing AS en anglais) actif en continue depuis 1994.

d'orbites à une échelle globale basés sur les observations réalisées au niveau de chaque station du réseau associé au service.

## (2) Le PPP naturel <sup>7</sup>

L'IGS a lancé au mois d'avril 2013 son service de détermination de valeurs d'orbites et d'horloges en temps réel – plus connus sous le nom de Real Time Service (RTS). Si ce service n'est pour le moment disponible que pour le système GNSS américain, d'autres constellations seront ajoutées dans un futur proche. Le principe de base est identique à celui du PPP par augmentation de données : il s'agit d'une technique de positionnement absolu qui permet, contrairement aux DGNSS et au RTK de s'affranchir de la distance à une base.

Je pense que ce service, parce qu'il constitue une diminution considérable des coûts (gain de temps, un seul récepteur nécessaire, etc.) et qu'il offre une précision équivalente aux techniques par augmentation de données va largement se développer au sein de Total. Malgré tout, cette technique, de même que celles basées sur des SBAS<sup>8</sup> impose de prendre en considération les vitesses de déplacement de plaques. En effet, ces techniques fournissent des coordonnées à l'époque de mesure. Par conséquent, il sera indispensable, pour conserver la cohérence de points mesurés à des époques différentes, de propager l'ensemble des coordonnées acquises vers un instant de référence.

Par ailleurs, le RTS est dispensé dans le système de référence de l'IGS à savoir l'IGS08 à l'heure actuelle. Il est donc nécessaire d'appliquer une transformation pour se ramener au système associé à la géodésie locale avant de propager les coordonnées dans cette dernière. C'est dans ce cas d'un positionnement absolu que mon sujet prend tout son sens : en utilisant des techniques utilisant un système base-mobile traditionnel, il suffit de fixer les coordonnées de la base à l'époque considérée pour s'affranchir du problème. À l'inverse, les techniques de positionnement absolu et celles nécessitant des SBAS fournissent des résultats à l'époque de la mesure ce qui nécessite de se ramener une époque particulière dans un système de référence donné.

À titre d'exemple, une personne réalisant une mesure PPP en France obtiendra des coordonnées dans le système IGS08. Pour se ramener dans le système national légal, elle devra propager ses résultats dans le RGF93 homogène à l'ETRF2000 à l'époque 2009.0. La question étant de savoir comment passer de l'IGS08 à l'ETRF2000. Nous verrons plus loin qu'en assimilant la réalisation IGS à l'ITRF, l'IGN a publié des paramètres de transformation vers le système de référence européen.

A termes, les valeurs d'orbites et d'horloges pourront être déterminées à partir de réseaux continentaux. Les coordonnées acquises en utilisant ces données seront dès lors exprimées dans le repère de référence associé ; il ne restera donc plus qu'à propager les coordonnées dans la géodésie nationale.

---

<sup>7</sup> Pour plus d'information, le lecteur se référera à l'article de Bernard FLACELIERE paru dans la revue XYZ N°135 (page9) ainsi qu'au site de l'IGS dédié au RTS : <http://rts.igs.org/>

<sup>8</sup> SBAS : systèmes d'augmentation de données par satellites

## B. Les fournisseurs de systèmes d'augmentation globaux par satellite (SBAS)

Il existe 3 fournisseurs de services d'augmentation de données GNSS : *C-Nav*<sup>9</sup>, *Fugro*<sup>10</sup> et *Veripos*<sup>11</sup>. Chacune de ses entreprises propose des solutions de positionnement dynamique, relatif ou absolu dédiées aux activités offshore avec des précisions comprises entre 1m et 10 cm pour un intervalle de confiance à 95%.

### 1. Les solutions proposées par les fournisseurs

#### a) *C-Nav*

Cette société ne propose que des solutions PPP nommées respectivement C-Nav-C1 effectuant des mesures sur la constellation GPS et C-NAV-C2 intégrant en plus le GNSS russe GLONASS. Le tableau suivant récapitule les informations concernant ces deux services :

	C-NavC <sup>1</sup>	C-NavC <sup>2</sup>
Technique	PPP	PPP
Constellation	GPS	GPS + GLONASS
Réseaux de stations	Constitué de stations propriétaires et de celles du JPL <sup>12</sup>	Propriétaire
Logiciel d'estimation des orbites et horloges des satellites	Version améliorée du logiciel « Real-time GIPSY » développé par le JPL	Algorithmes propriétaires de détermination et prédiction des valeurs d'orbites et d'horloges intégrés dans le logiciel iCORE
Correction atmosphérique	Correction des délais ionosphériques à l'aide de récepteurs bi-fréquence	Correction des délais ionosphériques à l'aide de récepteurs bi-fréquence
Corrections autres	Atténuation des multi-trajets avec algorithmes propriétaires et antennes spécifiques ; correction troposphérique à priori à l'aide du model GMF <sup>13</sup> /GPT <sup>14</sup> puis estimation et correction du délai troposphérique zénithal correspondant à la partie humide en temps réel	Atténuation des multi-trajets avec algorithmes propriétaires et antennes spécifiques; correction troposphérique à priori à l'aide du model GMF/GPT puis estimation et correction du délai troposphérique zénithal correspondant à la partie humide en temps réel
Système de référence	ITRF 2005 à l'époque de mesure	ITRF 2008 à l'époque de mesure
Précision à 95%	H=10cm et V= 15cm	H=8cm et V=15 cm

Tableau 2: système d'augmentations de données de C-Nav

<sup>9</sup> <http://www.cnavgNSS.com/site.php>

<sup>10</sup> <http://www.starfix.com/>

<sup>11</sup> <http://www.veripos.com/>

<sup>12</sup> Jet Propulsion Laboratory

<sup>13</sup> « Global Mapping Function » : fonction de modélisation basée sur des données numériques de paramètres météorologiques

<sup>14</sup> « Global Pressure and Temperature » : modèle permettant d'augmenter la résolution des données météorologiques au niveau du sol

Les qualités d'un bon SBAS sont la précision, la fiabilité et la redondance. Par conséquent, C-Nav, tout comme ses concurrents, utilise pour chaque service plusieurs récepteurs co-localisés sur un même site ; deux centres de calcul déterminent simultanément des valeurs d'orbites (à 5 cm (1 sigma) pour le système GPS et à 14 cm (1 sigma) pour GLONASS en temps réel) et d'horloges et délivrent les corrections par l'intermédiaire de deux services commerciaux de communication constitués de 7 satellites géostationnaires dont le monitoring est effectué en permanence sur la bande L par les stations de réception.

En ce qui concerne le réseau de référence du service C-NAV<sup>C2</sup>, C-Nav utilise une technologie déposée afin de calculer son propre système de référence aligné sur l'ITRF 2008 tandis que celui utilisé par C-Nav-C1, constitué de stations du JPL est aligné sur l'ITRF 2005.

**b) Fugro**

L'entreprise hollandaise fournit des SBAS utilisant aussi bien la mesure PPP que la mesure D-GNSS.

	StarFix Plus	StarFix L1	StarFix Hp
Technique	DGPS	DGNSS	DGPS
Constellation	GPS	GPS+GLONASS	GPS
Réseaux de stations	Un réseau de stations propriétaire commun à l'ensemble des services différentiels (environ une centaine de stations)		
Principes	Corrections de pseudo-distances sur L1 à partir de plusieurs stations de références situées à proximité		Corrections sur la phase et le code de L1 et L2
Correction ionosphérique	Application du modèle Klobuchar pour corriger les effets ionosphériques à la fois pour les données du mobile et des stations de référence		Utilisation de la combinaison Ionosphere Free L3
Corrections autres	Aucune correction des effets troposphériques ou des multi-trajets n'est appliquée pour ces deux techniques		Estimation des corrections troposphériques à partir des données brutes en même temps que les positions
Système de référence	ITRF 2008	ITRF 2008	ITRF 2008
Précision à 95%	Hor : 1.5m (dist <500km)	Hor : 1.5m (dist <1500km)	Hor : 0.1m (dist <1000km)

Tableau 3:SBAS basés sur la méthode DGNSS proposés par Fugro

On notera que ce fournisseur est pour le moment le seul à proposer un service PPP utilisant la fréquence L5 (tableau 4) des satellites GPS. Par ailleurs, la solution StarFix Hp est la seule parmi toutes celles proposées par ces sociétés à offrir une précision équivalente à celle des services PPP. Cela permet de répondre à la volonté des pétroliers d'utiliser conjointement aux moins deux systèmes de positionnements indépendants l'un de l'autre afin d'assurer une redondance des mesures en permanence et de pallier à une éventuelle défaillance de l'une des solutions.

	StarFix XP	StarFix G2
Technique	PPP	PPP
Constellation	GPS	GPS + GLONASS
Réseaux de stations	Constitué des stations du JPL	Propriétaire indépendant de celui des services différentiels et constitué d'une quarantaine de stations
Logiciel d'estimation des orbites et horloges des satellites	Logiciel « Real-time GIPSY » développé par le JPL (Ce laboratoire réalise le calcul de la solution)	Algorithmes propriétaires de détermination et prédiction des valeurs d'orbites et d'horloges basés sur le logiciel GIPSY
Correction atmosphérique	Correction des délais ionosphériques à l'aide de récepteurs bi-fréquence par combinaison L3	Correction des délais ionosphériques par estimation des effets en temps réel pour chaque satellite à partir des données brutes ce qui permet d'utiliser également la fréquence L5 des GPS
Corrections autres	Correction par modélisation des effets troposphériques	Correction par modélisation des effets troposphériques
Système de référence	ITRF 2005 à l'époque de mesure	ITRF 2008 à l'époque de mesure
Précision à 95%	0.1m	0.1m

Tableau 4: SBAS basé sur la méthode PPP proposés par Fugro

### c) Veripos

Cette société propose trois solutions PPP et trois solutions différentielles dont Standard Plus (*tableau 5*) dédiée aux mesures à proximité de l'équateur magnétique où les effets ionosphériques se font particulièrement ressentir.

D'après les informations qui m'ont été transmises, le service Ultra est le seul à dispenser une solution PPP dans l'ITRF2008 alors que le réseau de stations utilisé pour la détermination des valeurs d'orbites et d'horloge est celui du JPL (*tableau 6*). En effet, le réseau du Jet Propulsion Laboratory est pour le moment rattaché à l'ITRF2005 et les solutions des autres fournisseurs s'appuyant sur le réseau de la Nasa sont directement exprimées dans cette réalisation de l'ITRS. Il me semble que le fait de transformer les données issues du service Ultra de l'ITRF2005 vers l'ITRF2008 en appliquant des paramètres de transformation est la méthode qui assure le plus de cohérence entre deux services PPP d'un même fournisseur. Malgré tout, il semble que la mise à disposition de l'ITRF2013 au cours de cette année risque d'inciter l'ensemble des propriétaires de réseau à basculer leurs données dans cette nouvelle réalisation de l'ITRS.

Une chose plus étrange toutefois, est que le réseau de station propriétaire est commun aux techniques DGNS et PPP proposée. Je ne vois pas dès lors comment est assurée la redondance de la chaîne de traitement imposée par le comité géomatique de l'OGP.

	Standard	Standard 2	Standard Plus
Technique	DGPS	DGNSS	DGPS
Constellation	GPS	GPS+GLONASS	GPS
Réseaux de stations	Un réseau de stations propriétaire commun à l'ensemble des services différentiels et PPP		
Principes	Corrections de pseudo-distances sur L1 à partir de plusieurs stations de références situées à proximité		Corrections des pseudo-distances par simple différence à partir de L1 et L2 (code et phase)
Correction ionosphérique	Calcul de corrections pour chaque satellite à partir des observations au niveau des stations de référence puis estimation de la correction à apporter au niveau du mobile		Utilisation de la combinaison Ionosphere Free L3
Corrections autres	Même principe que pour la correction ionosphérique		Estimation des corrections troposphériques à partir des données brutes en même temps que les positions
Système de référence	ITRF 2008	ITRF 2008	ITRF 2008
Précision	Hor : 1-2 m (dist <2000km)	Hor : 1-2 m (dist <2000km)	Hor : 1-2 m (dist <2000km)

Tableau 5: SBAS basés sur la méthode DGPS proposés par Véripas

	Utra	Apex	Apex 2
Technique	PPP	PPP	PPP
Constellation	GPS	GPS	GPS+GLONASS
Réseaux de stations	Réseau de stations du JPL	Un réseau de stations propriétaire commun à l'ensemble des services différentiels et PPP (avec stations supplémentaires pour le PPP afin d'assurer une meilleure couverture)	
Logiciel d'estimation des orbites et horloges des satellites	A partir du logiciel RTG développé par le JPL	Valeurs d'orbites et d'horloges déterminées par des algorithmes de traitement intégrés dans les logiciels des centres de calcul	
Correction atmosphérique	Correction par combinaison Ionosphere Free L3 déduite des observations sur L1 et L2		
Corrections autres	Multi-trajets atténués par des antennes spécifiques, modélisation de l'erreur troposphérique à partir des résidus en temps-réel.		
Système de référence	ITRF 2008 à l'époque	ITRF 2008 à l'époque	ITRF 2008 à l'époque
Précision à 95%	H=10cm et V=20 cm	H=10cm et V=20 cm	H =10cm et V=20 cm

Tableau 6:SBAS basés sur la technique PPP proposés par Véripas

## 2. Comparaison des solutions

Les données répertoriées ci-dessus sont celles que les fournisseurs ont accepté de me faire parvenir et ne sont par conséquent ni exhaustives, ni vérifiables ; on notera par exemple qu'aucun ne parle des modèles de correction appliqués en terme de charge océanique alors qu'il est clair, compte-tenu de la précision de certaines solutions que ce phénomène est intégré dans la chaîne de traitement. Les principales différences auxquelles nous avons accès concernent les corrections atmosphériques, le

traitement des différents systèmes de coordonnées liés aux deux constellations utilisables ainsi que la mise à jour des coordonnées des stations des réseaux.

#### a) *Les corrections ionosphériques*

Il convient de distinguer dans ce cas les techniques basées sur des observations bi-fréquences (ou tri-fréquences dans le cas de Starfix G2 cf *tableau 4*) de celles mettant en œuvre uniquement L1. Dans le premier cas, la combinaison L3 est largement utilisée :

$$L_3 = \frac{f_1^2 * L_1^2 - f_2^2 * L_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (13)$$

Où  $L_1$  et  $L_2$  sont les observables des fréquences  $f_1$  et  $f_2$ . Cela concerne l'ensemble des méthodes PPP de l'ensemble des fournisseurs ainsi que les techniques DGNS « de précision » (i.e. Standard Plus (*tableau 5*) et StarFix Hp (*tableau 3*)). Les solutions basées sur des observations mono-fréquence utilisent soit des modèles tel que celui de Klobuchar comme c'est le cas du StarFix Plus et StarFix L1 (*tableau 3*) soit les observations au niveau des stations de référence pour extrapoler la correction à apporter au niveau du mobile (*tableau 5*). On notera que ces solutions sont moins précises et ne s'appliquent généralement que dans le cas où l'activité atmosphérique est faible.

#### b) *Les corrections troposphériques*

Cette erreur est soit négligée (puisque la précision métrique escomptée ne nécessite pas de la prendre en considération) soit estimée à partir des données brutes, des résidus et de modèles. L'estimation dépend des fournisseurs, de la technique de mesure et de la précision escomptée. Parmi les plus abouties, on remarquera la méthode de C-NAV qui calcule une correction à priori à partir des modèles empiriques GMF<sup>15</sup>/GPT<sup>16</sup> puis estime l'erreur résiduelle du délai zénithal en temps-réel (*tableau 2*). Fugro nous en apprend un peu plus sur la méthode mise-en-œuvre (*tableau 4*) dans la modélisation de la partie humide : il s'agit d'un délai zénithal multiplié par une fonction cartographique. En particulier, dans le cadre des techniques PPP, l'entreprise utilise le modèle de Saastamoinen pour calculer le « délai zénithal sec » et les fonctions cartographiques de Niell (une pour la partie sèche, l'autre pour la partie humide). Par ailleurs, pour des applications nécessitant une très grande précision, un gradient troposphérique pourrait être estimé mais puisque ces techniques sont essentiellement dévolues aux applications cinématiques, l'effet est négligeable. (Pour plus d'informations sur les modèles et les fonctions cartographiques : *Fund, Morel, Mocquet, 2010*).

#### c) *Traitements des systèmes de coordonnées*

Ce paragraphe ne concerne que les techniques utilisant à la fois la constellation américaine GPS et la constellation russe GLONASS : en effet, le système de coordonnées WGS84 associé au premier est différent du PZ90.2 du second. Dans un souci d'exactitude, il est intéressant de voir comment font les fournisseurs de services pour se ramener à l'ITRF (homogène, rappelons-le, à 10cm avec le WGS84). Dans le domaine du PPP (on parle aussi de Gc-GNSS pour Globally Corrected GNSS), les valeurs d'horloges et d'orbites des satellites (GPS&GLONASS) sont calculées à partir de stations de référence dont les coordonnées sont en ITRF 2008 (ou 2005 dans le cas du réseau JPL) ; par conséquent, les coordonnées des points observés sont également de l'ITRF. En ce qui concerne le DGNS, l'approche

---

<sup>15</sup> Global Mapping Function : Fonction utilisée pour cartographier le délai (partie hydrostatique et partie humide) zénithal à priori pour n'importe quel angle d'élévation basée sur des données du modèle météorologique numérique du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen-terme

<sup>16</sup> Global Pressure and Temperature : modèle empirique fournissant la température et la pression partout au voisinage de la surface de la Terre

dépend des sociétés : le StarFix L1 de Fugro n'applique pas de paramètres de transformation entre PZ90.2 et WGS84 puisque ce service est essentiellement utilisé dans un rayon de 500km et que l'erreur faite en admettant que les deux systèmes sont égaux est plus ou moins la même au récepteur et au mobile. Toutefois, si le besoin s'en fait sentir, il est parfaitement possible d'appliquer des paramètres de transformation qui se résument alors à 3 translations respectivement selon les 3 axes du repère. Veripos applique pour sa part des translations entre les deux systèmes à la fois au niveau du mobile et au niveau des stations de références.

Le problème est qu'il n'existe pas de paramètres de transformation acceptés universellement pour passer du PZ90.2 au WGS84 et par conséquent chaque fournisseur est libre d'appliquer la solution qui lui semble la plus adaptée. Ce vide institutionnel peut engendrer des biais importants pour les grandes lignes de base.

#### d) *Mise à jour des coordonnées des réseaux de station*

Comme le montrent les différents tableaux, chaque fournisseur de service utilise son propre réseau de stations de référence ainsi qu'un réseau basé sur le JPL (lorsqu'il ne s'agit pas directement de celui de ce dernier). Ces canevas étant référencés dans l'ITRF, il est important de mettre à jour les coordonnées des stations propriétaires afin de prendre en compte le caractère dynamique de ce système et ainsi conserver une cohésion avec ce dernier. Les coordonnées des stations utilisées en PPP sont mises à jour continuellement à partir de leur vitesses comme conseillé par l'IERS afin de conserver la détermination précise dans l'ITRF des valeurs d'orbites et d'horloges en temps-réel. En matière de DGNSS, les coordonnées sont mises à jour soit sur une base annuelle soit lorsque l'écart entre coordonnées calculées et coordonnées « fixes » de la station excède 1 cm. Cette démarche permet de conserver une cohérence globale entre les coordonnées issues de mesures PPP et celles obtenues par DGNSS.

En définitive, nous concluons cette partie en faisant remarquer au lecteur que, s'il est possible de parler d'époque de mesure en matière de PPP, cette expression constitue un abus de langage pour des mesures DGNSS puisqu'il n'est pas possible de se référer à une époque particulière (les coordonnées des stations n'étant pas mises à jour en même temps).

## IV. Les besoins de l'exploration et de la production pétrolière en terme de positionnement

Le secteur amont de l'industrie pétrolière peut-être décomposé en 3 grandes activités qui sont, dans l'ordre chronologique, l'acquisition sismique, le forage puis la phase projet/construction. Cette partie a pour but de présenter succinctement ces 3 corps de métiers et leurs besoins en matière de précision de positionnement.

