



**HAL**  
open science

## Mesure de subsidence dans le domaine marin

Axelle Héléna Mamwa Simo

► **To cite this version:**

Axelle Héléna Mamwa Simo. Mesure de subsidence dans le domaine marin. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-02959919

**HAL Id: dumas-02959919**

**<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02959919v1>**

Submitted on 7 Oct 2020

**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 MÉTIERS**  
**ÉCOLE SUPÉRIEURE DES GÉOMÈTRES ET TOPOGRAPHES**

---

**MÉMOIRE**

**présenté en vue d'obtenir**

**le DIPLÔME D'INGÉNIEUR CNAM**

**SPÉCIALITÉ : Géomètre et Topographe**

**Confidentiel**

**par**

**Axelle Helena MAMWA SIMO**

---

**Mesure de subsidence dans le domaine marin**

**Soutenu le 04 septembre 2019**

---

**JURY**

Monsieur Laurent MOREL  
Monsieur Frédéric AUGER  
Monsieur Laurent MOREL

Président du jury  
Maître de stage  
Enseignant référent

## Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier *Frédéric AUGER* mon tuteur de stage sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Sa disponibilité, son obstination clairvoyante et son dynamisme ont été d'importants soutiens au cours de ces six mois de stage. J'espère avoir été à la hauteur de ses attentes.

L'équipe Topo : *Edouard GIUDICE, William GAIRIN*, qui contribuent à la convivialité au bureau. Merci pour tous les conseils et le partage de leurs expériences professionnelles qui m'ont permis d'avancer dans ce projet.

*Lodois De Marolles*, anciennement membre de l'équipe Topo que j'ai eu l'occasion de rencontrer. Merci pour sa disponibilité en toute circonstance et pour tous ses conseils.

À l'équipe de Sonardyne notamment *Shaun Dunn, Darren Murphy, Trevor Barnes...* équipe avec qui il a fait bon de travailler. Je leur exprime toute ma gratitude.

À toute l'équipe GEOFLEX particulièrement *Romain LEGROS, François FUND...* qui n'ont pas hésité à me donner certains conseils et à être disponible.

*Abderrahim LAFRAM*, membre du service 4D pour sa sympathie et sa disponibilité lors des nombreux échanges que nous avons pu avoir autour de la surveillance du champ CLOV.

Aux membres de la filiale Total E&P Angola : *Julien COURBIN* et *Sebastien GHIS*, qui m'ont aidé dans les débuts de ce projet.

Aux professeurs de l'ESGT et particulièrement à M. *Laurent MOREL*, en charge du suivi de mon TFE.

L'ensemble des personnes avec qui j'ai échangé tout le long de ce stage.

*Katia MARHEIN*, un rayon de soleil journalier. Merci pour tous les bons moments, les discussions passionnantes qu'on a pu avoir.

Les stagiaires *Ashley, Sahbi*, toujours partants pour une sortie.

*Mes parents, ma famille*, pour leur soutien indéfectible dans ma vie et tout au long de mes études.

## Liste des abréviations

ANTEX : Antenna Exchange Format – Format d'Échange d'Antennes

APPS : Automatic Precise Positioning Service - Service de Positionnement Précis Automatique

AUV: Autonomous Underwater Vehicle - Véhicule Autonome Sous-marin

AZA : Ambient-Zero-Ambient

CTD: Conductivity/Temperature/Depth - Conductivité Température Densité

FPSO: Floating Production Storage and Offloading - Unité flottante de production, de stockage et de déchargement

GNSS: Global Navigation Satellite System – Système Global de Navigation de Satellite

GPS : Global Positioning System – Système Global de Positionnement

INSAR: Interferometric Synthetic Aperture Radar - Interférométrie Radar

IGS : International GNSS Service – Service International GNSS

IRS : Individual Reply Signal - Signal de Réponse Individuelle

ITRF : International Terrestrial Reference Frame – Système de Référence Terrestre

LBL : Long Base Line - Méthode acoustique à Base Longue

MNT : Modèle Numérique de Terrain

PMT : Pressure Monitoring Service

PPP : Precise Point Positioning – Positionnement ponctuel Précis

RINEX: Receiver Independent Exchange Format – Format d'Échange Indépendant du Récepteur

ROV: Remote Operating Vehicle - Robot sous-marin télécommandé

SCRS-PPP : Système Canadien de Référence Spatiale-Positionnement ponctuel Précis

SVP: Sound Velocity Profiler

SVS: Sound Velocity Sensor

SCPR : Self Calibrating Pressure Recorder – Auto-Calibration des capteurs de Pression

# Glossaire

Acoustique sous-marine : étude de la propagation du son dans l'eau.