### A. L'acquisition sismique

Cette phase, méconnue du grand public, est d'une importance primordiale: elle consiste à établir une cartographie du sous-sol afin de déterminer la présence éventuelle d'un réservoir ou du moins de structures géologiques favorables à la formation d'un « Trap » (« piège » en français). De façon synthétique, un réservoir correspond à une couche géologique imperméable et non poreuse située au-dessus de couches sédimentaires perméables et poreuses. Les hydrocarbures, qui résultent de la décomposition de matière organique, sous des contraintes de pressions et de températures élevées, remontent lentement en direction de la surface jusqu'à rencontrer un obstacle à leur progression. L'accumulation engendrée constitue un réservoir. Ce processus nécessite des millions d'années et la compréhension de ces mécanismes est d'une complexité largement supérieure au résumé ci-dessus. La

modélisation de la partie supérieure de la lithosphère consiste à envoyer des ondes dans le sol afin de mesurer, au niveau de récepteurs positionnés en surface le temps de propagation de l'onde réfléchi par les couches du sous-sol. A terre, le signal est émis par des camions vibreurs ou de la dynamite et est récupéré par des géophones. En mer, l'onde est générée à l'aide de « Air guns »<sup>17</sup> et les données sont réceptionnées au niveau d'hydrophones attachés le long d'un câble. La synchronisation est réalisée à l'aide de la mesure du temps GPS à la fois au niveau de la source et des récepteurs.

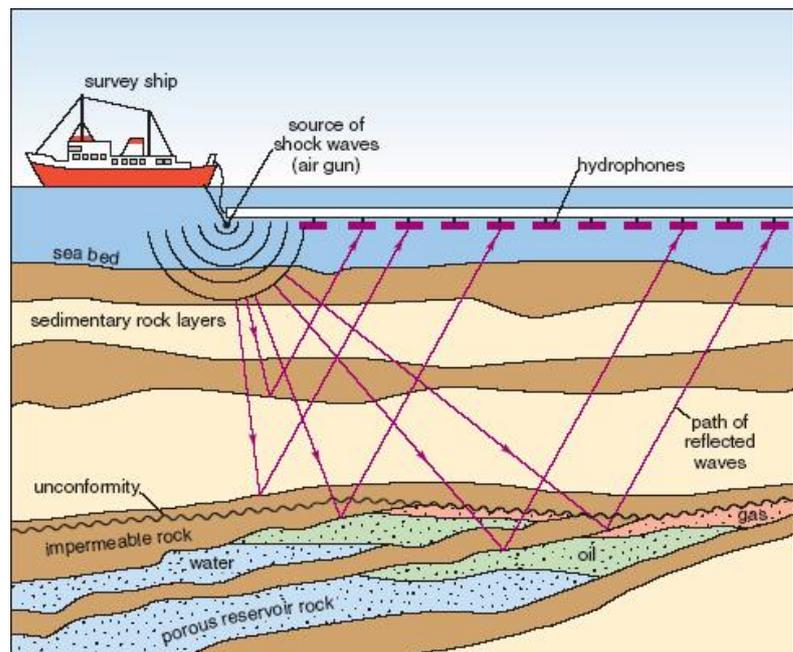


Figure 2 : Schéma de principe d'une campagne sismique en mer

Ce type d'opération peut nécessiter plusieurs mois et la précision obtenue dépend :

- du « bin »<sup>18</sup> (6.25 à 25 mètres en longitudinal et de 12.50 à 50 mètres en latéral)

<sup>17</sup> Canons à air

<sup>18</sup> Taille de la zone élémentaire acquise lors d'un tir sismique : équivalent à la résolution en termes de photogrammétrie (emprise au sol d'un pixel)

- du nombre de direction(s) dans lesquelles sont acquises les données : on parle de sismique 2D lorsque les mesures sont faites uniquement dans un sens (un seul streamer<sup>19</sup> tiré par ligne naviguée – on obtient alors une coupe du sous-sol) et de 3D lorsque plusieurs streamers sont tractés par le bateau (on obtient dans ce cas une représentation en volume)
- de la précision avec laquelle sont positionnés les sources et les émetteurs. Après discussion avec mon maître de stage, une précision d'un demi bin est suffisante (3 mètres au mieux) pour l'emprise au sol de chaque élément de surface acquis. En intégrant la chaîne d'erreur, cela impose un positionnement du bateau, des canons et des extrémités streamer avec une précision de l'ordre de 50 centimètres.

Ces dernières années, un autre type de mesure dédié à l'amélioration des connaissances des réservoirs s'est développé : l'acquisition sismique 4 D ; cette dernière consiste en l'établissement d'une carte des variations du sous-sol entre deux sismiques 3D réalisées à différentes étapes de l'exploitation du gisement. Il est nécessaire dans ce cas de positionner sources et récepteurs à des endroits sensiblement identiques à ceux des campagnes précédentes. Ce type de tir est pour le moment, uniquement réalisé en mer. La précision de positionnement de surface par rapport au premier tir est de l'ordre de 3 mètres au mieux. Toutefois, la technique n'a de cesse de s'améliorer et un positionnement plus précis permettrait une diminution du temps de calcul et donc du coût nécessaire à la réduction du bruit engendré par des différences de position des émetteurs et récepteurs entre deux acquisitions consécutives.

## B. Le forage

Il s'agit certainement de l'opération la plus connue du grand public parce que largement utilisée dans d'autres domaines (construction, voirie et réseaux divers, chauffage, etc.). Appliqués à l'industrie pétrolière, nous devons distinguer deux types de forages : les premiers dits d'exploration, visent à améliorer la connaissance du sous-sol par l'intermédiaire de prélèvements du sous-sol destinés à être analysés en laboratoire (les carottages) et de diagraphies<sup>20</sup> ; les seconds dits de production, permettent les échanges de matières entre la surface et le réservoir (pétrole, gaz, eau, additifs, etc.).

Les topographes ont la charge du positionnement de la tête de puits : c'est-à-dire du trépan lorsqu'il pénètre le sol au début du forage tandis que la mesure de la trajectoire du puits en lui-même incombe aux foreurs et se fait en relatif par rapport à la tête de puits. On distingue les activités deep-offshore où le rig de forage est maintenu « stable » -- par positionnement dynamique ou par des systèmes d'ancrage au fond marin – des activités près des côtes ou à terre où le rig peut reposer directement sur le sol.

En offshore, la tolérance de positionnement est de 2 mètres pour un puits d'exploration et de 1.5 mètres pour un puits de production tandis que la précision de positionnement sur la position finale est demandée à 1 mètre près. La problématique est différente à terre puisqu'une mesure traditionnelle (statique, statique-rapide ou RTK) permet de se rattacher à un système de référence permanent ou à la

---

<sup>19</sup> câble sur lequel sont fixés les hydrophones

<sup>20</sup> Diagraphie : Technique d'acquisition sismique qui consiste à étudier l'écho (renvoyé par les couches environnantes) d'ondes sonores générées par un émetteur descendu au fur-et-à-mesure de l'avancement du puits.



## V. Analyse d'un cas concret : le Myanmar

Les chapitres précédents étaient destinés à présenter le système de référence global ITRS et les évolutions liées à ses réalisations successives. Nous avons ensuite présenté les techniques de positionnement utilisées dans le cadre des activités d'exploration et de production pétrolières. Le dernier chapitre était destiné à éclairer le lecteur quant aux principales activités de cette industrie ainsi que ses besoins en matière de précision de positionnement.

Nous allons maintenant nous concentrer sur les paramètres susceptibles d'affecter les coordonnées d'un point à la surface de la Terre. Quels sont-ils ?

- Tout d'abord, les coordonnées d'un point sont exprimées dans un repère défini par une origine, une orientation et un facteur d'échelle comme nous l'avons vu au-dessus. Il est donc logique que les coordonnées d'un point exprimées dans deux systèmes différents ne soient pas les mêmes. Par conséquent, pour comprendre comment sont exprimées les coordonnées d'un point il faut connaître la façon dont le repère a été déterminé (à partir de quelles techniques et avec quelle précision).
- Ensuite, la Terre est un corps céleste constitué de différentes couches (le noyau, le manteau et la lithosphère) en interaction les unes avec les autres. Ce comportement dynamique engendre un phénomène de tectonique des plaques. Il est donc important de situer la zone de travail par rapport à ces structures afin de comprendre les déformations de la surface de la Terre auxquelles un topographe doit s'attendre. En effet, une plaque ne peut pas être considérée comme un solide à proprement parlé : la matière qui la constitue est soumise à un phénomène de convection. En schématisant, cela signifie qu'au niveau des limites de la plaque, de la matière va être enfouie en direction du manteau (on parle de zone de subduction) tandis que de « l'autre côté », de la matière va être créée en surface par du magma issu du manteau.
- Enfin, le travail du topographe est de déterminer s'il doit tenir compte des paramètres énoncés ci-dessus dans le calcul des coordonnées. Cela dépend de la zone où il se situe, des techniques d'observation qu'il utilise mais surtout de la précision à laquelle il doit fournir les positions demandées.

Étudions le cas du Myanmar selon ces trois axes afin d'illustrer mes propos.

### A. Analyse de la géodésie

#### 1. Définition de la géodésie locale

Le réseau fut mis en place en décembre 1992 par *Geoid et Racal Survey Singapour* au niveau de l'embouchure de l'Irrawaddy en mer d'Andaman afin de rattacher les activités off-shore de *Total Exploration et Production Myanmar* aux repères existants utilisés par l'opérateur *Japex/Esso*. Pour cela, deux sites (Andaman et Diamond Island) ont été mesurés à l'aide du système Transit durant toute la durée des opérations permettant ainsi d'obtenir des coordonnées WGS84 avec une précision absolue de 4 à 5 mètres. Dans le même temps, ces stations, en plus de celle de Pyinzalu ont été occupées par GPS statique différentiel. L'écart-type sur les lignes de base qui en résulte est de 10 à 50cm pour 100km (1 à 5 ppm) pour un intervalle de confiance de 95%. Les éléments de définition du système géodésique local, le Moattama 1992, sont les suivants :

- *Ellipsoïde* : WGS84 ( $a = 6\,378\,137.0\text{m}$  ;  $f = 1/298.257\,223\,563$ )

- *Point fondamental* : point GPS d'Ama
- *Paramètres de projection* :
  - ✓ Projection UTM zone 46 Nord
  - ✓ Méridien Central : +93° Est
  - ✓ Latitude d'origine : 0°00'00''
  - ✓ Faux Nord : 0.00m
  - ✓ Faux Est : +500 000.00m
  - ✓ Facteur d'échelle le long du méridien central : 0.9996

Compte tenu des choix opérationnels adoptés à l'époque, aucun datum shift n'avait été calculé par rapport au WGS84 vrai (environ 4m d'écart) ; le Moattama 1992 étant alors considéré comme du WGS84 approché. Le rapport préconisait toutefois, dans le cadre de mesures GPS différentielles, de stationner la base sur un point connu.

## 2. Détermination des paramètres de transformation entre systèmes local et global

En 1994, la constellation GPS fût déclarée pleinement opérationnelle. Il devenait donc possible d'obtenir des précisions centimétriques pour des positions absolues ; en conséquence, l'erreur faite en assimilant le Moattama1992 au WGS84 n'était plus acceptable. Des projets de campagne sismique sur les blocs M5&M6 et de construction d'un pipeline en direction de la Thaïlande, imposaient de déterminer les paramètres de passage entre le Moattama 1992 et WGS84 avec une précision tout au plus décimétrique afin de répondre aux besoins de ces activités. Cette détermination se déroula en deux étapes. Tout d'abord, les sous-traitants *Western Geophysical Company* et *Wimpol Surveys* calculèrent les coordonnées ITRF91 (assimilées au WGS84) de la station de Diamond Island (connue en Moattama 1992) à l'aide du système DGPS Orion<sup>22</sup> avec pour stations de référence Kuantan et Singapour ; les paramètres de translation pour ce point sont (du Moattama1992 vers l'ITRF 91) :

- d X = +1.56 m
- d Y = - 7.66 m
- d Z = - 7.58 m

Dans un second temps, *Racal Survey Singapour* mena une campagne géodésique en vue de l'obtention d'un datum shift à partir des stations d'Ama et de Heinze Chaung (station mise en place au niveau de l'atterrage du pipeline en cours de développement en 1994). Dans cette optique, deux ajustements de réseaux furent réalisés : le premier par des mesures DGPS DeltaFix<sup>23</sup> avec pour base la station d'Ama ; les coordonnées ainsi obtenues sont en Moattama 1992. Le second basé sur le système DGPS Skyfix<sup>24</sup> utilise comme station de référence celle de Besi dans la banlieue de Kuala Lumpur (Malaisie). Les paramètres de transformation résultants de la moyenne des différences entre ces deux protocoles d'observation sont (du Moattama vers le WGS84) :

- d X = + 1.86 m
- d Y = - 8.28 m
- d Z = - 7.90 m

<sup>22</sup> Réseau géodésique permanent de premier ordre coordonné à l'ITRF91 utilisant des transmissions satellitaires

<sup>23</sup> Système DGPS de Racal dont les corrections sont transmises par l'intermédiaire d'un réseau d'antennes hautes fréquences

<sup>24</sup> Réseau géodésique permanent de premier ordre coordonné au WGS\_84 utilisant des transmissions satellitaires

Le datum shift utilisé à l'heure actuelle dans les fiches géodésiques de Total correspond à la moyenne des éléments obtenus lors des deux sessions décrites ci-dessus ; le vecteur de translation entre Moattama 1992 et ITRF91 adopté est le suivant :

- $d X = + 1.7 \text{ m}$
- $d Y = - 8.0 \text{ m}$
- $d Z = -7.7 \text{ m}$

Il convient de noter que cette transformation est donnée entre la géodésie locale et des mesures assimilées à l'ITRF91 alors qu'en réalité, seules les données Orion admettent ce dernier comme système de référence natif. Selon le site internet du LAREG dédié à l'ITRF, le WGS84 ne devient consistant avec l'ITRF qu'à partir de la réalisation G730 mise en place en février 1994 (homogène à 10 cm près avec l'ITRF 92).

## B. Analyse de la géophysique

L'objectif est de caractériser (et éventuellement quantifier) les sources de déplacements liées à la tectonique des plaques et aux séismes pour cela, il est nécessaire d'étudier la géodynamique des lieux.

### 1. Contexte Géodynamique

Le champ off-shore de Yadana est situé au large de Rangoon (la capitale Birmane) en mer d'Andaman. La concession se trouve sur la microplaque Birmane (*figure 6*) s'étendant sur plus de 4000 km de long (de 7°S à 27° N) (Nielsen & al, 2004). Cette structure géophysique résulte d'un décrochement de la plaque Sonde et se trouve entraînée vers le Nord par la plaque indienne. Cette lanière continentale est délimitée à l'Ouest par une zone de subduction où la plaque indienne plonge sous l'arc des îles d'Andaman au niveau de la faille Arakan-Sonde (Sunda trench) à une vitesse de l'ordre de 36mm/an avec une orientation N14°E dans la zone en question (Socquet, 2006).

Plus au Sud, on rencontre une jonction triple entre les plaques Indienne, Australienne et Birmane. L'interaction de cette dernière avec le bloc de la Sonde à l'Est est caractérisée par une faille décrochante dextre couplée à un glissement de direction N30°W le long de la faille de Sagaing. Cette faille qui s'étend sur près de 1500km de long du Nord au Sud trouve son origine dans le partitionnement de la convergence oblique entre la plaque Indienne et le bloc de la Sonde ; elle est

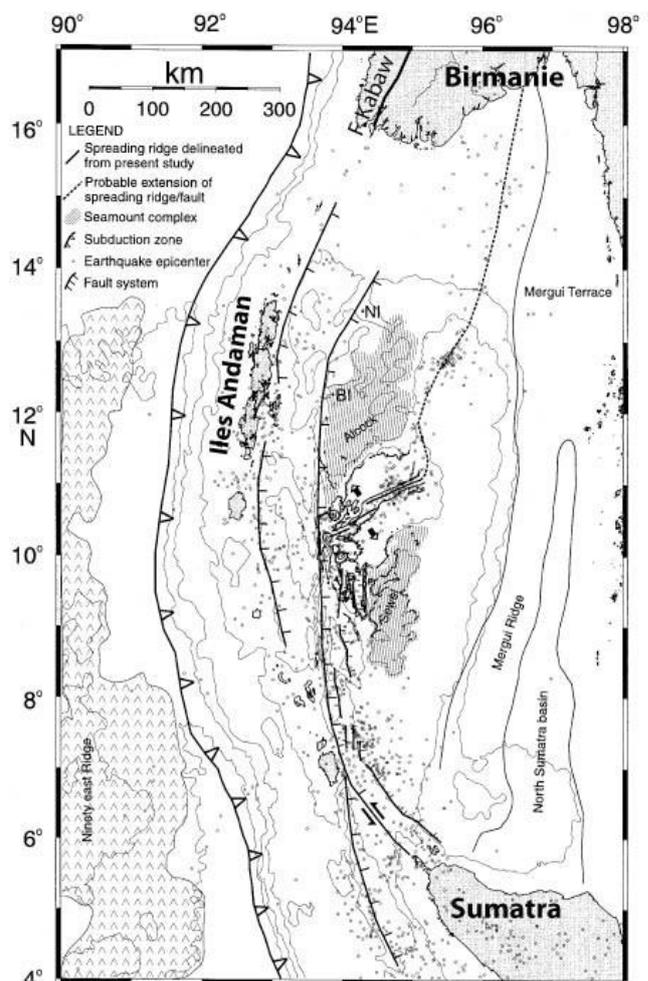


Figure 6 : Carte des structures géophysiques de la microplaque birmane (source : thèse Thomas Maurin 2009)

reliée à la faille de Sumatra (plus au Sud et dont l'origine est la même) par le système extensif du bassin d'Andaman.

Au nord, la microplaque présente une dynamique transformante au niveau de la jonction avec les plaques indiennes et eurasiennes (Maurin, 2009). Des mesures GPS directes le long de la faille de Sagaing ont montré une ouverture de 18mm/an (Vigny & al, 2003). Il ne s'agit là que des principales structures impactant notre étude : il existe d'autres failles entre la zone de subduction et la zone d'extension mais celles-ci n'ont pas été abordées puisqu'il est admis qu'elles jouent un rôle mineur dans les déformations qui nous intéressent.

## 2. Impact des événements tectoniques récents

La zone Sud de cette plaque a récemment été marquée par deux forts séismes d'une magnitude supérieure à 8 : celui de Sumatra en décembre 2004 (9.1-9.3  $M_w$ <sup>25</sup>) et celui de Nias en mars 2005 (~8.6 $M_w$ ). Ces événements tectoniques ont engendré de forts déplacements co-séismiques (jusqu'à 4 mètres) le long de l'arc Andaman ainsi que des phénomènes de relaxation post-séismique (de l'ordre de 40 cm) dont la dissipation avant le retour à l'équilibre peut prendre plusieurs décennies. De plus, cette plaque à fortes contraintes présente des périodes d'accumulation de stress qui génèrent également des déplacements importants. Ce fort aléa sismique et ses conséquences rendent les modèles de vitesses des plaques tectoniques tels que celui de l'ITRF 2008 perfectibles en raison du caractère ductile de cette microplaque et des déformations locales qui en résultent.

## C. Analyse du contexte d'exploitation

Le champ de Yadana est situé en eaux peu profondes (de l'ordre d'une quarantaine de mètres). Les installations reposent par conséquent à même le sol, ce qui offre des structures stables pouvant être assimilées à des installations on-shore. Toutefois, la plate-forme principale (plate-forme QP) est soumise à un phénomène de subsidence : la déplétion du réservoir due à son exploitation se traduit par une diminution de la pression interne de celui-ci. La masse d'eau combinée à celle de la plate-forme mènent à un affaissement du plancher océanique au-dessus du réservoir et donc de la plate-forme. Le monitoring de cet enfoncement est réalisé à l'aide de 3 stations permanentes disposées sur différents modules répartis sur le champ ainsi que d'une station située au siège de la filiale à Rangoon. Ces équipements ont été installés en octobre 2008 et font ressortir une subsidence de l'ordre de 20 cm par an sur la plateforme principale. Malgré tout, il est possible d'obtenir des précisions de mesures de l'ordre du centimètre sur ce champ. Il est donc nécessaire d'assurer une transformation aussi précise que possible vers la géodésie locale. Il pourrait être envisagé de calculer localement une vitesse de déplacement tectonique. De plus, nous avons vu qu'il s'agit d'une zone à forte sismicité ; afin de garder un maximum de cohérence entre des données acquises à plusieurs années d'intervalle, il faut donc essayer de quantifier les déformations engendrées par ces phénomènes.

---

<sup>25</sup>  $M_w$  : « moment magnitude scale » : échelle de mesure de l'énergie libérée par un séisme utilisée par les sismologues basée sur le moment sismique

## D. Traitement d'un cas pratique

Le problème rencontré par la filiale correspond typiquement à un manque de rigueur dans la gestion des différentes réalisations de l'ITRF. La plateforme principale (« PP ») a été installée en mai 1997, lors de la première phase de développement du champ ; ses coordonnées finales ont été déterminées par mesures Skyfix DGPS en ITRF92 époque 1994.0 :

- Longitude : 94°45'55.606 " E
- Latitude : 15°01'23.777" N

La première erreur commise est liée au fait que ces valeurs observées ont été converties directement en MOATTAMA 1992 sans avoir été préalablement transformées en ITRF1991 époque 1994.25 ; c'est ce qui aurait dû être fait en toute rigueur. Il en résulte un écart sur les coordonnées cartésiennes de 2.4cm<sup>26</sup>. Il est clair que, compte-tenu de la précision des mesures à l'époque, les conséquences de cet écart sont négligeables. Malgré tout, je souhaitais montrer qu'il existait une légère différence.

La deuxième faute, contrairement à la première, aurait pu être préjudiciable : en mars 2013, la filiale, suite aux subsidences observées sur ce champ, a mandaté le service topographique afin de valider les coordonnées d'implantation d'une nouvelle plate-forme en cours d'installation à ce moment-là. Ces coordonnées avaient été calculées relativement à celles de PP présentées ci-dessus. Elles étaient donc exprimées en ITRF1992 époque 1994.0. Or l'installation de la plateforme devait être réalisée à l'aide du système Starfix XP de Fugro dont le système de référence est l'ITRF2005 à l'époque de la mesure (cf *tableau 5*). L'écart engendré aurait été de 49.7 cm par rapport à la position réelle ; c'est-à-dire que les coordonnées initialement utilisées par l'équipe projet étaient à 50 cm au moins de la position théorique à laquelle on souhaitait installer le jacket. Notons que les déplacements liés aux séismes de Sumatra et de Nias ne sont pas considérés.

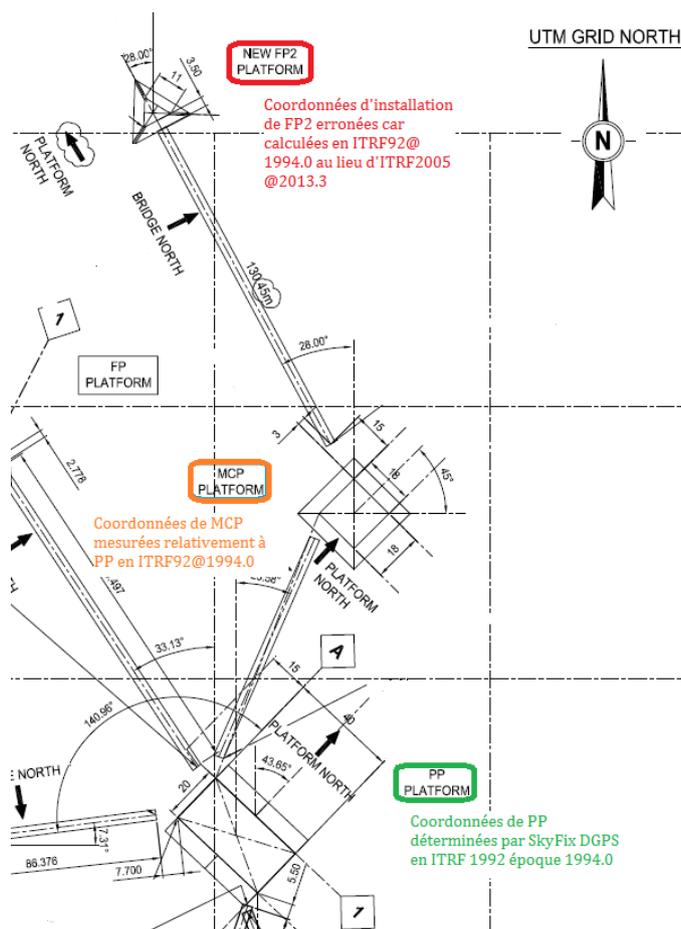


Figure 7: plan de principe des plateformes PP, MCP et FP2 du champ de Yadana au Myanmar

Quelles conséquences cela aurait-il pu avoir ? Dans ce cas précis, la passerelle censée relier la plateforme en place et celle nouvellement installée était déjà construite. Ce pont long de 130 mètres imposait une tolérance de 1 mètre entre les coordonnées telles que définies par le projet et celles

<sup>26</sup> Ecart observé entre les coordonnées ITRF1992 époque 1994.0 et ITRF1991 époque 1994.3 en appliquant les vitesses moyennes du tableau 7

obtenues une fois la structure en place. La moitié de cette tolérance était déjà dévolue à l'erreur liée à la mauvaise réalisation ITRF. Il faut par ailleurs ajouter la précision du système Starfix HP (10cm à 95%). On comprend dès lors que la marge d'erreur résultante est trop faible pour pouvoir positionner en pleine mer à partir de structures mobiles (barges, navires, etc.) un tripode de 55 mètres de haut et de plusieurs dizaines de tonnes.

Modèle	V total (mm/an)	Vx (mm/an)	Vy (mm/an)	Vz (mm/an)
HS2-Nuvel-1A	24,05	-22,99	-0,03	-7,05
HS3-Nuvel-1A	24,4	-23,3	0	-7,24
Nuvel-1A	24,41	-23,31	0	-7,25
Nuvel-1	25,07	-23,93	0,01	-7,48
GEODVEL 2010	26,52	-26,11	-0,96	-4,55
ITRF2000 [D&A 2001]	26,86	-26,5	-1,08	-4,22
APKIM2005-IGN	26,91	-26,71	-1,42	-3,02
APKIM2005-DGFI	27,03	-26,79	-1,35	-3,32
REVEL 2000	27,62	-27,27	-1,14	-4,25
APKIM2000	27,62	-27,42	-1,47	-3,04
CGPS 2004	27,71	-27,42	-1,28	-3,78
ITRF2000 [AS&B 2002]	27,8	-27,54	-1,33	-3,63
<b>Moyenne (mm/an)</b>	<b>26,33</b>	<b>-25,77</b>	<b>-0,84</b>	<b>-4,90</b>
<b>Ecart-type (mm/an)</b>	<b>1,44</b>	<b>1,83</b>	<b>0,63</b>	<b>1,80</b>
	<i>V total calculée</i>		26,25	
	<i>Ecart-type calculé</i>		2,64	

Tableau 7: vitesses utilisées pour le calcul ci-dessus sur le champ de Yadana (obtenues à partir du site de UNAVCO : [http://www.unavco.org/community\\_science/science-support/crustal\\_motion/dxdt/model.html](http://www.unavco.org/community_science/science-support/crustal_motion/dxdt/model.html))

## E. Conclusions relatives à l'activité de TEPM au Myanmar

L'application numérique traitée dans le chapitre ci-dessus a permis de mettre en lumière les points suivants :

- la plupart des équipes autres que les topographes ne sont pas au fait de l'importance des différents systèmes de référence. Par conséquent, l'équipe topographique devrait être consultée pour tout travail nécessitant le recours à des coordonnées
- il est indispensable de travailler dans le repère de référence adéquat en particulier lorsque l'on cherche à connecter des ouvrages disposés à plusieurs années d'intervalle.
- la phase d'installation était déjà lancée lorsqu'il a été demandé au service topographique de contrôler les coordonnées théoriques du centre du jacket, la filiale demandait une réponse dans la journée. Il est donc nécessaire que le topographe puisse convertir aisément des coordonnées entre différents ITRF et géodésies locales. De plus, il serait bon que le technicien puisse se

renseigner quant aux caractéristiques de la zone d'intervention ainsi qu'aux éléments remarquables susceptibles d'avoir un impact sur les coordonnées.

Au-delà de ces recommandations d'usage, il est de la responsabilité de l'équipe de topographie d'assurer une transformation fiable des coordonnées ; cela signifie qu'il faut que deux jeux de coordonnées acquis à des époques différentes puissent être propagés correctement dans la géodésie locale pour y être exploités. En fonction du type d'activité et donc de la précision recherchée, il faudra éventuellement appliquer des vitesses fiables de déplacement des plaques et modéliser les déformations engendrées par la sismicité élevée de la zone.

Pour le moment, 12 stations permanentes ont été installées par l'Observatoire de la Terre de Singapour, 4 autres devraient voir le jour d'ici 2014 au niveau de cette micro-plaque ; dans le cadre d'une coopération plus poussée entre Total et ce centre de recherche cela porterait à 18 (en se limitant aux stations non soumises à subsidence) le nombre de nœuds de ce réseau. Une hypothèse envisageable serait alors de réaliser ce qui a déjà été proposé pour la Papouasie Nouvelle-Guinée avec le PNG94 et l'adoption d'un repère semi-dynamique (*Stanaway, Roberts, Blick, Crook, 2012 & Stanaway, 2008*). Il s'agirait de déterminer des positions précises dans l'ITRF et des vitesses de déplacement d'un réseau de stations permanentes, ainsi que le pôle d'Euler de la microplaque. L'analyse des séries temporelles des stations permettrait également d'établir un modèle des corrections à appliquer afin de

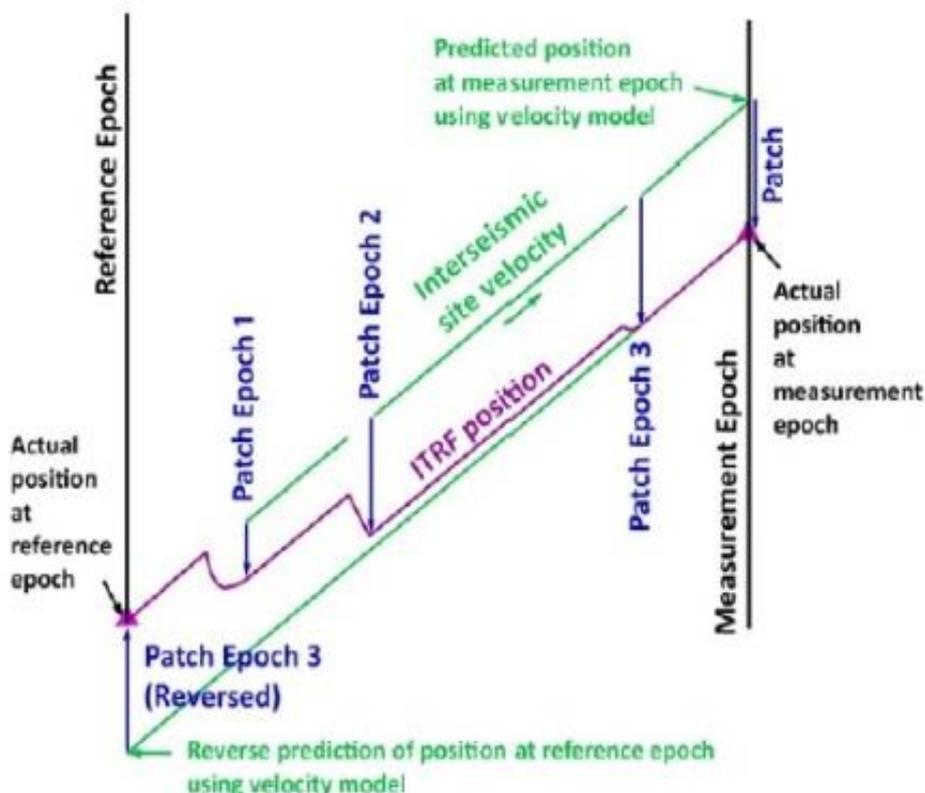


Figure 8 : principe d'application des modèles de déplacement co et post-séismique (source : [http://www.quickclose.com.au/ts02b\\_stanaway\\_roberts\\_et\\_al\\_5906.pdf](http://www.quickclose.com.au/ts02b_stanaway_roberts_et_al_5906.pdf))

compenser les déplacements co-séismiques et post-séismiques (figure 8).

## VI. Adaptation au cas général

Je souhaitais, en présentant le cas précédent, expliquer quels devaient être les paramètres à prendre en compte pour veiller à l'homogénéité des coordonnées au cours du temps. Pour cela, il faudra s'informer :

- de la genèse de la géodésie utilisée localement et de l'historique des paramètres de passage avec les systèmes de référence utilisés pour les mesures (en particulier, la réalisation du système de référence international ainsi que l'époque à laquelle ont été déterminés les paramètres d'Helmert)
- de la géophysique des lieux : à quel endroit se situe-t-on sur la plaque ? Cette zone peut-elle être considérée comme stable ou est-elle soumise à des séismes ? Des réponses à ces questions découleront le type de vitesse à utiliser, la nécessité ou non d'appliquer des modèles de déformation liés à des séismes importants
- du type d'opérations et des caractéristiques de la zone (off-shore, on-shore, near-shore) qui permettra de se faire une idée de la précision recherchée et donc des paramètres à prendre en compte pour se projeter dans la géodésie globale

Par chance, le cas du Myanmar énoncé ci-dessus est l'un des plus complexes que l'on puisse rencontrer ; la plupart du temps, il n'y aura pas besoin de modéliser l'impact des déformations sismiques. De même, dans la grande majorité des cas, les vitesses de déplacement applicables aux blocs d'exploitation pourront être obtenues soit à partir de modèles de champ de vitesse (issus de l'ITRF ou autre) soit directement en utilisant les vitesses de stations GNSS permanentes situées à proximité de la zone d'opération.

Nous présenterons dans la suite de ce chapitre les principaux cas susceptibles d'être rencontrés pour chacun des points ci-dessus.

### A. L'approche géodésique

Avant toute chose, je tiens à définir certains termes utilisés dans la suite de ce rapport :

- Les expressions « géodésie globale » ou « système global » feront référence à des systèmes de coordonnées applicables à l'échelle de la planète tels que l'ITRF ou le WGS84.
- Le terme « locale » définit la géodésie officielle d'un pays ; ainsi, le RGF93 est la géodésie locale de la France
- On parlera de « géodésie Total » lorsqu'aucun système de coordonnées officiel n'a été défini au niveau de la zone d'activité et que Total a par conséquent calculé sa propre géodésie par le biais d'une campagne de mesures
- Enfin, « interne » qualifiera la géodésie (officielle ou déterminée par les topographes de la société) utilisée dans un pays par le Groupe.

#### 1. Cas des pays possédant un réseau permanent de station

Cette pratique largement répandue dans les pays développés est en plein essor dans les pays émergents ; l'accès à des équipements de qualité à des coûts relativement attractifs permet aujourd'hui la mise en place de ce matériel dans des pays souhaitant favoriser l'investissement de capitaux

étrangers dans des projets d'envergure régionale voire nationale. Ces canevas satellitaires de précision centimétrique constituent l'avenir de la géodésie comme en témoigne le réseau que le continent Africain développe depuis plusieurs années : l'AFREF<sup>27</sup>.

Ces réseaux s'appuient généralement sur des canevas d'échelle continentale correspondant eux-mêmes à des densifications de l'ITRF. La géodésie officielle du pays est par conséquent homogène à l'une des réalisations de ce système de référence global à une époque donnée.

L'un des avantages réside dans la capacité à se rattacher facilement et rapidement à plusieurs stations dont les coordonnées sont calculées à l'aide de séries temporelles et mises à jour de façon régulière. Ainsi, de telles stations permanentes permettent de mesurer des phénomènes géophysiques tels que des tremblements de terre, des subsidences ou des phénomènes saisonniers. Dans la plupart des cas, des paramètres de transformation sont publiés entre la géodésie locale et le système global ce qui permet de passer aisément de l'un à l'autre. Dans l'hypothèse où Total travaille dans une géodésie interne qui n'est pas celle officielle, le datumshift peut être recalculé à moindres coûts avant chaque nouvelle opération afin de s'assurer qu'il n'y a pas eu de déformations à une échelle locale.

Dans ce type de configuration, compte-tenu de la précision attendue, le problème de la gestion des vitesses de déplacement des stations ne se pose pas si l'on travaille directement à partir des stations permanentes du réseau. Par contre, si le RTS ou un service SBAS est utilisé, il sera nécessaire (du moins pour quelques temps encore) de convertir les données depuis le système de référence global – utilisé pour la détermination des valeurs d'orbites et d'horloge – vers la géodésie utilisée en interne. Dans ce cas, il sera indispensable d'appliquer des vitesses de déplacement pour propager les données à l'époque de la réalisation du système local. Par ailleurs, en matière de travaux offshore, le positionnement dynamique peut poser problème compte-tenu de la difficulté à mettre en place un canevas local en statique rapide.

## **2. Cas des pays possédant une géodésie rattachée à l'ITRF**

Il s'agit là de systèmes définis lors de campagnes de mesures GNSS en mode statique rattachés à des stations ITRF alentours à l'époque centrale des observations. Il est par conséquent facile de se ramener ou de travailler dans cette géodésie. Il faudra, dans le cas de zones stables appliquer des vitesses fiables (nous verrons plus loin ce que cela signifie).

Lorsque la stabilité n'est pas avérée, il sera judicieux de se tenir informé des événements récents susceptibles d'avoir altéré les coordonnées de certains sites à proximité des régions de prospection ou d'exploitation. Dans l'hypothèse d'une géodésie interne différente de celle mise en place par le gouvernement local, une nouvelle détermination des paramètres de transformation entre les deux peut s'imposer.

## **3. Cas où la géodésie utilisée n'est pas rattachée à l'ITRF**

Nous traitons ici du cas particulier où la géodésie (officielle ou Total) déterminée par techniques terrestres n'a pas été rattachée à l'ITRF; il peut être assez fréquent qu'aucune transformation n'ait été calculée soit parce que la zone de prospection est trop isolée soit parce qu'il n'existe pas de transformation entre la géodésie officielle et l'ITRF. Si tel était le cas la meilleure solution à adopter serait de mettre en place une géodésie propre à Total basée sur l'ITRF : il s'agit de mettre en place un réseau de bornes solidement ancrées dans le sol et couvrant l'ensemble de la zone d'intérêt. Un

---

<sup>27</sup> African geodetic Reference Frame : système de référence Africain

ajustement de réseau réalisé à partir d'observations effectuées en mode statique (durée d'observation longue et redondance d'observation des lignes de bases) permet d'obtenir les coordonnées des différents nœuds du réseau géodésique. On pourra ensuite utiliser l'EGM08 comme modèle de géoïde afin de déduire des altitudes à partir des hauteurs ellipsoïdales obtenues par observation GPS.

On notera également que la détermination d'un nouveau datumshift est justifiée dans les cas où la géodésie initiale a été déterminée par méthode Transit ou en utilisant les mesures radio hyperboliques en raison de la faible précision de ces techniques en comparaison de celles actuellement disponibles.

## B. L'approche géophysique et géologique

Cette partie est d'une importance de tout premier ordre pour comprendre les phénomènes en jeux sur la zone. On peut penser que, sur une superficie de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres carrés, la déformation s'effectue de façon homogène ; dès lors, la déformation relative à l'intérieur d'un même bloc est négligée. La condition sine qua non à cette hypothèse est que le champ ne doit pas se trouver à cheval sur une faille active. Cette approximation est parfaitement valable puisque les recherches de réservoir à proximité de ces frontières de plaques ne se sont pas révélées satisfaisantes. De plus, la mise en production à proximité de ces structures morphologiques soulève de nombreux problèmes techniques relatifs à la construction et l'installation de plateformes et autres modules de production adaptés. De plus, l'hypothèse de déformation uniforme ne s'applique pas forcément dans le cas d'un pipeline de transport de matière première en direction de la terre puisque sur des grandes distances :

- Les déformations séculaires ne sont pas homogènes en coordonnées cartésiennes
- Le pipeline peut être à cheval sur plusieurs plaques
- Les déformations non-séculaires ne sont pas linéaires dans l'espace (ex : déformations co-séismiques)
- Les géodésies locales peuvent être différentes entre la plate-forme et l'atterrissage

A l'heure actuelle, les corridors d'installation de ces pipelines sont de l'ordre de quinze mètres avec des zones de restriction de cinq mètres à proximité des infrastructures et de l'entrée en terre. La précision après l'installation est pour sa part de cinq mètres à plus de deux kilomètres de la plateforme et de deux mètres et demi dans un rayon inférieur à cette distance.

Avant d'aller plus loin, il convient de définir le critère de stabilité abordé par la suite. Nous ne considérerons pas la définition géologique<sup>28</sup> à proprement parler : pour nous, une zone stable est une région dont les déplacements sont homogènes par rapport à la surface et ne présentent pas de discontinuités majeures. Ce critère est celui qui va nous permettre de déterminer si les déformations engendrées par les séismes sont suffisamment importantes pour qu'il faille en tenir compte dans la transformation des coordonnées comme cela a été proposé dans le cas du Myanmar. De plus, la stabilité est ce qui permet de déterminer si les modèles de vitesses globaux tels que ceux issus de l'ITRF peuvent être utilisés en toute confiance. Dans le cas d'une zone instable, il faudra éventuellement regarder si un modèle de vitesse a été établi pour la région considérée (comme par exemple en Californie). Si ce n'est

---

<sup>28</sup> Cas des points chauds qui sont des volcans qui ne bougent que très peu les uns par rapport aux autres. Ces hot-spot sont notamment utilisés pour quantifier la dérive des continents.

pas le cas, on privilégiera des vitesses de stations (ITRF, IGS ou autre) à proximité ou des modèles de vitesses récents basés sur de tels systèmes de référence.