Code C/A : code principal du *GPS* et généré uniquement sur la fréquence *L1*.

Code P : code précis du *GPS* et généré sur les fréquences *L1* et *L2*.

Compaction : phénomène non visible à la surface résultant de la variation de pression dans le réservoir.

Éphémérides : ensemble des paramètres permettant de calculer la position et l'erreur d'horloge satellite à un instant *t*.

Latence : grandeur permettant de connaître les délais de diffusions de données.

Ligne de base (baseline) : distance entre deux transpondeurs.

Micrologiciel (firmware) : programme intégré dans un récepteur afin qu'il puisse fonctionner.

«Offshore» qui signifie en français «au large des côtes». Il s'applique à plusieurs domaines et permet de qualifier une activité se déroulant en mer.

Positionnement statique : positionnement d'un point supposé immobile.

Satellite géostationnaire : satellite artificiel permettant de fournir à un utilisateur par l'intermédiaire d'un récepteur sa position et sa vitesse.

Subsidence : du latin *subsidere* il désigne l'affaissement du fond marin suite aux variations des paramètres de température/pression dû à l'extraction d'hydrocarbures dans le réservoir.

Trajet multiple : phénomène de propagation qui consiste à la réception d'une réflexion parasite s'ajoutant au signal en propagation directe.

# Table des matières

<b>I</b>	<b>LA SUBSIDENCE .....</b>	<b>10</b>
I.1	LA NATURE DE LA SUBSIDENCE .....	10
I.1.1	Définition de la subsidence .....	10
I.1.2	Risques.....	12
I.1.3	Bref historique des études de subsidence.....	13
<b>II</b>	<b>ÉTAT DE L'ART .....</b>	<b>15</b>
II.1	CONTEXTE DE L'ETUDE .....	15
II.1.1	L'Exploration-Production en milieu offshore.....	15
II.1.2	Les plateformes pétrolières .....	16
II.1.3	Les robots sous-marins en offshore .....	17
II.2	METHODES DE SUIVI DE SUBSIDENCE .....	18
II.2.1	Positionnement en surface .....	18
II.2.1.1	GNSS.....	18
II.2.1.2	Interférométrie radar.....	21
II.2.2	Positionnement sous-marin .....	22
II.2.2.1	Positionnement acoustique .....	23
II.2.2.2	Utilisation des capteurs de pression .....	24
II.3	CAPTEURS DE PRESSION .....	25
II.3.1	Principe des capteurs de pression.....	25
II.3.1.1	Pressure Monitoring Transponder .....	25
II.3.1.2	Ambient Zero Ambient .....	26
II.3.1.3	Correction des mesures de pression .....	28
II.3.2	Sources d'erreurs .....	29
II.3.3	Applications des capteurs de pression .....	29
<b>III</b>	<b>MISE EN PLACE D'UNE APPLICATION CONCRETE SOUS-MARINE .....</b>	<b>30</b>
III.1	SIMULATION PAR METHODE ACOUSTIQUE LBL .....	32
III.1.1	Brève description du travail réalisé.....	32
III.1.2	Difficultés rencontrées .....	33
III.2	SIMULATION PAR CAPTEURS DE PRESSION .....	35
III.2.1	Étude géologique du fond marin .....	35
III.2.2	Densité des points .....	35
III.2.2.1	Description du problème .....	35
III.2.2.2	Choix d'une technique d'interpolation.....	36
III.2.3	Traitements réalisés.....	36
III.2.3.1	Réalisation d'un maillage régulier.....	36
III.2.3.1.1	Évaluation technique.....	36
III.2.3.1.2	Évaluation du coût .....	39
III.2.3.1.3	Faisabilité du scénario.....	40
III.2.3.2	Combinaisons des mesures de pression avec ceux issues de l'étude sismique.....	41
III.2.3.3	Acquisition des données.....	42
<b>IV</b>	<b>MISE EN PLACE D'UNE APPLICATION CONCRETE EN SURFACE .....</b>	<b>43</b>
IV.1	CONTEXTE DE L'APPLICATION.....	43
IV.1.1	Description de la mission .....	43
IV.1.2	Préparation de la mission .....	43
IV.1.3	Objectifs de la mission .....	44
IV.2	METHODE PRECISE POINT POSITIONNING.....	45
IV.2.1	Description de la méthode traditionnelle.....	45
IV.2.2	Méthodologie utilisée dans cette étude .....	45

IV.2.2.1	Présentation du service PPP-IAR .....	45
IV.2.2.2	Paramètres estimés .....	46
IV.2.2.3	Paramétrage du traitement.....	46
IV.2.2.4	Traitement PPP en mode pseudo statique.....	47
IV.2.2.4.1	Concept du temps réel.....	47
IV.2.2.4.2	Concept du post-traitement (quasi temps réel).....	48
IV.2.3	Cas concret.....	49
IV.2.3.1	Équipements installés .....	49
IV.2.3.2	Fichiers d'observations des données .....	50
IV.2.3.3	Autres fichiers .....	50
IV.2.4	Présentation des résultats .....	51
IV.2.4.1	Traitement pseudo-statique des séries journalières en post-traitement .....	51
IV.2.4.1.1	Station WFR .....	52
IV.2.4.1.2	Station F15A.....	53
IV.2.4.1.3	Station TEPM .....	53
IV.2.4.1.4	Station YDNA .....	54
IV.2.4.1.5	Station WP02.....	56
IV.2.4.1.6	Station WP03.....	56
IV.2.4.2	Traitement de sessions de 2h.....	57
IV.2.4.2.1	Station WFR .....	58
Conclusion.....		60
Bibliographie .....		61
Table des annexes.....		64
Annexe 1 Subsidence sur le champ YADANA.....		65
Annexe 2 Système géodésique employé en Angola.....		74
Annexe 3 Exemple de profil de célérité .....		75
Annexe 4 Trajectoire d'un signal acoustique entre deux transpondeurs .....		76
Annexe 5 Techniques d'interpolation.....		77
Annexe 6 Types de matériels à utiliser.....		80
Annexe 7 Simulation d'un suivi de subsidence d'une durée de 10 ans avec un déploiement de 30 capteurs .....		82
Annexe 8 Résultats issus lors des premiers calculs (1 an) sur les stations YDNA, TEPM, WP02, WP03 .....		85
Liste des figures.....		88
Liste des tableaux .....		90

## Introduction

Ce mémoire est l'aboutissement des six mois de travail réalisés au sein du groupe TOTAL du 04 février au 02 août 2019. C'est l'étape clôturant la fin de la formation du cycle d'ingénieurs géomètres et topographes à l'ESGT du Mans.

Le sujet de stage porte sur la mesure de subsidence en surface et en sous-marin. La particularité de ce sujet est qu'aujourd'hui TOTAL ne dispose pas encore de moyens pour réaliser un suivi de subsidence en sous-marin. Le but est donc de faire un état de l'art de toutes les techniques existantes et de les adapter aux différents projets de TOTAL. Deux cas concrets étudiés nous permettront d'évaluer au mieux ces nouvelles techniques.

### **Le groupe TOTAL**

C'est en 1924 que débute l'histoire de TOTAL avec la création en France, de la Compagnie Française des Pétroles (CFP). Très rapidement, la société s'assure un accès direct à la ressource en développant synchroniquement une organisation industrielle intégrée. Au même moment, cette évolution est suivie par la société belge PetroFina qui rejoindra plus tard le groupe TOTAL. En 1945, les différentes entités publiques font de grandes découvertes dans le domaine de la recherche d'hydrocarbures avant d'engager un rapprochement qui va donner naissance au groupe Elf. Entre 1998 et 1999, TOTAL réalise un « doublé » par la fusion avec PetroFina et Elf ; ce qui le propulse à la place de quatrième au rang mondial de l'industrie pétrolière (TOTAL, 2019).

Enfin, finalement renommé TOTAL en 2003, le groupe est présent aujourd'hui dans plus de 130 pays et compte 98 000 collaborateurs ainsi, TOTAL occupe aujourd'hui le rang de 4<sup>e</sup> compagnie pétrolière et gazière internationale. Les activités du groupe TOTAL sont réparties en deux grands groupes :

- L'amont : il comprend l'Exploration-Production (branche chargée du renouvellement des réserves d'hydrocarbures) et Gas, Renewable & Power (secteur chargé du développement d'énergies renouvelables) ;
- L'aval : il comprend le Raffinage-Chimie (qui permet la transformation d'hydrocarbures en produits finis) et le Marketing & Services (pour la commercialisation des produits).



## Le service AST (Acquisition Sismique et Topographie)

Le Centre Scientifique et Technique Jean Feger (CSTJF) de TOTAL a été inauguré en 1989 à Pau (64) et compte environ 2850 travailleurs y compris de nombreux internationaux. L'objectif du CSTJF est de contribuer à l'amélioration des méthodes d'exploration et de production de TOTAL.

Mon stage a été effectué au sein du département MTG plus particulièrement dans le service AST. La figure 1 ci-dessous reprend la hiérarchie de l'entité AST au sein du groupe. Le service AST est responsable de l'expertise dans le domaine de la géodésie et du positionnement. Il permet de garantir la précision lors des opérations de construction ou de mise en place des structures à terre ou en mer.