### 1. Les zones considérées comme stables d'un point de vue tectonique

Les formations les plus stables qui existent sont les cratons : il s'agit de vastes entités géologiques situées au centre des plaques tectoniques rigides. Elles présentent une épaisseur de plusieurs dizaines de kilomètres (jusqu'à quarante). En dessous de cette croûte parfois vieille de plus d'un milliard d'années, la lithosphère plonge profondément dans le manteau ce qui lui confère sa grande stabilité. Les zones de plateaux et de croûtes lithosphériques continentales sont elles aussi relativement stable à l'exception de certaines régions à proximité d'un système orogène<sup>29</sup> ou de failles.

De manière non exhaustive, des zones reconnues comme ayant un déplacement homogène autour du pôle d'Euler de leurs plaques sont notamment l'ensemble de l'Afrique à l'exception de l'Atlas, du rift de l'Afrique de l'Ouest, de la péninsule arabique et de l'Afrique du Sud. Il y a également l'Australie, une grande partie de l'Europe et de l'Amérique du Nord (hormis la côte Ouest) ainsi que la moitié Est de l'Amérique du Sud.

En présence de telles structures géologiques et compte tenu des précisions recherchées, nous considérerons les modèles de vitesses de plaques comme de bonnes modélisations des déformations engendrées par la dynamique tectonique. Par conséquent, ces représentations mathématiques seront utilisées pour quantifier le déplacement annuel observable sur un bloc. Ces valeurs seront ensuite utilisées pour propager les coordonnées acquises à un instant  $t$  vers l'époque de référence. Malgré tout, il est fréquent que les phénomènes sismiques se traduisent par des déformations hétérogènes à une échelle locale ; ces zones à fortes contraintes sont abordées dans le paragraphe suivant.

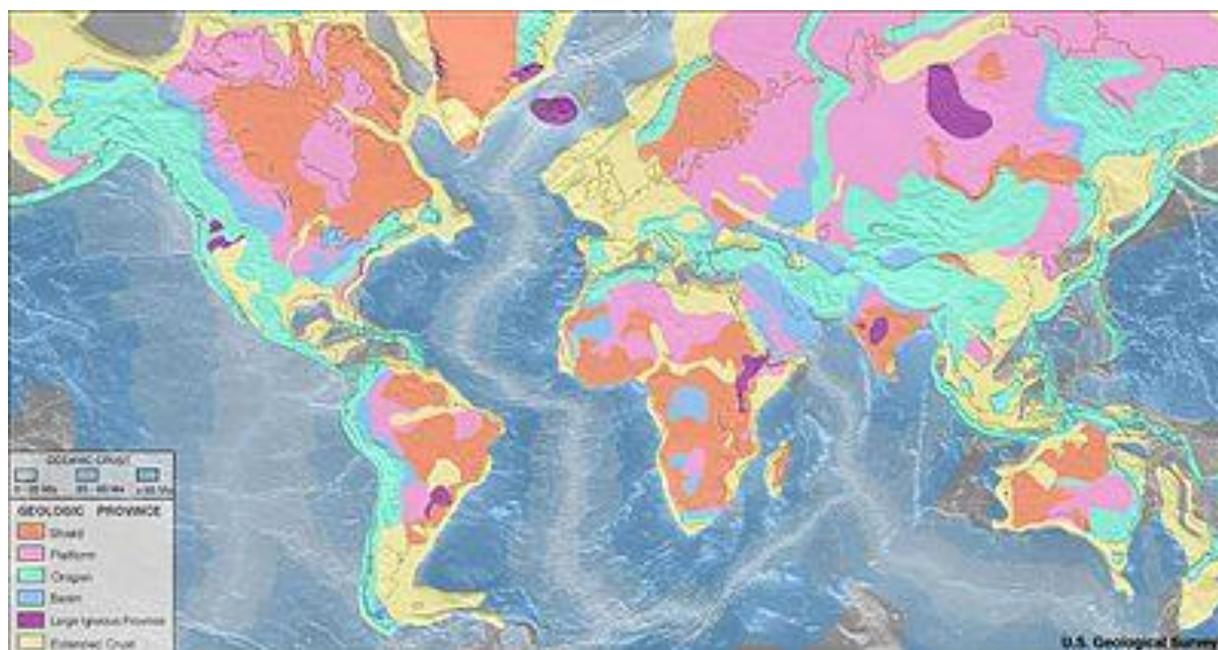


Figure 9 : carte géologique de la terre; les cratons apparaissent en orange, les zones de plateaux en rose et la croûte lithosphérique continentale en jaune ; les zones déformantes de la croûte terrestre sont en cyan tandis que celles en mer ne sont pas représentées (source USGS)

<sup>29</sup> Chaîne de montagne engendrée par la collision entre deux plaques continentales

## **2. Les formations instables d'un point de vue tectonique**

Les régions auxquelles il est fait référence dans ce chapitre correspondent aux frontières de plaques et aux structures qui les accompagnent (failles, chaînes de montagne, etc.). Par définition, elles sont soumises à un fort aléa sismique et présentent un comportement relativement ductile. Les déformations sur une même plaque ne sont ni séculaires ni homogènes. Parmi les principaux exemples que l'on peut citer, le Myanmar, la Papouasie Nouvelle Guinée, la Nouvelle-Zélande et les zones géologiquement très actives (faille de San Andreas, golfe du Mexique).

J'ai constaté que nombre de ces comportements ne sont pas intégrés dans les modèles de déplacement des plaques. Ces derniers n'intègrent que des plaques majeures considérées comme rigides. Or, ces dernières sont susceptibles d'être divisées en blocs de décrochement ductiles au niveau de leurs frontières. Ces déformations locales ne sont pas accessibles par ce type de modélisation. Par conséquent, il n'est pas possible, en l'absence de stations permanentes à proximité de déterminer des vitesses de déplacement sur la zone considérée en se basant uniquement sur ces modèles globaux de tectonique des plaques. Nous reviendrons par la suite sur les moyens de quantifier ces vitesses de déplacement.

## **C. Les besoins en fonction des activités**

Nous avons vu au cours du chapitre IV que les forages d'exploration et les acquisitions sismiques 2D et 3D n'étaient pas concernés par notre sujet puisque les précisions demandées sont de l'ordre de 3 mètres. En revanche, dans le cadre du positionnement des installations sous-marines en offshore profond, des projets de construction, ces déplacements doivent être pris en compte.

### **1. L'offshore non conventionnel : positionnement des installations**

Comme énoncé précédemment, le positionnement est réalisé à partir d'un réseau de balises LBL dont les supports sont disposés sur le plancher océanique. Le développement d'un champ se fait par phases successives. Le rattachement à la géodésie locale est réalisé à l'aide d'un bateau positionné dynamiquement et équipé d'une perche USBL. Le navire effectue alors des mesures de distance avec le récepteur positionné au fond en tournant autour de ce dernier avec un rayon d'autant plus grand que la profondeur augmente ; on parle de « box-in ». L'intersection de ces distances, couplée à un positionnement du vaisseau à la surface à l'aide des techniques DGNSS ou PPP permettent d'obtenir une précision absolue estimée entre 30 et 50 cm pour chaque point ainsi calculé.

Dans l'hypothèse où une seconde phase de développement est prévue sur une zone suffisamment importante, le box-in de certains nouveaux points du réseau peut être nécessaire. Plutôt que de réaliser une nouvelle compensation de l'ensemble du réseau à partir de nouvelles mesures à l'époque d'extension, il est préférable de propager les résultats des nouveaux rattachements à l'époque à laquelle la première partie a été ajustée. De cette façon toute déformation du réseau engendrée par un repère dynamique en surface (l'ITRF) et une géodésie fixe au niveau du fonds marin est fortement atténuée.

Cette situation est également applicable lorsque l'on souhaite connecter deux réseaux de balises de 2 champs différents disposés à des époques et des réalisations différentes de l'ITRF. De plus, une

nouvelle directive est en cours de rédaction afin d'ausculter le walking et le bulking<sup>30</sup> des pipelines ; l'objectif est de mesurer le déplacement des lignes sous la contrainte afin de s'assurer que l'intégrité du tube n'est pas altérée. Pour cela une campagne de mesure avec une précision de l'ordre de 50 cm en absolu est nécessaire. Une telle précision par plusieurs centaines de mètres de fond impose la mobilisation d'un ROV<sup>31</sup> équipé pour utiliser le LBL. Dans le cas où le pipeline à ausculter ne peut pas être entièrement couvert par un réseau de supports permanents on utilisera le Sparse LBL<sup>32</sup>. Cette technique nécessite uniquement l'ajout de quelques supports temporaires le long de la zone d'acquisition. Ils permettront de compenser la dérive du positionnement inertielle à l'aide de l'observation d'un seul transpondeur. Afin d'éviter toute incohérence dans les mesures, les coordonnées des transpondeurs utilisés le long du pipeline doivent être ramenées à l'époque à laquelle a été disposé le réseau initial.

## 2. Les programmes de construction off-shore

En offshore conventionnel, sauf cas particulier, seul le réseau de pipeline est sous-marin. Les équipements de surface sont pré-assemblés lors de la construction à terre ; les unités de production ainsi obtenues sont ensuite installées sur les jackets<sup>33</sup> préalablement enfoncés dans le sol. Compte-tenu des tolérances métriques d'installation, il peut être intéressant, plutôt que d'observer un nouveau réseau entre les différentes plateformes lors de chaque nouvelle installation, de propager les coordonnées du nouveau projet de la géodésie locale vers l'ITRF à l'époque d'installation prévue.

Dans l'exemple précédemment, la filiale Total Exploration Production Myanmar souhaitait connecter une passerelle entre deux plateformes du champ de Yadana. La tolérance sur la longueur du pont était de un mètre. Les deux jackets ont été installés à différentes phases du développement du champ dans des ITRF différents. Les coordonnées ayant été directement transformées dans la géodésie locale sans avoir été préalablement propagées dans l'ITRF à l'époque de détermination des paramètres de transformation, il s'est avéré que le pont tel que prévu par le projet était trop court de 1,30 mètres.

## 3. La sismique 4D

L'un des coûts importants de cette opération en matière de temps de calcul est la recherche de la corrélation entre les images obtenues par deux sismiques 3D réalisées à quelques années d'intervalle. Pour caractériser l'écoulement des fluides dans les réservoirs, il est nécessaire de faire se superposer les images le plus précisément possible. La limite actuelle est la capacité à maintenir un positionnement fiable des streamer (câbles sur lesquels sont fixés les appareils d'acquisition de données). Afin de pallier ce problème et pour diminuer le bruit de mesure, des capteurs (constitués chacun de 3 géophones et d'un hydrophone) sont de plus en plus souvent positionnés sur le fond marin (avec toutefois un bin supérieur). Dès lors, la principale contrainte dans la superposition des images devient celle de la précision des coordonnées des capteurs. S'ils restent en place, le problème peut se poser lorsqu'un des capteurs est défaillant et qu'il est nécessaire de le changer. Dans ce cas, il sera important de repositionner le capteur aussi précisément que possible au niveau de la position qu'il occupait ; il faudra par conséquent tenir compte de l'évolution des coordonnées en présence d'une zone à forte vitesse de

---

<sup>30</sup> Walking et bulking : respectivement : déport longitudinal et vertical d'un pipeline sous l'effet de la pression et de la température du fluide qui le parcourt ; on parle aussi de flambage. Ce phénomène, s'il est trop important peut provoquer la rupture de la canalisation avec les conséquences écologiques et financières que cela suppose.

<sup>31</sup> Remote utility vessel : submersible télécommandé depuis la surface

<sup>32</sup> Sparse LBL : méthode de positionnement LBL couplé à un positionnement inertiel (aux extrémités, le LBL permet un rattachement précis au réseau sous-marin, le long du tube, il permet de corriger la dérive de la centrale inertielle)

<sup>33</sup> Tripodes ou quadripodes destinés à accueillir les unités de production.

déplacement (Australie par exemple où en l'espace de 5 ans par exemple, un point se déplace de près de 30 cm)

Ce chapitre avait pour objectif de définir l'approche à mener dans l'utilisation de paramètres de transformation entre des mesures acquises à un instant  $t$  et leurs propagations vers la géodésie interne qui constitue le repère de travail des équipes de Total. Nous allons désormais nous intéresser à la transformation entre des coordonnées dans différentes réalisations de l'ITRF à différentes époques puis à la propagation de ces données vers une géodésie locale.

## VII. Proposition d'amélioration et apport potentiels

A l'issue de 6 mois passés à me documenter sur ce sujet, à traiter des cas concrets et à échanger avec des collègues et des sous-traitants, il me semble que les améliorations s'articulent selon 3 axes :

- La fiche géodésique
- Le choix de la transformation à adopter et des vitesses à appliquer si nécessaire
- L'aide à la transformation en cas d'application de vitesses

### A. Evolutions potentielles de la fiche géodésique

Dans le cadre de ses activités, Total édite une feuille géodésique pour chaque zone où le groupe est mandaté en tant qu'opérateur. L'élaboration, la maintenance et la diffusion de ces documents est de la responsabilité du service TTP. Le lecteur, afin qu'il puisse se figurer ce qu'est une fiche géodésique utilisée par Total ainsi que les informations qu'elle contient pourra se reporter à celles attachées en *Annexe 3*.

Avant toute chose, remarquons que sauf nécessité absolue, une fois que les opérations ont débuté, il est préférable de conserver le même système de coordonnées appliqué en interne. En effet, utiliser une nouvelle géodésie interne nécessite de transformer toutes les bases de données dans le nouveau système ce qui est lourd, coûteux et potentiellement source d'erreur. Les paramètres initiaux sont par conséquent conservés.

#### 1. Epoque et ITRF associés à une géodésie locale basée sur un système global

La première attitude qui avait été adoptée avant le début de mon stage concerne le cas où la géodésie officielle du pays s'appuie sur un ITRF à une époque donnée. Sous cette hypothèse, il est nécessaire de faire apparaître le système global et la période à laquelle la géodésie locale se rapporte.

On notera toutefois qu'il est nécessaire de contrôler ce type de géodésie lors de la première opération après la refonte du système de référence national. La vérification consiste à mesurer un point connu en coordonnées locales en le rattachant au système global. David SIMON a en effet rencontré un problème au Vietnam où le VN-2000 est annoncé par le gouvernement comme s'appuyant sur l'ITRF. Suite à un écart important entre le système global et la géodésie officielle et après de longues recherches de sa part, il s'est avéré que les autorités avaient, pour des raisons de sécurité, appliqué en

toute discrétion une translation à leur géodésie. Dans ce type de situation, il est nécessaire de recalculer des paramètres de transformation en interne et de les faire figurer sur la fiche géodésique.

Par ailleurs, dans ce cas précis, les autorités locales imposent souvent aux entreprises qui exercent sur leur territoire d'utiliser le système de référence légal du pays. Il faut par conséquent calculer des paramètres de transformation précis avec les anciennes géodésies utilisées. Cela nécessite d'utiliser les similitudes à 14 paramètres fournies par le LAREG afin de passer de l'ITRF de mesure à celui de référence ; de même, des vitesses de déplacement doivent être utilisées pour propager les coordonnées de l'époque de mesure à celle associée à la détermination des paramètres de passage vers la géodésie interne.

## 2. Epoque et ITRF associés à une transformation

Lorsque j'ai adapté la macro générale de transformation de coordonnées à chaque fiche géodésique, j'ai été amené à m'intéresser à chaque géodésie utilisée par Total ainsi qu'aux systèmes de référence globaux qui leurs sont associés. J'ai constaté que de nombreuses fiches géodésiques ne font pas apparaître la réalisation ITRF et parfois même l'époque à laquelle la géodésie interne est rattachée. Ceci est préjudiciable puisque cela interdit toute transformation fiable de données actuelles dans la géodésie locale. En effet, la plupart des techniciens ne sont pas familiers avec les systèmes de coordonnées et de positionnement, et pour des raisons de simplicité, l'ITRF est souvent associé au WGS84. S'il est aujourd'hui largement admis que le WGS84 est équivalent à l'ITRF à 10 cm près (certains annoncent même 1 cm), cela n'a pas toujours été le cas puisque l'ITRF90 et le WGS84 (Doppler) présentaient des écarts supérieurs au mètre.

Désormais, la communauté des topographes travaille principalement dans le système de référence international. Il présente plusieurs avantages par rapport au repère associé au système GPS américain :

- L'aspect public facilite la diffusion des données (coordonnées des stations, précision du rattachement pour les sites multi-techniques, champs de vitesses, etc.) ce qui autorise un grand nombre de recherches et donc de publications dans des revues scientifiques.
- Les observations des stations associées à l'ITRF sont facilement récupérables sur les sites dédiés (principalement celui de l'IGS pour les topographes : orbites précises ou semi-précises, séries temporelles, etc.).
- Ce système de référence, parce qu'il est celui de la communauté scientifique, contribue grandement à l'amélioration de la modélisation de la Terre et de ses déformations.

Les réseaux permanents d'envergure continentale ou régionale sont principalement des densifications de l'ITRF et au sein de Total, la plupart des géodésies utilisées sont rattachées à ce réseau de référence. Malgré tout, il peut arriver que des paramètres de transformation déterminés avant les années 2000 soient associés au WGS84 ; on rencontrera généralement dans ce cas la notation « *From nom\_de\_la\_géodésie\_interne to WGS84* ». Une autre situation fréquente est celle où seule la mention « *From nom\_de\_la\_géodésie\_interne to WGS84-ITRF* » est spécifiée sur la feuille géodésique sans aucune indication quant à la réalisation utilisée. L'exemple du datum shift entre l'ITRF et le CAMACUPA (la géodésie Angolaise) (*figure 10*) en est un parfait exemple :

### 3 - DATUM SHIFT - From CAMACUPA VUMBATUMBA to ITRF (WGS 84)

Delta X = - 50.9 m (negative) TOTAL code : CAM  
Delta Y = - 347.6 m (negative) EPSG code : 1327  
Delta Z = - 231.0 m (negative)  
Datum shift parameters calculated by TOPNAV / ELF on platform PAL-F2 during november 1994,  
using DORIS system.

Figure 10 : datum shift tel qu'il apparait sur la fiche géodésique des blocks Angolais 31, 32 et 33

Nous disposons dans ce cas présent de l'époque (novembre 1994) mais la réalisation n'est pas précisée.

#### a) Recherche de la réalisation de l'ITRF et de l'époque de détermination des paramètres d'Helmert

Lorsqu'il n'est pas fait état de l'ITRF et/ou de l'époque associés à la transformation vers la géodésie locale, la première attitude à avoir est de rechercher dans les rapports la réalisation dans laquelle les mesures ont été rattachées. Dans la plupart des cas, je suis parvenu à minima à retrouver la date (lorsqu'elle n'apparaissait pas déjà sur la feuille géodésique). Dès lors, deux situations se présentent:

- Soit la réalisation ITRF associée à la transformation a été retrouvée (c'est le cas de l'Angola et du Congo notamment). Dans ce cas, le problème est résolu et il suffit simplement de le rajouter sur la fiche.
- Soit je ne suis pas parvenu à définir clairement s'il s'agissait du WGS84 ou d'une réalisation de l'ITRS. Sous cette hypothèse, il est nécessaire de trouver un repère global auquel se ramener.

En aparté, on notera que lorsque des datum shift ont été calculés sur des champs où Total n'a pas encore d'activité, la politique du service topographique est d'autoriser l'application d'anciens paramètres (généralement d'une précision décimétrique) pour les phases d'explorations uniquement et d'effectuer un nouveau calcul dans l'hypothèse où une mise en production serait décidée. C'est le cas d'Abu Dhabi (Figure 11) où Total n'exerce pas sur le champ en tant qu'opérateur et réserve les paramètres fournis aux seules missions d'exploration ; une transformation plus précise sera déterminée si nécessaire dans le futur.

---

### 3 – DATUM SHIFT (position Vector method)

From Nahrwan 1967 UAE to WGS 84 : TOTAL code : NHK to W84  
Source US Defense Mapping Agency 1987

Delta X = minus - 249 m EPSG Code : 1191  
Delta Y = minus - 156 m  
Delta Z = plus 381 m

From Nahrwan 1967 ADCO to WGS 84 : TOTAL code : NHD to W84  
Parameters calculated by GEOID from dual frequency GPS data recorded  
by Halliburton Geophysical Services Inc April – Nov 1990, used by ADCO

Delta X = minus - 233.40 m      Rot X = 0.0 second  
Delta Y = minus - 160.70 m      Rot Y = 0.0 second  
Delta Z = plus 381.50 m      Rot Z = minus - 0.554 second  
Delta scale = 0.2263 ppm

Figure 11 : paramètres de transformation sur le champ Abu Al Bukhoosh; le premier fourni par l'US defense Mapping Agency n'est pas meilleur que 44 mètre et le second ne précise aucun ITRF ni réalisation du WGS84

### b) *Cas associés aux notations WGS84/ITRF :*

Dans l'hypothèse où il m'a été impossible de retrouver l'ITRF associé à la transformation, en utilisant la date d'observation des points utilisés pour calculer les paramètres d'Helmert, j'ai réussi à retrouver la réalisation WGS84 concernée. Dès lors, il m'a été facile de retrouver l'ITRF et l'époque utilisés pour contraindre le système de référence américain. Le *tableau 8* dresse un bilan de l'historique du WGS84. On notera qu'avant l'entrée en service du WGS84<sup>34</sup> en février 1987 le WGS72 était utilisé. Ce dernier était le système de référence lié au développement de la constellation GPS jusqu'à l'entrée en service du WGS84 ; il est resté le repère associé au système Transit jusqu'en janvier 1989.