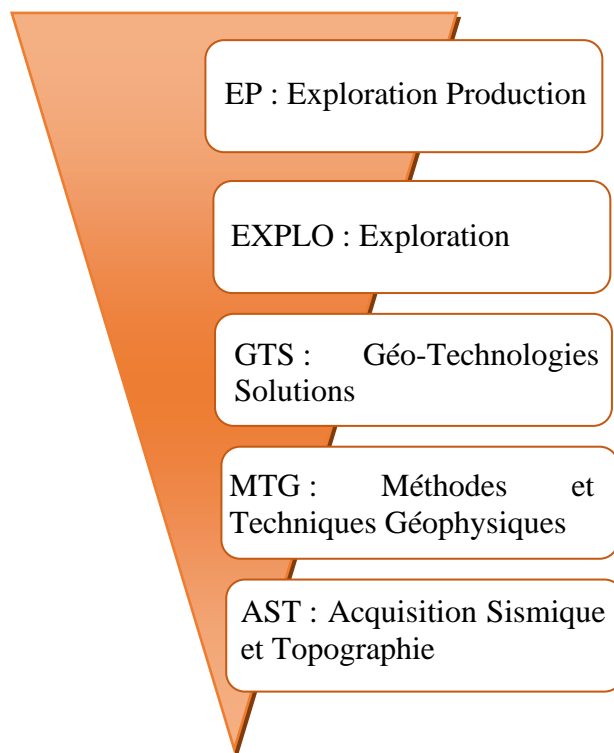


Figure 1: Entité AST au sein du groupe TOTAL - sans échelle

## Problématique

Le phénomène de subsidence fait partie des phénomènes les plus rencontrés lors de la production d'hydrocarbures ou de gaz. Il résulte des actions en sous-sol et peut être progressif, régulier ou soudain. Cet enfoncement est provoqué par une variation de la température et/ou de la pression dans le réservoir. Il peut avoir des conséquences importantes en surface comme en mer. Il est donc nécessaire de monitorer cet affaissement.

Des compagnies pétrolières ont déjà mis en œuvre des solutions pour la mesure de subsidence. Notamment chez TOTAL, du positionnement en surface est fait à l'aide de la technique GNSS en temps différé. Par contre, en mer, rien n'a encore été développé pour des champs en très grande profondeur. Il est donc question d'étudier toutes les possibilités techniques disponibles sur le marché pour monitorer à une précision de l'ordre du centimètre, les phénomènes de subsidence.

## **Objectifs**

L'objectif de ce projet est d'étudier à partir de cas concrets, l'affaissement des champs en surface et en sous-marin. Cette étude permettra de mieux anticiper le phénomène de subsidence.

Dans une première partie, le projet a consisté en une description du phénomène de subsidence allant des causes jusqu'aux différents risques en terme de sécurité pour les personnes et les installations.

Dans une deuxième partie, il est question de se documenter afin de faire une étude bibliographique de toutes les méthodes existantes du suivi de déformations dans le domaine marin (surface et sous-marin) et qui sont employées actuellement.

Dans une troisième partie, cette recherche sera complétée par une étude pour un suivi de déformations en sous-marin. Cette partie va consister en une étude de faisabilité sur le champ CLOV en Angola.

Dans une quatrième et dernière partie, nous développerons un cas d'étude pour un monitoring en surface. Cette partie présente les résultats et une analyse de leur pertinence y est développée.

# **I La subsidence**

## **I.1 La nature de la subsidence**

Cette section a pour but de faire comprendre au lecteur le phénomène de subsidence. Celui-ci pourra ainsi découvrir la définition et un bref historique du phénomène de subsidence afin de comprendre facilement la suite portant sur les techniques qui seront utilisées.

### **I.1.1 Définition de la subsidence**

La subsidence peut être définie comme étant l'affaissement du sol par rapport à son point de stabilité de référence. Cela peut être dû à de fortes précipitations (sol saturé en eau), au pompage de l'eau souterraine, à la nature de la roche, à des catastrophes naturelles (failles, séismes...) ou encore à l'extraction d'hydrocarbures et gaz (but de notre étude). C'est un mouvement de terrain résultant des actions en sous-sol et produisant à la fois des mouvements verticaux en profondeur et horizontaux en surface. Elle dépend des caractéristiques géométriques de la roche, de la géologie de la zone et des variations température/pression.

#### **Pourquoi la subsidence ?**

La subsidence est causée par la compaction, décrit comme une diminution de l'épaisseur initiale du réservoir due à une régression de la pression. Comme le décrit (Dirk Doorhof et al., 2006), les termes compaction et subsidence désignent deux phénomènes différents : la compaction désigne un changement de volume du réservoir difficile à observer en surface tandis que la subsidence désigne un affaissement très souvent visible à la surface (fond marin, surface de la terre, ...).

Lors de l'extraction d'hydrocarbures dans le réservoir, la pression diminue entraînant un stress vertical sur la roche. Le degré de compaction dépend alors de la porosité et de la lithologie de la roche. La diminution du réservoir causée par la compaction sera directement transférée en surface pour entraîner une déformation. Le principe de modélisation est illustré en figure 2. Ce transfert sera influencé par la profondeur du réservoir et les propriétés géologiques de la roche.

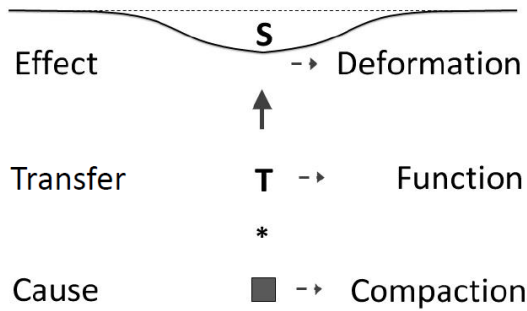


Figure 2: Modélisation de la subsidence - Source : Karsten Z., 2011

Martin et al. (1984) définissent la subsidence comme étant le produit de trois facteurs : la compaction, le transfert et un facteur reliant la compaction maximale du réservoir à la subsidence maximale. Ce dernier facteur varie suivant la profondeur du réservoir : pour un réservoir peu profond sur une zone étendue, le facteur est égal à 1 car le bol de subsidence représente entièrement la compaction du réservoir ; tandis que pour un réservoir plus profond couvrant une petite zone, le bol de subsidence ne représente qu'une partie de la compaction maximale et dans ce cas, le facteur sera inférieur à 1. Le produit de ces trois facteurs permet d'exprimer la subsidence  $S$  comme suit :

$$S = (C_m \cdot \Delta p \cdot M_i) \left( \frac{\Delta h_m}{C_m \cdot \Delta p \cdot M_i} \right) \left( \frac{S}{\Delta h_m} \right) \quad (1)$$

La compaction unidimensionnelle est calculée grâce à la formule  $C_m \cdot \Delta p \cdot M_i$  où  $C_m$  représente le coefficient de compaction unidimensionnelle,  $\Delta p$  est la différence de pression et  $M_i$  l'épaisseur du réservoir.

$\frac{\Delta h_m}{C_m \cdot \Delta p \cdot M_i}$  calcule la fonction de transfert de contrainte avec  $\Delta h_m$  qui représente la compaction maximale du réservoir.

Le facteur d'étalement  $\frac{S}{\Delta h_m}$  permet d'estimer l'impact de la compaction maximale sur le bol de subsidence maximale en surface. Pour avoir une subsidence à grande échelle, ce facteur doit être proche de 1. C'est le cas de la plateforme YADANA au Myanmar qui a connu une subsidence remarquable avec un facteur proche de 0,9.

L'expression de la subsidence maximale peut être reformulée comme suit :

$$S = (\text{Compaction}) \cdot (\text{Transfert}) \cdot (\text{Facteur d'étalement de la subsidence}) \quad (2)$$

Les études de subsidence impliquent une analyse du modèle géomécanique. Ce modèle est constitué du réservoir, de l'overburden (roches encaissantes supérieures), de l'underburden (dessous du réservoir) et du sideburden (roches encaissantes latérales) (cf. figure 3). Le réservoir est défini par ses dimensions, son lieu, son épaisseur, sa porosité et sa pression (Zimmermann, 2011).

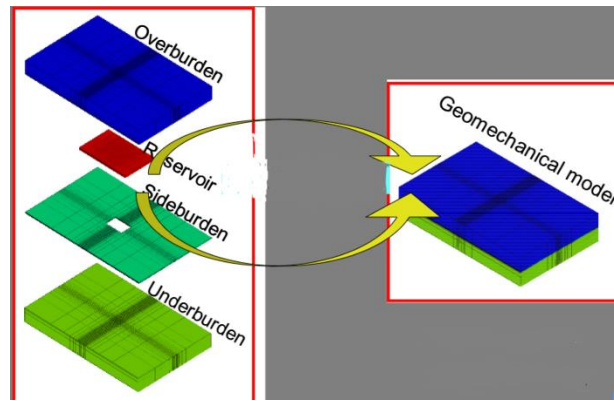


Figure 3 : Constitution du modèle géomécanique - Source : Journée MOMAS 2006 – UPPA

Lors de la compaction du réservoir, le poids de l'overburden autrefois supporté par le réservoir commence à se répartir partiellement sur le sideburden. Mais, le sideburden réputé le plus souvent pour sa stabilité grâce à son imperméabilité et/ou sa rigidité ne suivra pas le mouvement, ce qui créera le phénomène appelé l'effet d'arc, en anglais « arching effect » illustré en figure 4. Ce phénomène sera fonction de la nature des roches over- et sideburden, et aussi de l'étendue de la zone de compaction.