#### Réalisations WGS84

Période	Réalisation	ITRF associé
Avant le 29 juin 1994	WGS84(Doppler)	Paramètres de transformation disponibles avec l'ITRF90 sur le site du Lareg
A partir du 29 juin 1994	WGS84(G730)	Aligné sur l'ITRF92 époque 1994.0
A partir du 29 janvier 1997	WGS84(G873)	Aligné sur l'ITRF96 époque 1997.0
A partir du 20 janvier 2002	WGS84(G1150)	Aligné sur ITRF2000 époque 2001.0
Depuis le 8 février 2008	WGS84(G1674)	Aligné sur l'ITRF2008 époque 2005.0

**Tableau 8:** réalisations du WGS84 depuis 1987. Le nom de la réalisation correspond à la semaine GPS des dernières données utilisées.

Une solution qu'il me semble judicieux d'adopter est de faire figurer la réalisation WGS84 en service lors de la détermination des paramètres de transformation lorsque aucune autre information n'est accessible. De cette façon, il est possible de se rattacher à un ITRF – en particulier, celui utilisé pour aligner la réalisation du système de référence américain (*tableau 8*) – à partir de données WGS84. Il est clair que ce n'est pas la méthode la plus rigoureuse ; malgré tout, elle permet de ramener des données actuelles à une réalisation de l'ITRS et une époque connue. De plus, je tiens à souligner qu'afin de conserver l'alignement avec le repère international de l'IERS, le WGS84 est un système dynamique depuis sa réalisation G1150. Cela ne remet toutefois pas en question les propositions faites dans ce chapitre puisque les cas où il n'est pas fait mention de la réalisation ITRF utilisée pour rattacher la géodésie locale sont essentiellement rencontrés avant le début des années 2000.

### c) *Cas particulier d'une transformation avec une géodésie basée sur une densification de l'ITRF (régionale ou continentale)*

Il s'agit de pays pour lesquels la géodésie locale s'appuie sur un repère de référence d'échelle continentale associé à l'ITRF. Cela concerne principalement les pays d'Europe (avec l'ETRS89) ainsi que les nations Sud-Américaines dont les réseaux géodésiques officiels sont des densifications du SIRGAS95 —le système de référence continental.

En présence de telles configurations, il est indispensable de s'assurer de la réalisation de la géodésie locale et de l'ITRF associé au réseau continental. Il sera alors nécessaire de rechercher les paramètres de transformation entre les différentes réalisations continentales et celles globales afin de se repositionner dans la géodésie officielle de manière rigoureuse.

<sup>34</sup> La littérature spécialisée fait référence à cette première réalisation du WGS84 par les termes « Original », « Transit » ou « Doppler »

### 3. Autres remarques

Cette proposition est quelque peu en dehors des limites de mon sujet ; nonobstant, il m'a paru intéressant d'émettre cette remarque. Sur chaque fiche géodésique figure un exemple de transformation entre les différents systèmes de coordonnées (Figure 12).

Ces applications numériques mettent en lumière les transformations entre les différents systèmes et constituent un moyen de contrôle du paramétrage des logiciels des sous-traitants. Toutefois, le fait que les paramètres de passage soient fournis en coordonnées cartésiennes peut prêter à confusion avec les coordonnées planes pour des personnes peu familières avec les différents systèmes de coordonnées. Pour plus de clarté, il serait judicieux de faire figurer également les coordonnées X,Y,Z dans cet exemple afin que les non-techniciens comprennent sur quelles coordonnées s'appliquent les paramètres d'Helmert. L'ambiguïté est particulièrement présente dans le cas où seules des translations nécessitent d'être appliquées pour passer d'un système à un autre : selon Christian AMEIL, il n'est pas rare que des personnes non-averties appliquent ces valeurs directement aux coordonnées planes ce qui engendre des erreurs considérables.

#### 4 - EXAMPLE OF TRANSFORMATION

	Datum CAMACUPA VUMBATUMBA <i>TOTAL code : CAM</i>	Datum WGS 84 <i>TOTAL code : W84</i>
Latitude	7° 30' 00.000" S	7° 30' 05.013" S
Longitude	11° 00' 00.000" E	10° 59' 49.188" E
Height above spheroid	0 m	21.08 m
Easting TM deep offshore	389 663.23	389 334.22
Northing TM deep offshore	9 170 927.31	9 170 696.86

Figure 12: exemple de transformation entre les géodésies applicables aux blocs 31, 32 et 33 en Angola

### B. Choix des vitesses applicables

Une fois que l'on sait dans quelle réalisation et à quelle époque on doit se positionner pour transformer des coordonnées vers une géodésie interne, il est nécessaire de déterminer si les déformations de la croûte terrestre (séculaires ou ponctuelles) ainsi que leurs amplitudes nécessitent de prendre en compte des vitesses de déplacement et/ou des modèles de déformation. Nous avons vu tout au long du développement que différents facteurs devaient être considérés pour définir un cadre de traitement de la donnée géographique.

Mon idée est de créer un Système d'Information Géographique afin de faciliter la prise de décision des topographes de Total quant à l'attitude à adopter dans le cadre des travaux pour lesquels ils sont mandatés. Pour cela, la personne doit connaître :

- Les caractéristiques de la zone concernée : champ à terre, à proximité des côtes ou au large
- L'activité considérée (acquisition sismique, forage, construction ou installation) ainsi que la précision de positionnement nécessaire et l'emprise des travaux à mener
- La dynamique crustale à proximité du champ : zone sismique, plaque(s) tectonique(s) attachée(s) au champ considéré ainsi qu'aux infrastructures auxquelles il est connecté (pipeline de transport de matière première en direction de centre de traitement ou de distribution notamment).

- Les modèles de vitesses applicables
- La capacité à se rattacher à un système de référence global à proximité ou du moins la possibilité d'utiliser les vitesses de stations d'un tel réseau
- Évènements tectoniques récents susceptibles d'avoir engendré une déformation locale à proximité de la région considérée.

À titre d'exemple, le pipeline Nabucco construit pour diminuer la dépendance de l'Europe envers le gaz russe, relie la Turquie à l'Autriche. Comment ne pas considérer, pour cette structure longue de plus de 1300 km, les hétérogénéités des différentes zones traversées ainsi que les sources potentielles de déformations susceptibles d'altérer l'intégrité de cet édifice ?

## 1. Les données insérées

Le logiciel utilisé ici est Arcgis 10.0 proposé par la société ESRI. Les langages de programmation orienté objet associés à cette suite sont le VBA et le Python. Ne maîtrisant pas ce dernier et puisqu'il s'agit avant tout d'illustrer d'éventuels accessoires en matière de positionnement, je n'ai rédigé que du code Visual Basic.

### a) Sources facilement accessibles :

J'ai utilisé la base de données IHS qui répertorie l'ensemble des gisements de gaz et de pétrole à travers le monde. Cette table est d'une grande simplicité d'accès (elle est directement accessible sur le réseau interne) et d'utilisation. Les fonds de cartes proviennent également de l'espace en ligne de Total. Les données relatives aux plaques tectoniques et aux failles sont issues d'une carte obtenue sur le serveur en ligne d'ESRI.

### b) Ajout des séismes

Nous avons vu dans les paragraphes précédents qu'il était important, pour assurer un positionnement fiable de tenir compte de l'impact potentiel des séismes. L'organisme américain de monitoring géologique (USGS ; <http://earthquake.usgs.gov/>) constitue la référence en matière d'étude et de suivi de l'activité sismique. L'agence propose sur son site Internet une liste téléchargeable des séismes récents. Deux possibilités sont envisageables dans notre cas :

- les flux Géo-RSS correspondant aux flux RSS envoyés sur nos téléphones portables à la différence qu'ils intègrent une composante de Géo-référencement (latitude et longitude en WGS84) et sont par conséquent intégrables dans Arcmap
- une liste des séismes sous forme d'une table au format « .csv »

En dépit des qualités apparentes de la première solution, elle s'avère peu robuste pour des applications en réseau et Total n'autorise plus l'accès à l'application nécessaire à l'insertion des données dans le document. J'ai donc choisi de télécharger les données des séismes sous forme de tableur.

Différents fichiers sont téléchargeables (des dernières heures à un mois et en fonction de l'intensité des séismes). Etant donné les magnitudes qui nous intéressent et le fait que cette application ne servira peut-être pas tous les jours, j'ai choisi de récupérer le fichier contenant les séismes d'une magnitude supérieure à 4.5 survenus dans les 30 derniers jours.

La macro réalisée effectue lors de son lancement le téléchargement du fichier sur le site de l'USGS, le nettoyage et la classification des données. Ces résultats sont ensuite automatiquement intégrés dans la base de données connectée à Arcmap ; les nouveaux séismes survenus sont par conséquent directement chargés dans notre carte lors du lancement du logiciel.

### c) *Ajout des stations IGS*

Fort de la macro décrite ci-dessus, j'ai essayé d'automatiser le même processus afin d'obtenir une liste des stations IGS actives et de leurs coordonnées. Mon idée est d'optimiser le rattachement d'une campagne de mesure à des stations IGS connues et fiables. Pour cela, il faut s'assurer que la station n'a pas été affectée dernièrement par un séisme et que ses coordonnées ne sont pas susceptibles de subir des déformations pré et post-sismiques (à proximité des frontières de plaques tectoniques). En effet, les modélisations des déformations impactant un réseau de stations permanentes sont encore méconnus et ne sont pour le moment pas intégrés dans les coordonnées ITRF [on notera qu'une thèse proposée en 2011 par Zuheir ALATAMIMI et Olivier JAMET est en cours]. Son sujet a pour but d'énoncer les principes qui permettront d'obtenir « la position réelle d'un point exprimée dans l'ITRF observée à un instant t »].

Malheureusement, je ne suis pas parvenu à récupérer des données suffisamment propres pour qu'elles soient exploitables. Le site de l'IGS (<http://igsceb.jpl.nasa.gov/network/list.html>) propose une liste des stations. L'analyse du code source de cette adresse Web montre que ces données sont obtenues à partir de liens pointant vers les sites internet de chaque station qui eux-mêmes, nécessitent une redirection vers un serveur ftp afin d'obtenir les coordonnées de chaque point. J'ai par conséquent directement copié cette liste dans Excel avant de la traiter à l'aide d'une macro basique. Une fois enregistrée au bon format, les données de cette table ont été intégrées dans Arcmap de la même façon que dans le cas des séismes.

## 2. Perspectives d'amélioration

Compte tenu du peu de temps qu'il me reste avant la fin de mon stage et de mes connaissances actuelles du langage de programmation internet HTML, l'objectif était de proposer quelques pistes de travail au département TTP.

Toutefois, je pense qu'avec plus de temps ou en mandatant le service SIG de Total, il est possible d'automatiser le processus de téléchargement des stations IGS et de leurs coordonnées.

De plus, il est possible d'ajouter une base de données contenant les coordonnées du périmètre de chaque plaque ainsi que son pôle d'Euler (c'est-à-dire son pôle de rotation sous une condition de Tisserand). En effet, il suffit d'intégrer l'algorithme suivant :

- Les coordonnées des pôles sont généralement données par leurs longitudes, leurs latitudes et la vitesse de rotation de la plaque en degrés par million d'années.
- Les coordonnées cartésiennes du vecteur de rotation exprimées en fonctions des paramètres précédents sont :

$$\begin{aligned}\omega_x &= \Omega * \cos(\varphi) * \cos(\lambda) \\ \omega_y &= \Omega * \cos(\varphi) * \sin(\lambda) \\ \omega_z &= \Omega \sin(\varphi)\end{aligned}$$

- Le déplacement annuel (autrement dit la vitesse) est ensuite obtenu en appliquant la formule :

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} X_{pt} \\ Y_{pt} \\ Z_{pt} \end{bmatrix}$$

L'intégration d'un tel algorithme permettrait de calculer directement les vitesses à utiliser dans la macro sans avoir besoin de la connexion internet nécessaire à l'utilisation du site tel que décrit dans l'annexe 4.

Néanmoins, ces modèles sont dédiés à des plaques rigides; il faut donc être conscient de l'erreur potentielle faite lorsqu'un tel outil mathématique est appliqué à des plaques ductiles ou pour des points situés en limite de plaque.

Malgré tout, le SIG tel qu'il est à l'heure actuelle permet de se rendre compte de la dynamique géologique de la zone d'intérêt et donne une idée des vitesses applicables. À titre d'exemple, à proximité d'une station IGS non affectée par des déplacements sismiques, on pourra adopter pour le champ considéré, la vitesse de déplacement de cette station.

La suite logique à cette carte d'aide à la décision est la transformation des coordonnées ITRF vers la géodésie locale. C'est l'objet du chapitre suivant dédié à la macro de changement de coordonnées.

## C. Calculs de transformations

Nous avons vu que le modèle d'équation pour passer d'un ITRF à un autre nécessite le recours à 14 paramètres ainsi que des vitesses de déplacement de la surface terrestre. De plus, il faut ensuite propager les coordonnées obtenues dans la géodésie locale en utilisant des transformations à 3, 5 ou 7 paramètres selon les cas. J'ai constaté qu'il existe des sites Internet (EPN, site canadien) qui proposent de transformer des coordonnées d'un ITRF vers d'autre système de coordonnées (ETRS, NAD83). Toutefois, aucun ne propose la possibilité de calculer des coordonnées dans entre deux ITRF. De même, il n'est pas possible de propager des coordonnées d'un ITRF vers une géodésie locale en insérant ses propres paramètres de transformation. Par ailleurs, aucune indication quant à l'application de vitesses de déplacement de plaques tectoniques n'est spécifiée et l'utilisateur ne sait pas quel modèle est utilisé.

Partant de ce constat, j'ai souhaité développer une application facile d'utilisation et minimisant les sources d'erreurs potentielles en entrée (fautes de frappe, mauvais paramètres de transformation, etc.). Mon objectif était de réaliser un outil utilisable n'importe où et par l'ensemble des membres de l'équipe de topographie. La première condition est liée aux contraintes de travail : une connexion Internet n'est pas toujours disponible et, en période d'itinérance, les utilisateurs n'ont accès qu'aux logiciels présents sur leurs ordinateurs portables. De ce fait, il résultait que le seul logiciel utilisable était Excel et son langage de programmation associé le VBA. La seconde contrainte réside dans la facilité d'utilisation : je souhaitais un outil qui puisse être utilisé rapidement et facilement en insérant uniquement les coordonnées et en paramétrant l'application à l'aide des données fournies par la fiche géodésique.

De plus, nous souhaitons que la maintenance de cette macro ne puisse être faite que par les personnes autorisées – à savoir, l'équipe des topographes de TTP. J'ai décomposé le développement en 2 grandes étapes : tout d'abord la création d'une macro permettant de passer d'un ITRF à un autre quel que soit la combinaison souhaitée. Ensuite, la rédaction d'une procédure permettant, sur la même application, de passer d'un ITRF quelconque à la géodésie locale par le biais de l'ITRF de référence.

### 1. Les grandes étapes du développement de la macro initiale

La première chose à faire était d'obtenir l'ensemble des transformations entre les différentes réalisations du système global. Ceci a été réalisé à partir des paramètres publiés par Le Lareg sur son site (*Annexe 2*). De ces valeurs, il est possible de déterminer l'ensemble des combinaisons réalisables par simple différence à l'aide de la formule :

$$\text{paramètre}_{ITRF \text{ départ to ITRF arrivée}} = \text{paramètre}_{ITRF \text{ arrivée}} - \text{paramètre}_{ITRF \text{ départ}} \quad (17)$$

La transformation inverse est obtenue en changeant le signe de tous les paramètres.

La seconde étape consistait à empêcher la modification des données sensibles (valeurs de paramètres, époque de référence des paramètres, etc.) par un utilisateur lambda. Une procédure permet de verrouiller les feuilles sélectionnées et de ne les rendre modifiables que par l'intermédiaire d'une boîte de dialogue. Ainsi, seuls les détenteurs du mot-de-passe peuvent modifier les paramètres d'Helmert et les époques de détermination.

Ensuite, il fallait organiser les feuilles du classeur Excel. Il fût décidé de l'attribution suivante :

- la première feuille est dédiée à l'insertion des coordonnées à transformer. Sur les conseils de Frederic AUGER, lorsque l'utilisateur ne souhaite modifier qu'un seul point, cette étape, peut être réalisée directement à partir d'une boîte de dialogue. Nous verrons plus tard les problématiques que cela a engendré du point de vue de la programmation
- la seconde répertorie les résultats en faisant apparaître les coordonnées initiales, l'ITRF associé et l'époque de mesure ainsi que l'ITRF de destination et la géodésie locale la date à laquelle sont fournis les résultats
- la troisième concentre les paramètres d'Helmert liants les différents ITRF. Cette feuille nécessite une identification par mot de passe pour pouvoir être modifiée
- la quatrième est dédiée aux paramètres de la géodésie Total
- la cinquième répertorie les ellipsoïde et leurs paramètres associés aux différentes réalisations ITRF

Pour qu'une application de ce type soit utilisée, il est indispensable qu'elle prenne en considération les besoins de ses utilisateurs principaux. Par conséquent, alors que le programme ne traitait initialement que des coordonnées cartésiennes, j'ai intégré, sur les conseils d'Emilie BLANCART, les coordonnées géographiques – principal format de coordonnées utilisé en matière de positionnement. Une fois ces parties rédigées, il ne restait plus qu'à autoriser l'ajout des éléments de définitions d'une ou plusieurs géodésie(s) locale(s) pour que l'application soit complète.

Notons que la convention adoptée dans le cadre des transformations à 7 paramètres est celle de Bursa-Wolf comme cela est le cas dans la plupart des logiciels et des pays. Toutefois, pour des raisons historiques certains pays comme l'Australie utilisent la convention Reference Frame. Dans ce cas-là, il sera donc nécessaire de changer le signe des angles de rotation pour intégrer la transformation dans la macro.

Par ailleurs, la feuille dédiée aux résultats permet de créer un archivage de l'ensemble des points calculés puisqu'elle n'écrase pas les résultats déjà existants. Il est bien sûr possible de les filtrer et de les supprimer même si cela n'est pas conseillé. Dans un but de traçabilité, deux colonnes de la feuille des résultats permettent d'associer le nom de la personne à l'origine de la transformation ainsi que la date du calcul pour chaque point transformé.

La notice d'utilisation de cette macro est disponible en *Annexe 4* et nous reviendrons dans le chapitre suivant uniquement sur les principales difficultés rencontrées.

## 2. Difficultés dans la rédaction de l'application générale

Le premier élément chronophage réside dans la prise en main du langage de programmation dans son univers de travail. Une fois cette étape passée, les algorithmes étant relativement accessibles et faciles à intégrer par l'intermédiaire de fonctions, la seule vigilance à avoir est de veiller à :

- l'enchaînement des diverses fonctions et procédures ainsi que de leurs fréquentes imbrications en respectant la chronologie du déroulement de la macro
- la définition des variables au niveau adéquat et avec la visibilité nécessaire (variable globale, locale, etc.)
- la récupération de leurs valeurs et leur formatage puisqu'il s'agit de traiter à la fois des données issues de cellules de différentes feuilles ainsi que des paramètres rentrés manuellement par l'utilisateur dans des boîtes de dialogue
- la gestion des processus itératifs dans le cadre du traitement de plusieurs points
- la gestion des itérations nécessaires au passage de coordonnées cartésiennes à géographiques
- la gestion des ellipsoïdes et de leurs paramètres (en feuille 5 pour les ITRF) ainsi que des longitudes et latitudes exprimées en « degrés minutes secondes »

Enfin, l'intégration des géodésies locales supposait la gestion de leurs ellipsoïdes et de la date de détermination des paramètres de transformation.

En matière de formatage des données la principale difficulté réside dans la gestion de la décimale entre les cellules des classeurs (qui acceptent la virgule – équivalent au point du pad numérique – comme séparateur) et les données des boîtes de dialogue (qui acceptent également la virgule comme séparateur décimal mais dont le format texte empêche à priori d'utiliser la touche du clavier numérique – touche « la plus facile » d'accès mais assimilée à un point lors d'insertion de données dans une zone de saisie).