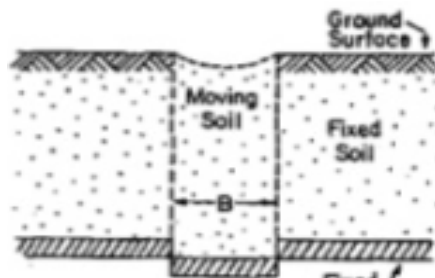


Figure 4 : Démonstration de l'effet d'arc - Source : Jithu G Francis

### I.1.2 Risques

Même si les mouvements du bol de subsidence sont le plus souvent verticaux, des mouvements horizontaux peuvent apparaître à la surface et être à l'origine de nombreuses catastrophes en mer comme en surface. Les principaux risques sont : les ruptures dans les pipelines entraînant des fuites d'hydrocarbures, la destruction des constructions en surface, la dégradation des routes, des inondations, des incidences sur le puits des forages. Face à de tels impacts, l'intérêt de l'étude de ces mouvements par des méthodes de positionnement apparaît nécessaire.

### I.1.3 Bref historique des études de subsidence

Le phénomène de subsidence est un phénomène connu depuis plusieurs années. Vers les années 20, les premières études de subsidence et de leurs conséquences sont faites aux Etats-Unis (Pratt et al., 1926). La production du pétrole et/ou du gaz en offshore a fait croître considérablement le taux de subsidence. Plusieurs cas de subsidence sont connus aujourd'hui dans le secteur *offshore* et *onshore*. L'une des premières études de subsidence a été réalisée sur le champ pétrolier Goose Creek au sud de Houston. En 1918, Gaillard Peninsula, le centre du champ pétrolier Goose Creek commence à s'enfoncer. La géologie du champ et la nature de la subsidence sont remises en cause et ce n'est que plus tard que des chercheurs feront le lien entre la production et la subsidence (Pratt WE et Johnson DW, 1926). Ils sont d'accord que la haute production du gaz et du pétrole, et la baisse de pression dans les réservoirs ont favorisé la compaction du champ et donc l'affaissement de ce dernier. Une partie du champ a été complètement ou partiellement immergée et la valeur de subsidence en cette même année a été de plus de 0.9m (cf. figure 5).

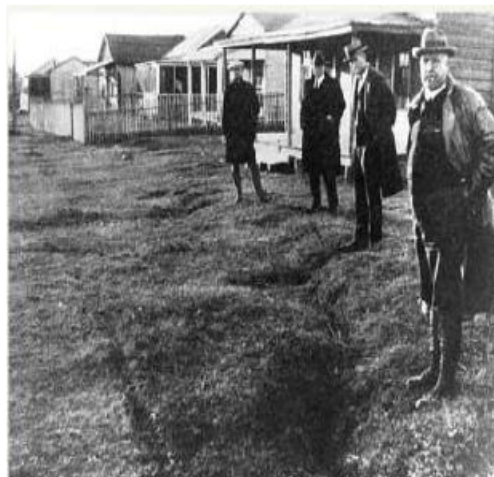


Figure 5 : Photographie de la subsidence du champ Goose Creek - Source : Galloway et al., 1999

Vers 1943, des projets de recherche concernant l'origine réelle du phénomène de subsidence ont été menés à Houston au Texas. Des spécialistes ont émis la thèse selon laquelle la subsidence serait due majoritairement à la baisse du niveau des eaux souterraines plutôt qu'à l'extraction d'hydrocarbures (Thomas L.H. et Robert L.B., 1984). Selon Kreitler (1977), c'est le cas des champs Chocolate Bayou, Mykawa et South Houston dont la subsidence serait due à la compaction de l'aquifère. Seul le champ pétrolier de Goose Creek confirme la thèse de la production du pétrole et le fait que la subsidence soit apparue avant la baisse d'eaux souterraines. Des analyses de profils de subsidence ont été faites sur chaque champ ainsi qu'une comparaison entre l'historique et la magnitude de chaque subsidence

avec des mesures enregistrées de la pression du réservoir afin d'évaluer le lien entre l'affaissement et la production d'hydrocarbures. Ces différents tests ont permis de confirmer qu'excepté le champ Chocolate Bayou, le taux de production d'hydrocarbures s'est avéré suffisant pour entraîner un affaissement.

Pour ralentir le phénomène de subsidence, une opération d'injection d'eau dans le puits a été mise sur pied communément appelée puits d'injection. En 1958, elle a été utilisée sur le champ pétrolifère Wilmington, à California, USA – découvert en 1936, le premier affaissement a été enregistré entre 1940 et 1941 de plus de 122 cm (Mayuga M.N. et Allen D.R., 1970) après la première exploitation majeure de 1939 –. En outre, ce programme a eu un impact positif sur l'économie à travers l'augmentation de la production journalière de pétrole depuis 1959. Environ 75% de la production journalière revient à l'utilisation des puits d'injection. Afin de surveiller la subsidence de ce champ, la ville de Long Beach a décidé de déployer 900 balises autour de la région concernée sur une période trimestrielle, des relevés périodiques de la pression des réservoirs sont réalisés et des marégraphes ont été installés au large de Long Beach. Aujourd'hui, de nouvelles techniques de suivi de déformation sont utilisées dans le domaine marin.

## II État de l'art

### II.1 Contexte de l'étude

Il est nécessaire pour nous de contextualiser notre étude afin de mieux comprendre les enjeux de ce mémoire.

#### II.1.1 L'Exploration-Production en milieu offshore

L'obtention d'un permis d'exploration est l'étape primordiale avant toute exploration pétrolière. Il résulte de l'accord entre la compagnie et le gouvernement du pays. Une fois le permis obtenu, le cycle d'exploration (cf. figure 6) du champ pétrolier peut commencer.

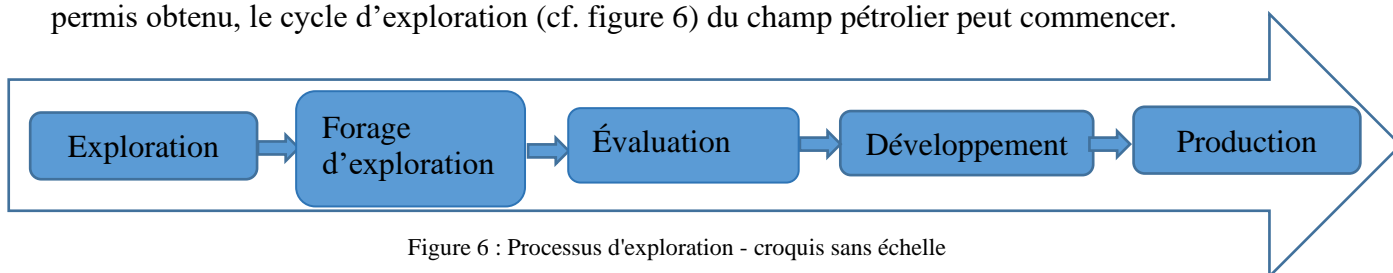


Figure 6 : Processus d'exploration - croquis sans échelle

La phase d'exploration s'appuie à la fois sur des études géologiques et géophysiques (en particulier l'acquisition sismique). L'acquisition sismique permet de cartographier le sous-sol par réflexion ou réfraction d'ondes de choc émises. Lorsque les capteurs récupèrent ces informations, la structure géologique du sous-sol peut être reconstituée en deux ou trois dimensions afin de localiser les réservoirs potentiels d'hydrocarbures. Toutefois, les études sismiques ne garantissent pas à 100% la découverte d'un gisement. Il est donc nécessaire de réaliser un forage.

Le forage permet de confirmer la présence d'hydrocarbures. Cela peut être du pétrole, du gaz ou les deux en quantités variables. Le premier forage est stabilisé par un tubage. Le diamètre du tube diminue au fur et à mesure que l'on creuse. À ces mesures de forage, on peut coupler des logs ou « diagraphies différées » pour évaluer les roches (nature, porosité...).

L'évaluation des roches consiste à effectuer des tests complémentaires (afin de connaître la quantité de pétrole) dès que le gisement est considéré valable à la production.

La phase de développement est celle durant laquelle le devis contenant le coût et le nombre d'installations annexes est établi.



Une fois tous les aspects techniques et financiers validés, la production peut commencer. Les fluides sont collectés, traités et stockés dans des cuves. Le brut est transporté par voie oléoduc (pipeline) ou par voie maritime vers les lieux de consommation.

Nous avons remarqué que l'extraction d'hydrocarbures sur plusieurs années est susceptible de créer un affaissement appelé subsidence. Dans le cas de notre étude, il sera question de mesurer cet affaissement.