Pour plus d'informations, se référer à la notice figurant en *Annexe 4*.

## 3. Autres macros réalisées

L'application présentée ci-dessus ne travaille que dans un sens. J'ai par conséquent rédigé une macro permettant d'effectuer la transformation inverse, à savoir : de la géodésie locale vers un ITRF quelconque.

Les deux outils mentionnés ci-dessus ne sont pas spécifiques à un block et nécessitent donc une certaine connaissance des systèmes géodésiques et des transformations de coordonnées. L'application est par conséquent réservée à des topographes.

Je souhaitais que cette application puisse être utilisée par le plus grand nombre, il fallait donc limiter au maximum les choix des utilisateurs dans le paramétrage de la transformation. J'ai par conséquent dupliqué la macro initiale (transformation ITRF vers géodésie locale) pour chaque fiche géodésique en ne conservant que les paramètres nécessaires. Désormais, il suffit simplement d'insérer les données dans la première feuille, de rentrer la vitesse de déplacement et de sélectionner la date des observations et l'ITRF associé et de lancer le calcul. Il n'y a donc plus d'erreur possible sur la date et l'ITRF associé au datum shift vers la géodésie locale.

Cette opération m'a également permis de dresser une liste des fiches géodésiques qui pourraient être améliorées ainsi que la manière de procéder pour chacune d'elle (*cf VII/A*).

Cette partie avait pour objectif de présenter ce que j'ai apporté à mon service. Les fiches géodésiques ont été complétées lorsqu'il manquait des renseignements. J'ai également réalisé un outil permettant de s'informer facilement des déformations potentielles survenues à proximité d'un champ pétrolier. Enfin, j'ai développé diverses applications sous le logiciel Excel qui permettent d'effectuer des transformations de coordonnées ITRF soit vers un autre ITRF soit vers une géodésie locale. Cette dernière application est disponible pour chaque fiche géodésique ce qui représente environ 120 déclinaisons de cette macro.

## Conclusion

Le concept de transformation entre différentes réalisations ITRF et les raisons qui expliquent ce besoin demeuraient il y a encore quelques années, assez flou pour les professionnels de la topographie du secteur privé. Encore aujourd'hui, il est possible de pallier ce problème en utilisant des techniques de positionnement relatif permettant de se rattacher directement dans un système géodésique local considéré comme figé à l'époque de sa détermination. Malgré tout, ces types de transformation sont amenés à se généraliser en raison du besoin toujours plus grand des industriels de travailler avec des coordonnées plus précises, plus fiables et surtout, homogènes au cours du temps. Cette demande résulte principalement d'une démarche économique. Par exemple, un positionnement précis, fiable et stable dans le temps permet de limiter les surcoûts impliqués par des erreurs liées à un mauvais dimensionnement d'une pièce par les équipes projet et installation comme nous avons pu le voir dans l'exemple du Myanmar. De plus de telles données sont un premier gage de travailler dans des conditions de sécurité.

Les entreprises et notamment les pétroliers ont clairement intégré ce que pouvait apporter un positionnement de qualité comme en témoigne la prochaine réunion du groupe de travail de GEOMATIC COMMITTEE de L'OGP en charge du positionnement dont le thème portera sur « les transformations entre les systèmes globaux et les géodésies utilisées en internes » par les entreprises pétrolières. Ces questions vont devenir fondamentales avec le développement de techniques de positionnement absolu en temps réel en accès libre: en effet, les mesures effectuées par ces dernières sont réalisées à partir de réseaux globaux (ITRF ou réalisation IGS). Dès lors, se pose la question de la capacité à propager les coordonnées ITRF obtenues dans les géodésies utilisées en interne. Si ces techniques sont encore peu utilisées, elles risquent fort de le devenir et ce en raison d'un argument économique de poids : un seul récepteur et donc une seule équipe voire une seule personne sont nécessaires dans le cadre de ces méthodes de positionnement alors que dans le cas d'un positionnement relatif, un minimum de deux brigades est requis (une en charge de la base et l'autre du mobile).

Nous avons vu tout au long de ce sujet que les algorithmes de passage entre deux ITRF puis entre un ITRF et une géodésie locale étaient désormais clairement définis et Total possède maintenant un outil permettant de réaliser ce processus de manière simple et rapide avec en plus des sources d'erreur limitées. La contrainte qui demeure pour le moment est la détermination de la vitesse de déplacement de la zone concernée. L'industrie pétrolière ne recherche pas une précision centimétrique : les besoins ne se font pour le moment pas ressentir compte tenu des contraintes liées à l'incapacité à maintenir les appareils de levage parfaitement stables et immobiles. La précision escomptée ne sera de toute manière pas meilleure que celle de la géodésie locale utilisée par les pétroliers (de l'ordre de 2 à 3 centimètres) et que celle des paramètres de transformation entre le système local et une réalisation globale. A l'heure actuelle, la principale difficulté réside en la détermination de vitesses de plaque et des déplacements liés aux séismes fiable et suffisamment précise. Si les modèles globaux peuvent être appliqués dans le cadre de régions géologiquement stables, ce n'est plus le cas à proximité des zones à fortes contraintes. La mise en place de réseaux de stations permanentes à des échelles régionales ou continentales (comme le SIRGAS Systema de Referencia Geocentrico para la America do Sul ou le réseau mis en place par l'observatoire de Singapour au niveau du Myanmar) permettront la détermination de modèles régionaux de déformation (comme c'est déjà le cas en Amérique du Sud) intégrant mieux les déplacements locaux. De plus, l'analyse des séries temporelles permettra de quantifier rapidement le déplacement co-séismique après un

événement majeur et donc le décalage à appliquer pour conserver l'homogénéité des mesures post-séismiques avec les coordonnées utilisées avant le séisme. Le service topographique aura toute la responsabilité d'appliquer ou de faire figurer sur les feuilles géodésiques des vitesses fiables pour chaque zone ainsi que des corrections post-séismiques (dans le cas de régions instables).

Avant de terminer, même si ce n'est pas d'actualité aujourd'hui, il est probable que d'ici une dizaine d'année, la volonté des filiales de faciliter les échanges de données avec les pays concernés pousse le service topographique à travailler dans tous les cas dans les géodésies officielles des états. Le besoin se fera particulièrement sentir lorsque ces pays posséderont un système géodésique basé sur un réseau national de stations permanentes. Dès lors, le problème de transformations ITRF ne se posera que dans des cas particuliers. A titre d'exemple, une personne réalisant des observations en PPP libre (RTS) en France obtient à l'heure actuelle des coordonnées IGS08 qu'elle doit propager en RGF93 si elle souhaite travailler dans le système national légal. Cela nécessitera pour les entreprises et en particulier les pétroliers de transformer l'ensemble des bases de données géo-référencées dans la géodésie. Il s'agit là d'un processus coûteux et risqué puisque il faut être certain de ne laisser aucune base de données dans l'ancien système sans quoi les conséquences pourraient être très lourdes. Total a réalisé cette opération dans 2 pays et demeure prudent à l'idée de réitérer ce travail.

Enfin, je terminerai en signalant aussi bien au service topographique de Total qu'à mon professeur référent et à toute personne intéressée par ce sujet que je suis disposé à contribuer à de plus amples réflexions et recherches sur ce thème. Selon moi, il s'agit de l'un des sujets majeurs des entreprises internationales en matière de positionnement dans les deux décennies à venir et je serais heureux de partager mes acquis dans la limite du devoir de confidentialité qui me lie à l'entreprise pour laquelle je travaille actuellement et à celle (TOTAL) qui m'a accueilli pour réaliser ce travail de fin d'étude.

## Annexe 1 : Les évolutions dans la définition de l'ITRF

- Premier système de référence combinant les solutions de 4 techniques (VLBI, SLR/LLR, DORIS/TRANSIT (ancêtre du GPS) : BTS (BTS 84, 85, 86, 87)

### A) ITRF88 à ITRF93 :

- Origine et échelle : définies par une moyenne de certaines solutions SLR
- Orientation :
  - ITRF88 à ITRF92 : définie par alignements successifs sur les versions précédentes depuis le BTS 87 dont l'orientation a été alignée sur la série des EOPs du BIH
  - ITRF93 : à nouveau aligné sur les Eops de l'IERS (intégration du service du BIH au sein de l'IERS en 1988)
- Evolution temporelle en orientation :
  - ITRF88 et 89 : pas d'estimation du champ de vitesse ; modèle du mouvement des plaques tectoniques AMO-2 utilisé comme référence
  - ITRF91 à 93 : champs de vitesses combinés estimés.
    - i. ITRF91 : évolution temporelle fixée alignée au modèle NNR-Nuvel1 ;
    - ii. ITRF92 aligné au modèle NNR-Nuvel-1A ;
    - iii. ITRF93 aligné sur séries EOPS de l'IERS

### B) ITRF94 :

- Origine : déduite d'une moyenne pondérée de certaines solutions SLR et GPS
  - Echelle : déduite d'une moyenne pondérée de certaines solutions VLBI, SLR et GPS puis corrigée de  $0.7 \cdot 10^{-9}$  pour passer de l'échelle de temps TT (utilisé par les centres d'analyse) à l'échelle TCB adoptée par l'UAI
  - Orientation alignée sur celle de l'ITRF92
  - Evolution temporelle en orientation définie en alignant le champ de vitesses de l'ITRF94 au modèle NNR-Nuvel-1A, sur les 7 dérivées des paramètres de transformation
  - Première fois que les matrices de variance complètes des solutions individuelles sont utilisées dans l'ajustement combiné
  - Introduction pour la première fois des vitesses explicitement estimées des stations dans la solution finale de l'ITRF94
- ITRF96 aligné sur ITRF94 et ITRF97 aligné sur ITRF 96 (14 paramètres d'Helmert à 0 entre chaque ITRF)

### C) ITRF2000

- Origine : définie en fixant à zéro les translations entre ITRF2000 et une moyenne pondérée de 5 solutions SLR
- Echelle : définie en fixant à zéro l'échelle et sa dérivée entre ITRF 2000 et une moyenne pondérée de 5 solutions SLR et 3 solutions VLBI ; échelle de temps compatible avec TT (pour satisfaire les centres d'analyses ; tandis que ITRF97 était compatible avec TCG)

- Orientation : en alignant les angles de rotation sur ceux de l'ITRF97 à J1997.0 et leurs dérivées sur celles du modèle NNR-Nuvel-1A

#### D) ITRF2005

- Première réalisation générée à partir de séries temporelles de positions et d'EOPs
- 4 repères séculaires (un par technique) ont été calculés puis combinés pour estimer l'ITRF 2005 :
  - 1<sup>ère</sup> étape : générer pour chaque technique un repère muni de ses paramètres d'orientation de la Terre
  - 2<sup>ème</sup> étape : combinaison des repères obtenus pour en obtenir un seul ; on cherche à estimer par la combinaison :
    - i. Position et vitesse des stations
    - ii. Paramètres d'Helmert et leurs dérivées pour chaque technique (Nécessité d'ajouter des contraintes)
    - iii. On ajoute dans la combinaison et s'ils sont connus les rattachements entre les stations co-localisées d'un même site et (rattachement en position) ainsi qu'une contrainte d'égalité des vitesses (rattachement en vitesse) pour les stations d'un même site ; on ajoute également un facteur de pondération aux coordonnées de chaque technique afin d'obtenir une solution optimale
- Contraintes minimales permettant de définir l'ITRF2005 :
  - Origine : origine ITRF définie en fixant la translation entre repère séculaire SLR en entrée et le repère combiné ainsi que sa dérivée à zéro
  - Echelle : annulation du paramètre d'échelle (ainsi que sa dérivée) estimé entre repère séculaire VLBI en entrée et repère combiné en sortie

#### E) ITRF 2008

- Même principe que l'ITRF2005
- Contraintes minimales permettant de définir l'ITRF2008 :
  - Origine : origine ITRF définie en fixant la translation à l'époque 2005.0 et pas de vitesse de translation vis-à-vis des séries temporelles fournies par l'ILRS SLR
  - Echelle : annulation du paramètre d'échelle à l'époque 2005.0 (ainsi que sa dérivée) estimés par rapport à l'échelle moyenne et à sa dérivée temporelle par rapport aux séries temporelles VLBI et SLR
  - Orientation : ITRF2008 aligné sur ITRF2005 à l'époque 2005.0 et pas de vitesse de rotation entre ces deux ITRFs. Contraintes minimales appliquées sur 179 stations réparties sur 131 sites

## Annexe 2 : Paramètres de transformation entre l'ITRF2008 et les réalisations précédentes

Transformation parameters from ITRF2008 to past ITRFs.

SOLUTION	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	EPOCH
UNITS----->	mm	mm	mm	ppb	.001"	.001"	.001"	
	.	.	.	.	.	.	.	
RATES	Tx	Ty	Tz	D	Rx	Ry	Rz	
UNITS----->	mm/y	mm/y	mm/y	ppb/y	.001"/y	.001"/y	.001"/y	
ITRF2005	-2.0	-0.9	-4.7	0.94	0.00	0.00	0.00	2000.0
rates	0.3	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	
ITRF2000	-1.9	-1.7	-10.5	1.34	0.00	0.00	0.00	2000.0
rates	0.1	0.1	-1.8	0.08	0.00	0.00	0.00	
ITRF97	4.8	2.6	-33.2	2.92	0.00	0.00	0.06	2000.0
rates	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	
ITRF96	4.8	2.6	-33.2	2.92	0.00	0.00	0.06	2000.0
rates	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	
ITRF94	4.8	2.6	-33.2	2.92	0.00	0.00	0.06	2000.0
rates	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	
ITRF93	-24.0	2.4	-38.6	3.41	-1.71	-1.48	-0.30	2000.0
rates	-2.8	-0.1	-2.4	0.09	-0.11	-0.19	0.07	
ITRF92	12.8	4.6	-41.2	2.21	0.00	0.00	0.06	2000.0
rates	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	
ITRF91	24.8	18.6	-47.2	3.61	0.00	0.00	0.06	2000.0
rates	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	
ITRF90	22.8	14.6	-63.2	3.91	0.00	0.00	0.06	2000.0
rates	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	
ITRF89	27.8	38.6	-101.2	7.31	0.00	0.00	0.06	2000.0
rates	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	
ITRF88	22.8	2.6	-125.2	10.41	0.10	0.00	0.06	2000.0
rates	0.1	-0.5	-3.2	0.09	0.00	0.00	0.02	

Paramètres de transformations entre l'ITRF2008 et les réalisations antérieures ([http://itrf.ensg.ign.fr/doc\\_ITRF/Transfo-ITRF2008\\_ITRFs.txt](http://itrf.ensg.ign.fr/doc_ITRF/Transfo-ITRF2008_ITRFs.txt))

## Annexe 3 : Exemples de fiches géodésiques utilisées au sein de Total

### GEODETTIC SYSTEM IN CONGO offshore

#### 1 - OFFICIAL LOCAL DATUM

- Horizontal Datum name : Congo 1960 Pointe Noire TOTAL code : C60
- Spheroid : CLARKE 1880 (IGN) TOTAL code : C80
  - Semi major axis      a = 6 378 249.200
  - Semi minor axis      b = 6 356 515.000
  - Inverse flattening    1/f = 293.466021
  - Excentricity squared   e<sup>2</sup> = 0.006 803 487 66
- Projection : UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR (UTM) TOTAL code : S32
  - Zone : = 32 South
  - Central meridian : = 9° East
  - Latitude of origin : = Equator
  - False Easting : = 500 000.00
  - False Northing : = 10 000 000.00
  - Scale factor on CM : = 0.9996

#### 2 - GPS SATELLITE DATUM

- Datum name : INTERNATIONAL TERRESTRIAL REFERENCE FRAME (ITRF) TOTAL code : W84  
*W84*
- Spheroid : WGS 84 (GRS 1980) TOTAL code : W84
  - Semi major axis      a = 6 378 137.000
  - Semi minor axis      b = 6 356 752.314
  - Inverse flattening    1/f = 298.257 223 6
  - Excentricity squared   e<sup>2</sup> = 0.006 694 380

#### 3 - DATUM SHIFT – From Congo 1960 Pointe Noire to ITRF (WGS84)

- TOTAL code : C60
- EPSG code: 1802
- Delta X = - 178.3 m (negative)      Rot X = + 5.278" (positive)
  - Delta Y = - 316.7 m (negative)      Rot Y = + 6.077" (positive)
  - Delta Z = - 131.5 m (negative)      Rot Z = + 10.979" (positive)
  - Delta scale = + 19.166 ppm

- rotations are based on the BURSA WOLF formula (Position Vector method)
- GPS geodetic survey by GEOID on May 1995 to IGS (ITRF93 epoch 1995.4), residuals on 4 geodetic points < 0.15m.

#### 4 - EXAMPLE OF TRANSFORMATION

Point PNR B	Datum Congo 1960 Pointe Noire <i>TOTAL code : C60</i>	Datum WGS 84 <i>TOTAL code : W84</i>
Latitude	4° 47' 53.216" S	4° 48' 01.138" S
Longitude	11° 50' 44.175" E	11° 50' 46.819" E
Height above spheroid	21.78 m	26.19 m
Easting	815 676.81	815 751.62
Northing	9 469 044.25	9 468 751.66

Figure 13 : fiche géodésique bien détaillée puisqu'elle fait notamment apparaître l'ITRF associé à la transformation ainsi que l'époque, la convention adoptée et les résidus sur les points utilisés.

<b>GEODEIC SYSTEMS ON BLOCK 8</b>
-----------------------------------

**1 - OFFICIAL LOCAL DATUM**

- Datum name :	CAMACUPA - Cabo Ledo Base N.E.	TOTAL code: CCL
- Spheroid :	CLARKE 1880 (RGS)	TOTAL code: RGS
	Semi major axis      a =	6 378 249.145
	Semi minor axis      b =	6 356 514.869
	Inverse flattening    1/f =	293.465
	Excentricity squared   e <sup>2</sup> =	0.006 803 511 28
- Projection :	UNIVERSAL TRANSVERSE MERCATOR (U.T.M.)	TOTAL
code: S33		
	Zone                    : =	33 South
	Central meridian     : =	15° East
	Latitude of origin    : =	Equator
	False Easting        : =	500 000.00
	False Northing       : =	10 000 000.00
	Scale factor on CM    : =	0.9996

**2 - SATELLITE DATUM**

- Datum name :	WORLD GEODEIC SYSTEM 1984	TOTAL code: W84
- Spheroid :	WGS 84 (GRS 1980)	TOTAL code: W84
	Semi major axis      a =	6 378 137.000
	Semi minor axis      b =	6 356 752.314
	Inverse flattening    1/f =	298.257 223 6
	Excentricity squared   e <sup>2</sup> =	0.006 694 380

**3 - DATUM SHIFT – From CAMACUPA – Cabo Ledo Base NE to WGS84**

Delta X =	- 41.8 m (negative)	TOTAL code: CCL
Delta Y =	- 342.2 m (negative)	EPSG code : 1321
Delta Z =	- 228.2 m (negative)	

*Datum shift parameters derived from satellite coordinates in point positioning mode on the master translocation station CABO LEDO Base North-East, using 123 passes on TRANSIT satellites recorded during November 1990 by C.G.G.*

**4 - EXAMPLE OF TRANSFORMATION**

Geodetic Point CABO LEDO N.E. (MHCA)	Datum CAMACUPA - Cabo Ledo N.E. TOTAL code : CCL	Datum WGS 84 TOTAL code :W84
Longitude	13° 14' 48.146" E	13° 14' 37.535" E
Latitude	9° 39' 05.825" S	9° 39' 10.048" S
Height above spheroid	101.53 m	124.73 m
Easting	307 613.63	307 294.45
Northing	8 932 708.63	8 932 480.42
Height above M.S.L.	101.53 m	

Figure 14: exemple de fiche géodésique qui mériterait d'être mieux détaillée. Il manque surtout la réalisation du WGS84 associé à la transformation ce qui ne permet pas de se ramener dans le bon système de référence global avant d'appliquer les valeurs de translations fournies

## Annexe 4 : Manuel d'utilisation de la macro générale

### Sommaire

<b>MANUEL D'UTILISATION DE LA MACRO GENERALE .....</b>	<b>59</b>
<b>I. DETERMINATION DES VITESSES : .....</b>	<b>60</b>
<b>II. INSERTION DES DONNEES .....</b>	<b>64</b>
A. INSERTION DE POINTS DANS LA FEUILLE « ITRF_MESURE » .....	65
B. INSERTION D'UN POINT A PARTIR DE LA BOITE DE DIALOGUE.....	66
<b>III. PARAMETRAGE DE LA TRANSFORMATION .....</b>	<b>66</b>
<b>IV. AFFICHAGE DES RESULTATS .....</b>	<b>68</b>
A. CAS OU LES DONNEES ONT ETE RENTREES DANS LA FEUILLE EXCEL :.....	68
B. CAS OU LES DONNEES D'UN POINT ONT ETE RENTREES DANS L'INTERFACE UTILISATEUR.....	68
<b>V. GESTION DES PARAMETRES DE TRANSFORMATIONS ENTRE ITRF .....</b>	<b>69</b>
A. CAS DE MODIFICATIONS IMPORTANTES .....	70
B. CAS DE MODIFICATIONS BENIGNES.....	70
a) <i>Ajout d'une transformation</i> .....	71
b) <i>Modification d'un paramètre</i> : .....	72
c) <i>Suppression d'une transformation</i> .....	72
<b>VI. GESTION DES GEODESIES LOCALES ET DES PARAMETRES DES ELLIPSOÏDES ASSOCIES A L'ITRF .....</b>	<b>72</b>
A. LES GEODESIES LOCALES .....	72
B. LES ELLIPSOÏDES ASSOCIES AUX ITRF .....	72
<b>VII. CONVENTIONS UTILISEES : .....</b>	<b>73</b>

Cette macro a pour but de transformer des coordonnées exprimées dans un ITRF de mesure à une date donnée dans un autre ITRF à une autre époque puis dans une géodésie locale associées à ce dernier ITRF.

Avant toute chose, il est nécessaire de déterminer les vitesses à appliquer pour propager les données à l'époque de référence ; c'est-à-dire, pour corriger les coordonnées de l'effet de la tectonique des plaques entre les deux époques.

## I. Détermination des vitesses :

La méthode la plus simple consiste à recourir au calculateur de déplacement en ligne développé par Unavco accessible sur le site suivant :

[http://www.unavco.org/community\\_science/science-support/crustal\\_motion/dxdt/model.html](http://www.unavco.org/community_science/science-support/crustal_motion/dxdt/model.html)

La page suivante apparaît :

home > community science > science product support > global velocity

### Plate Motion Calculator

Enter coordinates and (optionally) other selections:

Latitude:	<input type="text"/> degrees North <input type="text"/> minutes North <input type="text"/> seconds North E.g. enter the latitude as <b>-56.25</b> degrees or <b>-56</b> degrees <b>15</b> minutes for <b>56 degrees 15 minutes South</b> .
Longitude:	<input type="text"/> degrees East <input type="text"/> minutes East <input type="text"/> seconds East E.g. enter the longitude as <b>-102.5</b> degrees or <b>-102</b> degrees <b>30</b> minutes for <b>102 degrees 30 minutes West</b> .
Height:	<input type="text"/> height (meters) <i>optional</i> WGS-84 height of geographic coordinate (default = 0 meters)
XYZ:	... or enter the position in WGS-84 XYZ coordinates: <input type="text"/> X (meters) <input type="text"/> Y (meters) <input type="text"/> Z (meters)

Le paramétrage conseillé est le suivant : (on assimilera les coordonnées WGS84 à des coordonnées ITRF)

- Saisir les coordonnées d'un point du block ou d'un point d'intérêt : l'objectif est de déterminer une vitesse applicable à l'ensemble du champ : on pourra en effet considérer la vitesse sur un block de quelques kilomètres carrés comme étant homogène. Il est par conséquent conseillé de prendre les coordonnées approximatives du barycentre du block ou des installations afin de minimiser l'erreur éventuelle (de l'ordre du dixième de millimètre... test réalisé pour l'ensemble des modèles disponibles sur le block 1 en Ouganda entre les points 1-1 et 1-10 : écart maximal observé selon la coordonnée y pour le modèle APKIM2000.0). La saisie se fera en remplissant les champs au choix : (lat, long, h) ou (X,Y,Z)

Latitude:	<input type="text"/> degrees North <input type="text"/> minutes North <input type="text"/> seconds North E.g. enter the latitude as <b>-56.25</b> degrees or <b>-56</b> degrees <b>15</b> minutes for <b>56 degrees 15 minutes South</b> .
Longitude:	<input type="text"/> degrees East <input type="text"/> minutes East <input type="text"/> seconds East E.g. enter the longitude as <b>-102.5</b> degrees or <b>-102</b> degrees <b>30</b> minutes for <b>102 degrees 30 minutes West</b> .
Height:	<input type="text"/> height (meters) <i>optional</i> WGS-84 height of geographic coordinate (default = 0 meters)
XYZ:	... or enter the position in WGS-84 XYZ coordinates: <input type="text"/> X (meters) <input type="text"/> Y (meters) <input type="text"/> Z (meters)
Site Name:	<input type="text"/> Site Name <i>optional</i> , only for printout; for example: AIRP

Figure 15: espace dédié à la saisie des coordonnées (Géographiques ou cartésiennes) du point d'intérêt

- Sélectionner le modèle à utiliser à l'aide de l'onglet ci-dessous

Model:	<input type="text" value="All of the above"/>
--------	---

GSRM 1.2 (2004)  
 GEODVEL 2010  
 MORVEL 2010  
 APKIM2005—DGFI  
 APKIM2005—IGN  
 CGPS 2004  
 REVEL 2000  
 ITRF2000 (AS&B [2002])  
 HS3-NUVEL 1A  
 APKIM2000  
 ITRF2000 (D&A [2001])  
 HS2-NUVEL 1A  
 NUVEL 1A  
 NUVEL 1  
 All of the above

Le choix du modèle est assez difficile : certains sont basés sur des observations d'anomalies magnétiques et ont donc des échelles de temps géologiques tandis que ceux basés sur des observations par techniques spatiales (APKIM, ITRF2000, etc) ont des échelles de temps de l'ordre de quelques dizaines d'années et tiennent donc compte des déformations récentes de type séisme, éruption volcanique, etc. En contrepartie, ces modèles n'intègrent pas tous le même nombre de plaques tectoniques. De manière générale, ces modèles ne pourront pas être utilisés au niveau de plaque ductile et dans les zones déformantes à proximité des frontières de plaques. Pour avoir réalisé des tests sur l'ensemble des modèles disponibles, une bonne pratique est d'effectuer le calcul sur l'ensemble des modèles disponibles (option « **all of the above** ») de supprimer les valeurs maximales et minimales des vitesses 3 D et d'effectuer une moyenne des valeurs restantes selon chaque composante. De cette façon, on minimisera les différences entre chaque modèle en limitant l'incertitude à 1 ou 2 millimètres soit une erreur de 4 cm sur 20 ans ce qui est largement acceptable compte-tenu de la technologie employée dans les mesures actuelles et surtout de la précision recherchée au sein de Total.

- Il faut ensuite attribuer la plaque sur laquelle se trouve la position renseignée. *Attention* : tous les modèles n'ont pas les mêmes frontières de plaque et l'option « **auto** » effectue une sélection automatique de la plaque en se basant sur les données du modèle Nuvel 1A

Tectonic Plate of Attributed Motion:	<input type="text" value="Auto"/> Auto = plate (based on plate selection of NUVEL 1A model) is determined automatically; other = plate is user-selected
--------------------------------------	---

Cela ne posera pas de problème sur les plaques majeures qui ont relativement les mêmes limites mais dans le cas de structures plus petites, certains modèles pourraient ne pas se calculer. S'il est certain de la plaque concernée, l'utilisateur peut également la sélectionner dans la liste déroulante. Dans ce cas, si l'option « **all of above** » a été sélectionné dans le choix du modèle, le calcul ne s'effectuera que sur ceux intégrant cette plaque.

- Choix de la référence : les vitesses à appliquer aux stations sont des vitesses de déplacement absolu par rapport à la surface de la terre. Il faudra donc sélectionner l'option « **NRR- No Net Rotation** » ; dans l'hypothèse d'avoir sélectionné uniquement un modèle basé sur des Hot Spot

(point fixe au niveau de la jonction de 3 plaques, il pourra également être l'option « **HS frame** »). Je conseille néanmoins la première condition qui est également celle utilisée dans la définition de l'évolution de l'orientation des réalisations de l'ITRF (dérivée de Rx, Ry et Rz par rapport au temps contraintes à zéros)

Reference:	<input type="text" value="NNR no-net-rotation"/>  motion referenced to <b>NNR</b> frame or <b>fixed-plate</b> , or HS "hotspot" frames for <b>HS2-NUVEL1A</b> or <b>HS3-NUVEL1A</b> models
------------	--

- Il est également possible d'utiliser les données d'un autre modèle afin de calculer des vitesses de site en rentrant respectivement les coordonnées WGS84/ITRF du pôle d'Euler ainsi que la vitesse de rotation de la plaque autour de son pôle dans la section « **Your own angular velocity of attributed motion** ». Par exemple, il est possible de calculer les composantes du vecteur vitesse d'un point dans le champ de l'ITRF2008 en connaissant la vitesse et le pôle de rotation de la plaque à laquelle il est rattaché. Dans ce cas là, il sera nécessaire de sélectionner l'option « **User specified** » dans la section « **Tectonic plate of attributed motion** »
- La section « **Your own reference angular velocity** » n'est pas utilisée ici puisqu'elle est dédiée à la détermination de vitesses relatives
- Enfin, dans le format de sortie (« **Output Format** »), l'utilisateur sélectionnera au choix le format HTML ou ASCII mais **toujours** suivant le formatage « **Table w/ WGS84 XYZ plate velocities** » afin d'obtenir des vitesses applicables aux coordonnées cartésiennes des points à transformer.

**Attention : ces calculs ne sont valables que dans le cas de plaques rigides ; si vous essayez de calculer des vitesses de sites au niveau de zones ductiles déformées par l'accumulation de stress tectonique (exemples : zone de montagnes et frontières de plaques), les résultats obtenus ne seront que des approximations et ne reflèteront que très partiellement la dynamique réelle du site.**

- L'image suivante répertorie pour chaque modèle intégré dans le calculateur de déplacement les plaques prises en compte. Il s'agit là d'abréviations ; le nom complet peut être retrouvé dans les liste déroulantes relatives aux choix de la plaque concernée au niveau de la section « **Tectonic plate of attributed motion** »

NUVEL 1	AF	AN		AR	AU	CA	CO	EU	IN	JF	NZ	NA	PA	PH	SA
NUVEL 1A	AF	AN	ST	AR	AU	CA	CO	EU	IN	JF	NZ	NA	PA	PH	SA
HS2-NUVEL1A	AF	AN		AR	AU	CA	CO	EU	IN	JF	NZ	NA	PA	PH	SA
ITRF2000 D&A [2001]	AF+SO	AN		AR	AU	CA		EU+EA	IN		NZ	NA	PA		SA
APKIM2000	AF+SO	AN		AR	AU	CA		EU+EA			NZ	NA	PA		SA
HS3-NUVEL1A	AF	AN	ST	AR	AU	CA	CO	EU	IN	JF	NZ	NA	PA	PH	SA
ITRF2000 AS&B [2002]		AN			AU			EU				NA	PA		SA
REVEL	NU+SO	AN		AR	AU	CA		EU+AT+SC+SU	IN		NZ	NA+OK+SR	PA	PH	SA
CGPS	NU+SO+SN	AN		AR	AU	CA		EU+AM+AT+SC+SU	IN		NZ	NA+SR	PA		SA
GSRM	NU+SO	AN	ST	AR	AU+CP	CA	CO+RI	EU+AM+AT+SC+SU+TA	IN	JF	NZ	NA+OK	PA+CR	PH	SA
APKIM2005	AF+SO	AN		AR	AU	CA		EU+AM+AT+SU+YZ	IN		NZ	NA+OK	PA		SA
MORVEL	NU+SO+LW	AN	ST+SW	AR	AU+CP+MQ	CA	CO+RI	EU+AM+AT+SU+YZ	IN	JF	NZ	NA+OK	PA+CR+Sur	PH	SA
GEODVEL	NU+SO	AN		AR	AU			EU	IN		NZ	NA	PA		SA

## II. Insertion des données

Avant toute chose, veillez à ce que les ellipsoïdes (et leurs paramètres associés) aux ITRF que vous souhaitez utiliser apparaissent bien dans la feuille « *ellipsoid\_ITRF* ». Si ce n'est pas le cas, veillez à les ajouter en respectant la casse « ITRF\_yyyy » dans la colonne dédiée

De même, veillez à ce que la géodésie locale en question soit bien rentrée dans la feuille « *datumshift* »; l'ajouter si ce n'est pas le cas. Le programme émet un message d'erreur si aucune géodésie même factice, n'est rentrée.

L'utilisateur dispose de deux possibilités pour insérer des coordonnées à transformer : soit par le biais de la feuille excel intitulée « *ITRF\_mesure* » (un ou plusieurs points) soit en utilisant directement la boîte de dialogue. Dans le premier cas, il est nécessaire d'insérer les coordonnées dans la feuille avant de lancer la macro en appuyant sur le bouton « *Transformer les coordonnées ...* » de cette même feuille. Dans le second cas, l'utilisateur cliquera directement sur ce bouton.

Transformer les coordonnées (dans le cas de plusieurs points: copier d'abord vos valeurs dans la zone réservée à gauche)

## A. Insertion de points dans la feuille « ITRF\_mesure »

Avant de lancer la macro, il faut dans cette configuration rentrer le ou les points à transformer. L'ajout de points à transformer se fait par le biais d'un identifiant du point (colonne « **Id-point** ») puis de coordonnées cartésiennes (colonnes « **X,Y,Z** ») ou de coordonnées géographiques (colonnes « **lambda** (degrés | minutes|secondes), **Phi** (degrés|minutes|secondes), **h** (hauteur ellipsoïdale en mètres) »).

Id_point	X(m)	Y(m)	Z(m)	Lambda			Phi			h
				dg	min	sec	dg	min	sec	

Figure 16: colonnes relatives au traitement de points insérés dans la feuille excel "ITRF\_mesure"

Lancer ensuite le traitement à l'aide du bouton ci-dessus.

La boîte de dialogue « **Paramétrage du Type de Transformation** » apparaît :

Paramétrage du Type de transformation

Nombre de points à transformer

1 seul point

Plusieurs points

Type de coordonnées à transformer

Géographiques (lambda, phi, h)

Cartésiennes (XYZ)

Coordonnées du point à transformer

Coordonnées cartésiennes

X (m) Y(m) Z(m)

Nom du point

Coordonnées géographiques

longitude (lambda) Dg min sec

latitude (phi) Dg min sec

hauteur ellipsoïdale (h) en m

Nom du point

Valider

Annuler

Fermer

Cocher la case « **Plusieurs points** » puis dans la partie « **Type de coordonnées à transformer** », cocher les coordonnées (Géographiques ou Cartésiennes) que vous avez insérées dans la feuille Excel.

Appuyer sur le bouton « **Valider** » pour continuer.

## B. Insertion d'un point à partir de la boîte de dialogue

Lancer directement la macro sans vous occuper de la feuille excel.

La boîte de dialogue « **Paramétrage du Type de Transformation** » apparaît :

Paramétrage du Type de transformation

Nombre de points à transformer

1 seul point

Plusieurs points

Type de coordonnées à transformer

Géographiques (lambda, phi, h)

Cartésiennes (XYZ)

Coordonnées du point à transformer

Coordonnées cartésiennes

X (m) Y(m) Z(m)

Nom du point

Coordonnées cartésiennes

longitude (lambda) Dg min sec

latitude (phi) Dg min sec

hauteur ellipsoïdale (h) en m

Nom du point

Valider

Annuler

Fermer

Cocher la case « **1 seul point** » puis le type de coordonnées que vous souhaitez traiter (« **Géographiques** » ou « **Cartésiennes** »).

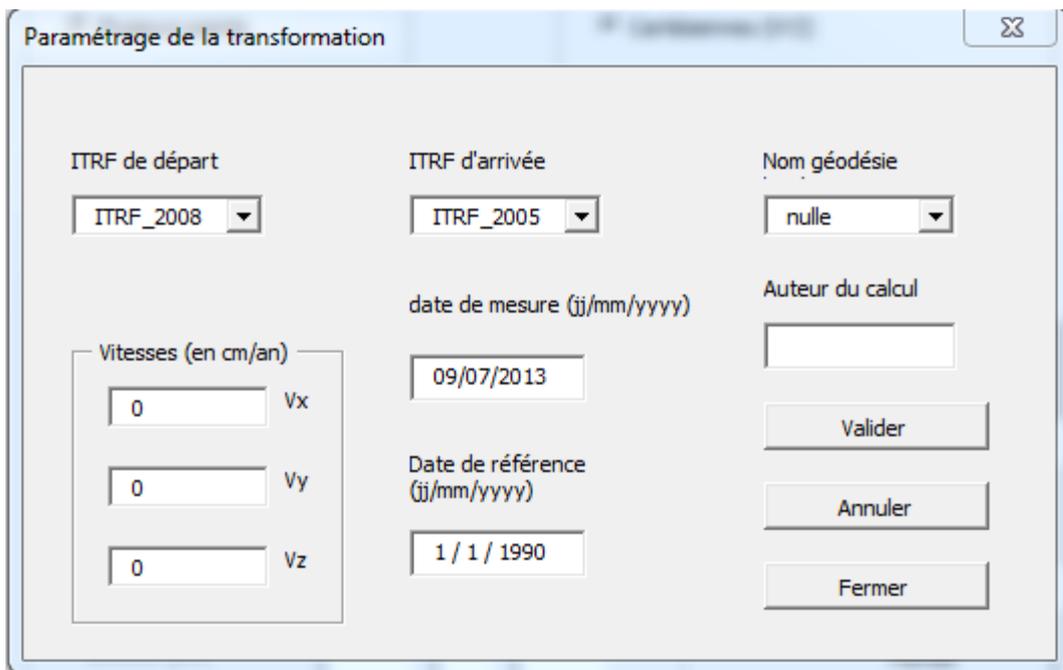
Insérer ensuite les coordonnées dans les cases dédiées à cet effet (elles sont rendues modifiables en fonction du type de coordonnées choisies)

Appuyer sur le bouton « **Valider** » pour continuer

## III. Paramétrage de la transformation

Le paramétrage est le même qu'il s'agisse d'un traitement à partir d'une feuille ou d'une interface.

Nous allons maintenant paramétrer la transformation en elle-même à l'aide de l'interface « **Paramétrage de la Transformation** » :



- Sélectionner l'ITRF dans lequel sont exprimés les points à transformer dans la liste déroulante « **ITRF de départ** »
- Sélectionnez l'ITRF dans lequel vous souhaitez exprimer ces coordonnées dans la liste déroulante « **ITRF d'arrivée** »
- *Remarque: dans le cas où l'utilisateur souhaite propager les coordonnées dans une géodésie locale, l'ITRF d'arrivée doit être celui associé à la géodésie locale (c'est-à-dire celui pour lequel les paramètres de transformation avec la géodésie locale sont fournis)*
- Dans le cas où vous souhaitez propager les coordonnées dans une géodésie locale, sélectionner cette dernière dans la liste déroulante « **Nom géodésie** »
- Saisir la « **date de mesure** » au format date (jj/mm/yyyy)
- Saisir la « **date de référence** » au même format que précédemment
- *Remarque: dans le cas où l'utilisateur souhaite propager les coordonnées dans une géodésie locale, la date de référence doit correspondre à l'époque de détermination du datum shift)*
- Saisir les composantes selon X,Y et Z du vecteur vitesse (en **cm/an**) à appliquer à l'ensemble des points en entrée dans la partie *Vitesses (en cm/an)*. Le séparateur décimal est le point du clavier ou la virgule
- L'auteur du calcul est facultatif, toutefois, pour des raisons de traçabilité, si une macro est utilisée pour un block et réutilisée d'une mission à l'autre, il serait opportun de rentrer un identifiant.

Appuyer sur le bouton « **Valider** » pour lancer le calcul.

Le bouton « **Annuler** » réinitialisera la boîte de dialogue s'il est coché tandis que le bouton « **Fermer** » mettra un terme au calcul.

## IV. Affichage des résultats

### A. Cas où les données ont été rentrées dans la feuille excel :

Le récapitulatif de la transformation se trouve en page 2 (feuille « *ITRF\_origine* »).

Les résultats sont affichés dans l'ordre chronologique de la transformation : « *ITRF de mesure* », « *ITRF final* » et « *Géodésie locale* »

Pour chaque point et pour chaque système, les coordonnées sont fournies sous le format cartésien et géographique avec l'ellipsoïde associé au système et son code :

X(m)	Y(m)	Z(m)	Lambda			Phi			h	ITRF	ellipsoïde	code Geodata
			dg	min	sec	dg	min	sec				

On trouve également le déplacement engendré par la transformation entre ITRF ainsi que les époques associées. Les deux dernières colonnes (AU et AV) indiquent la *date et l'auteur du calcul* (si ce dernier a été spécifié).

Pensez à sauvegarder votre travail si vous souhaitez conserver les points calculés.

### B. Cas où les données d'un point ont été rentrées dans l'interface utilisateur

Dans ce cas, le récapitulatif complet de la solution apparaît d'abord dans une boîte de dialogue puis les valeurs affichées sont transférées automatiquement dans la feuille « *ITRF\_origine* » à la fermeture de cette boîte de dialogue. L'objectif était que l'utilisateur n'ait pas à naviguer dans la feuille pour retrouver le point qu'il souhaitait transformer.

Résultat de la transformation X

Point  Date du calcul : 09/07/2013

---

Coordonnées initiales du point

X initial (m)	Y initial (m)	Z initial (m)	ITRF de mesure
<input type="text" value="-3480204,088"/>	<input type="text" value="905156,737"/>	<input type="text" value="5250378,336"/>	
Lambda (DMS)	Phi (DMS)	h (m)	ITRF_2008
<input type="text" value="165° 24' 75,9635"/>	<input type="text" value="55° 45' 78,9234"/>	<input type="text" value="215,43"/>	

---

Coordonnées finales du point

X final (m)	Y final (m)	Z final (m)	ITRF de référence
<input type="text" value="-3480204,726"/>	<input type="text" value="905156,184"/>	<input type="text" value="5250377,804"/>	
Lambda (DMS)	Phi (DMS)	h (m)	ITRF_1997
<input type="text" value="165° 25' 16,00341"/>	<input type="text" value="55° 46' 18,900941"/>	<input type="text" value="215,259328"/>	

---

Différence coordonnées finales - coordonnées initiales

Delta X (m)	Delta Y (m)	Delta Z (m)
<input type="text" value="-0,638"/>	<input type="text" value="-0,553"/>	<input type="text" value="-0,532"/>

---

Coordonnées dans la géodésie locale

X (m)	Y (m)	Z (m)	nom de la géodésie locale
<input type="text" value="-3480204,726"/>	<input type="text" value="905156,184"/>	<input type="text" value="5250377,804"/>	
Lambda (DMS)	Phi (DMS)	h (m)	nulle
<input type="text" value="165° 25' 16,00341"/>	<input type="text" value="55° 35' 33,799069"/>	<input type="text" value="6363772,44"/>	

---

époque de mesure  époque des coordonnées finales

Figure 17: boîte de dialogue récapitulative de la transformation d'un seul point

## V. Gestion des paramètres de transformations entre ITRF

**ATTENTION : Ce chapitre et les suivants devraient être supprimés si la macro et sa notice étaient diffusées à des utilisateurs NON-topographes**

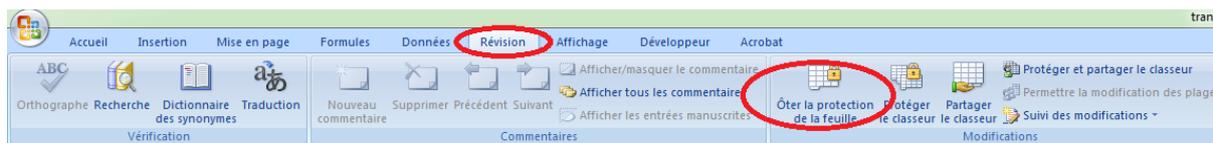
L'ensemble des paramètres possibles à l'heure actuelle ont été rentrés. Cependant, Il sera bientôt nécessaire d'ajouter ceux relatifs à l'ITRF 2013.

Deux solutions peuvent être envisagées.

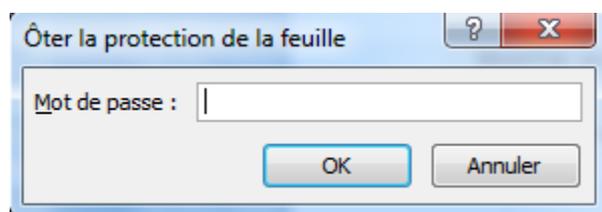
### A. Cas de modifications importantes

Pour une modification importante comme par exemple l'ajout ou la suppression de plusieurs transformations en même temps : l'utilisation de la macro peut s'avérer fastidieuse. Il est par conséquent conseillé d'utiliser la méthode suivante :

Sélectionner « **Révision** » dans la barre de menu Excel puis « **ôter la protection de la feuille** »



Saisir le mot de passe « Test » dans la boîte de dialogue suivante en respectant la casse puis valider.



La feuille est alors déverrouillée.

Effectuer les modifications souhaitées.

Une fois les changements opérés, veillez à re-verrouiller la feuille en lançant la macro en appuyant sur le bouton suivant :



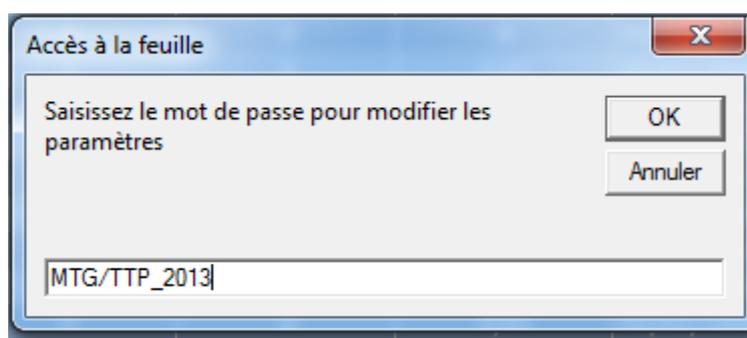
Et en fermant la boîte de dialogue qui apparaît. Pour que le tri soit effectué, il faudra par exemple modifier un paramètre (la méthode est expliquée dans le paragraphe qui suit).

### B. Cas de modifications bénignes

Lancer la macro en appuyant sur le bouton :



Pour accéder à l'interface de gestion des paramètres saisir le mot de passe « MTG/TTP\_2013 » dans la boîte de dialogue « **Accès à la feuille** » comme en-dessous puis cliquer sur « **OK** »



Accès à la feuille

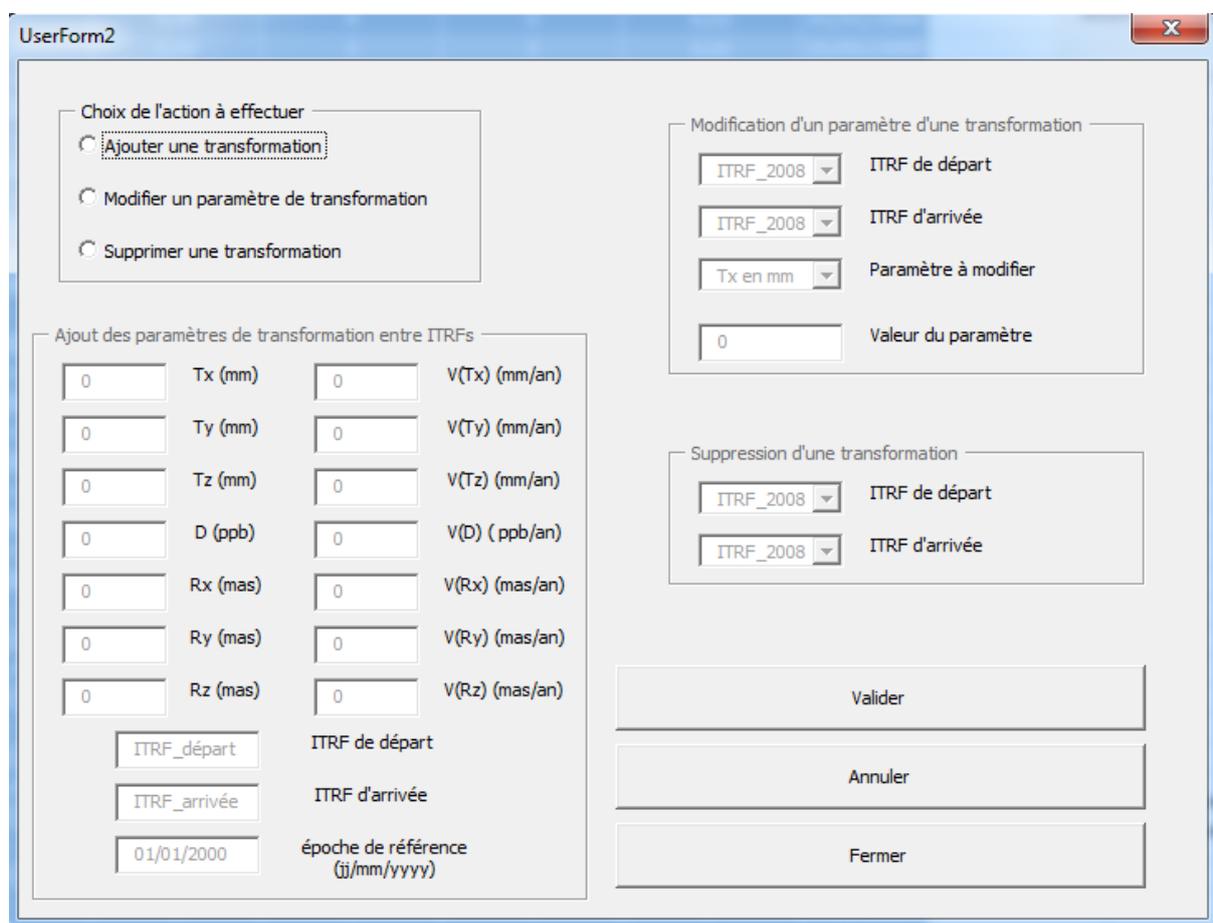
Saisissez le mot de passe pour modifier les paramètres

OK

Annuler

MTG/TTP\_2013

Dans la boîte de dialogue suivante, sélectionner l'action à effectuer dans la section en haut à gauche :



UserForm2

Choix de l'action à effectuer

- Ajouter une transformation
- Modifier un paramètre de transformation
- Supprimer une transformation

Ajout des paramètres de transformation entre ITRFs

<input type="text" value="0"/>	Tx (mm)	<input type="text" value="0"/>	V(Tx) (mm/an)
<input type="text" value="0"/>	Ty (mm)	<input type="text" value="0"/>	V(Ty) (mm/an)
<input type="text" value="0"/>	Tz (mm)	<input type="text" value="0"/>	V(Tz) (mm/an)
<input type="text" value="0"/>	D (ppb)	<input type="text" value="0"/>	V(D) (ppb/an)
<input type="text" value="0"/>	Rx (mas)	<input type="text" value="0"/>	V(Rx) (mas/an)
<input type="text" value="0"/>	Ry (mas)	<input type="text" value="0"/>	V(Ry) (mas/an)
<input type="text" value="0"/>	Rz (mas)	<input type="text" value="0"/>	V(Rz) (mas/an)

ITRF de départ

ITRF d'arrivée

époque de référence (jj/mm/yyyy)

Modification d'un paramètre d'une transformation

ITRF de départ

ITRF d'arrivée

Paramètre à modifier

Valeur du paramètre

Suppression d'une transformation

ITRF de départ

ITRF d'arrivée

Valider

Annuler

Fermer

En fonction de l'action, l'un des 3 autres cadres est dégelé.

### a) Ajout d'une transformation

Taper les paramètres dans les zones dédiées à cet usage en veillant à respecter les unités pour les valeurs numériques ainsi que la casse « **ITRF\_yyyy** » pour les ITRF de départ et d'arrivée ainsi que le format de date « **jj/mm/yyyy** » pour l'époque de référence des paramètres de transformation

Cliquer ensuite sur « Valider » pour finaliser l'ajout d'une transformation dans le tableau

### b) Modification d'un paramètre :

Sélectionner les ITRF de départ et d'arrivée à l'aide des listes déroulantes respectives ainsi que le paramètre à modifier.

Saisir la nouvelle valeur du paramètre puis « **valider** » pour finaliser la modification

### c) Suppression d'une transformation

Sélectionner les ITRF de départ et d'arrivée de la transformation à supprimer à l'aide des listes déroulantes respectives

Cliquer sur « **Valider** »

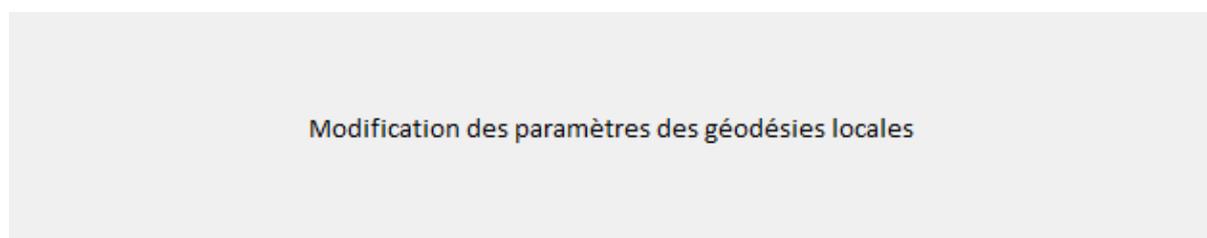
## VI. Gestion des géodésies locales et des paramètres des ellipsoïdes associés à l'ITRF

Les procédures de modifications pour les géodésies locales et les paramètres d'ellipsoïdes sont identiques à celles relatives à la gestion des paramètres de transformation entre ITRF vues au chapitre V

### A. Les géodésies locales

Pour la gestion des géodésies locales, les données sont stockées au niveau de la feuille « **datumshift** ».

Dans le cadre de modifications bénignes, le lancement de la macro se fait à l'aide du bouton :



Les mots de passe et les procédures à utiliser en fonction des modifications que l'on souhaite faire sont identiques à ceux décrits au chapitre 5.

Attention malgré tout : l'époque du datumshift est ici indiquée à titre indicatif. La date de référence utilisée dans le calcul est celle renseignée dans le paramétrage de la transformation. Si l'on souhaite projeter des coordonnées dans une géodésie locale, il est par donc nécessaire de paramétrer comme date de référence celle renseignée dans la feuille « **datumshift** » dans la colonne « **époque datumshift** » au niveau de la géodésie locale correspondante.

La convention adoptée pour la transformation à 7 paramètres est celle de Bursa-Wolf, il faudra donc inverser les signes des rotations si celles-ci sont données dans une Convention « Référence Frame »

### B. Les ellipsoïdes associés aux ITRF

Ces informations sont répertoriées dans la feuille « **ellipsoid\_ITRF** » Pour intervenir sur ces données, les procédures sont identiques à celles énoncées au chapitre V.

Depuis la première réalisation de l'ITRF, l'ellipsoïde associé est l'IAG GRS 1980. Il est cependant nécessaire de le faire apparaître pour chaque ITRF en respectant la casse « ITRF\_yyyy » pour des raisons de gestion de variable dans la gestion de la matrice.

Ces informations n'interviennent que dans le calcul des coordonnées géographiques. Le calcul peut donc s'effectuer correctement si les coordonnées en entrée sont cartésiennes. Toutefois, une hauteur ellipsoïdale proche du rayon terrestre (6300 000 mètres) témoignera d'un problème dans la gestion des ellipsoïdes. La première source d'erreur potentielle réside dans le « **Nom du repère de référence** » : la casse de ce dernier doit être identique au nom des ITRF de départ et d'arrivée présents dans la page « **Parametres\_transfo** »

## VII. Conventions utilisées :

- Les paramètres de transformation sont exprimés dans le sens « **From ITRF\_départ to ITRF\_arrivée** »
- Les datums shifts vers la géodésie locales sont exprimés dans le sens « **From ITRFyyyy to local datum** »
- La convention utilisée dans le cadre des transformations à 7 paramètres est celle de « **Bursa-Wolf** » aussi appelée « **Position-Vector** » à savoir :

$$\begin{matrix} X_{local} \\ Y_{local} \\ Z_{local} \end{matrix} = \begin{matrix} X_{itrf} \\ Y_{itrf} \\ Z_{itrf} \end{matrix} + \begin{matrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{matrix} + \begin{bmatrix} D & -R_z & R_y \\ R_z & D & -R_x \\ -R_y & R_x & D \end{bmatrix} * \begin{matrix} X_{itrf} \\ Y_{itrf} \\ Z_{itrf} \end{matrix}$$

Il s'agit de la convention adoptée par l'IERS : rotations des positions autour des axes

L'autre convention rencontrée (cas du GDA en Australie par exemple) considère une rotation des axes en eux-mêmes (convention « **Coordinate Frame Rotation** »). Dans ce cas, il convient d'inverser les signes des rotations en entrée dans la matrice pour pouvoir appliquer la formule ci-dessus. Cf exemple ci-dessous :

Convention : <b>Coordinate Frame Rotation</b>			
	X	Y	Z
Translation [mètre]	106.868628	-52.297783	103.723893
Rotation en " sexagésimale	0.336570	-0.456955	1.842183
Facteur d'échelle	1.0000012747		

Convention : <b>Position Vector</b>			
	X	Y	Z
Translation [mètre]	106.868628	-52.297783	103.723893
Rotation en " sexagésimale	-0.336570	0.456955	-1.842183
Facteur d'échelle	1.0000012747		

Il faut donc changer le signe des rotations du premier tableau de façon à se ramener au second et ainsi pouvoir utiliser les formules implémentées dans les algorithmes de la macro.

## Annexe 5 : Bibliographie

Altamimi Z., Collilieux X., Legrand J., Garayt B., and Boucher C. (2007): *ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters* Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) Volume 112, Issue B9,

Altamimi Z. (2006): *Systèmes de référence terrestres: définition, réalisation, application à l'ITRF, état actuel et perspectives*, dossier d'habilitation à diriger des recherches université Pierre et Marie Curie ([http://recherche.ign.fr/labos/lareg/pdf/HDR/hdr\\_zuheir\\_altamimi\\_2006.pdf](http://recherche.ign.fr/labos/lareg/pdf/HDR/hdr_zuheir_altamimi_2006.pdf))

Altamimi, Z., Boucher C., and Sillard C. (2002a): *New trends for the realization of the International Terrestrial Reference System* Advances in Space Research, Volume 30, Number 2, pp. 175-184(10)

Altamimi Z., Métivier L., Collilieux L. (2012), *ITRF2008 Plate Motion Model* Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012) Volume 117, Issue B7

Boucher, C., *Current intercomparisons between CTS's*, in Reference Frames in Astronomy and Geophysics, edited by J. Kovalevsky, I. I. Mueller, and B. Kolaczek, Kluwer Acad., Norwell, Mass.

Dermanis, A. (2000), *Establishing Global Reference Frames: Nonlinear, Temporal, Geophysical and Stochastic Aspect*, Gravity, Geoid and Geodynamics GGG2000 IAG International Symposium Banff, Alberta, Canada July 31 – August 4, Session 2, pp. 35-42

Duquenne F., Botton S., Peyret F., Bétaille D., Willis P. (2005) : *GPS : localisation et navigation par satellites (2<sup>e</sup> Éd.)* Éditeur Hermès – Lavoisier

Fund F., Morel L., Mocquet A. (2010) : *Modélisation des retards troposphériques pour les observations GPS et impacts sur l'estimation de la hauteur ellipsoïdale* Revue XYZ 123, 27 (2010) 32

Maurin T., Rangin C. (2009) *Structure and kinematics of the Indo-Burmese Wedge: Recent and fast growth of the outer wedge* Tectonics, Volume 28, Issue 2

Nielsen C., Chamot-Rooke N., Rangin C. (2004): *From partial to full strain partitioning along the Indo-Burmese hyper-oblique subduction* Marine Geology 01/2004; DOI:10.1016/j.margeo.2004.05.00

Sillard, P., C. Boucher (2001), *Review of algebraic constraints in terrestrial reference frame datum definition* Journal of Geodesy, Volume 75, Issue 2-3, pp 63-73

Socquet A., Vigny C., Chamot-Rooke N., Simons W., Rangin C. and Ambrosius B. (2006) *India and Sunda plates motion and deformation along their boundary in Myanmar determined by GPS*, J. Geophys. Res., 111, B05406, doi:10.1029/2005JB003877

Stanaway R. (2008) *A semi-dynamic datum for Papua New Guinea*, Quickclose Queensland Spatial Conference 2008, Gold Coast

Stanaway, R., Roberts, Crook, & Blick, G. (2012) *Realisation of a Semi-Kinematic Geodetic Datum using an Absolute Deformation Model (ADM)*, IUGG Proceedings, Melbourne

Solomon, S. C., and N. H. Sleep (1974), *Some simple physical models for absolute plate motions*, J. Geophys. Res., 79, 2557 – 2567

Vigny C., Socquet A., Rangin C., Chamot-Rooke N., Pubellier M., Bouin M., Bertrand G. and Becker M. (2003): *Present-day crustal deformation around Sagaing fault, Myanmar*, J. Geophys. Res., 108(B11), 2533

Williams S. D. P., Bock Y., Fang P., Jameson P., Nikolaidis R. M., Prawirodirdjo L., Miller M. & Johnson D. J. (2004) *Error analysis of continuous GPS position time-series*, Journal of Geophysical Research-Solid Earth, March 26, 2004 (Vol. 109, No. B3, B03412, Paper No. 10.1029/2003JB002741)