### II.1.2 Les plateformes pétrolières

L'exploitation des gisements offshore nécessite la construction de plateformes pétrolières. Il en existe plusieurs : les plateformes pétrolières fixes, flottantes ou semi-submersibles.

Les plateformes fixes sont utilisées en mer peu profonde (maximum 300m de profondeur). Elles sont construites à terre puis remorquées vers le site d'exploitation. Ces plateformes s'appuient sur le fond.

Les plateformes flottantes ou semi-submersibles ont été développées pour exploiter le gisement à plus de 1500m de profondeur. Les installations de tête de puits sous-marines sont reliées par des conduites et la position du support flottant en surface est stabilisée grâce aux ancres fixées au fond de la mer.

Le cas d'étude réalisé en Angola a eu lieu sur le site de CLOV composé de quatre champs pétroliers : Cravo, Lirio, Orquidea et Violetta, dans le Bloc17.

La figure 7 illustre le FPSO (Floating Production Storage and Offloading) du champ CLOV. Les FPSO sont des structures flottantes permettant la production et le stockage temporaire du pétrole avant qu'il ne soit transporté par les navires pétroliers pour le raffinage.

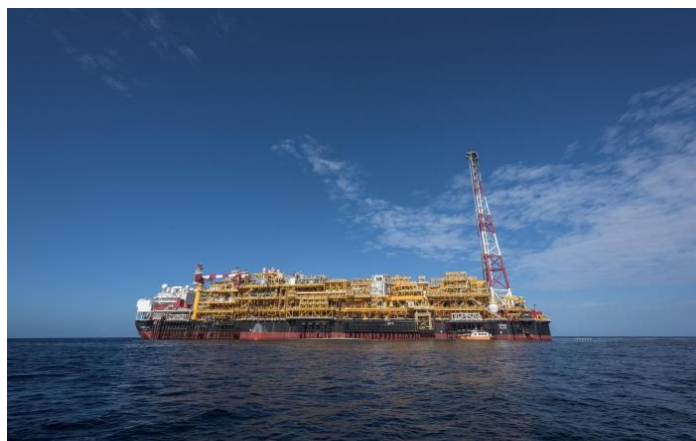


Figure 7 : FPSO CLOV mobilisée sur le bloc 17 - Source : Total, 2019

### II.1.3 Les robots sous-marins en offshore

De manière générale, les opérations offshore sont dirigées depuis des bateaux d'installation. Ces bateaux d'installation appelés Field Support Vessel (FSV) permettent de déployer et de contrôler les différentes structures sous-marines.

Les engins les plus utilisés sont les Remote Operating Vehicles (ROV) qui sont reliés à un navire en surface par un ombilical. Ce cordon permet le contrôle du véhicule à distance, son approvisionnement électrique et la transmission des informations collectées vers la surface.

Par ailleurs, il existe des systèmes autonomes appelés AUV (Autonomous Underwater Vehicle) qui sont très utilisés aujourd'hui. Les AUV représentés en figure 8 agissent de manière autonome c'est-à-dire ne sont pas reliés à la surface par un ombilical. C'est un système doté d'une caméra, d'un scanner laser et d'un sondeur multifaisceaux. Ils sont principalement utilisés pour l'inspection de différentes conduites installées, la détection de fuites ou la cartographie des fonds marins. Les données acquises sont transmises en temps réel et/ou sous forme de vidéo afin de permettre un contrôle qualité.



Figure 8 : ROV en acquisition sous l'eau - Source : 3D Techniques-Effects, 2013

## II.2 Méthodes de suivi de subsidence

Au fil des années, plusieurs méthodes de positionnement ont été développées afin d'étudier le phénomène de subsidence à différents niveaux. Ces méthodes diffèrent tant en surface qu'en sous-marin.

### II.2.1 Positionnement en surface

Actuellement chez TOTAL, les mesures de déformations sont assurées par plusieurs techniques : le positionnement par GNSS (Global Navigation Satellite System), l'InSAR (Interférométrie Radar à Synthèse d'Ouverture) et les tiltmètres. Dans cette section, nous décrirons juste les deux premières techniques.

#### II.2.1.1 GNSS

Dans cette section, je me suis inspirée en grande partie des cours qui m'ont été dispensés à l'ESGT.

Traduit en français par Système Mondial de Navigation par Satellite, il permet de fournir un positionnement en navigation terrestre et maritime. Il est basé sur des signaux émis par des satellites en orbite (à une altitude entre 20000 et 24000 km) autour de la Terre. L'objectif de ce système est de donner des informations sur la position et la vitesse de déplacement d'un mobile dans un référentiel global. Aujourd'hui, il existe quatre systèmes GNSS opérationnels ou en développement : le système GPS des États-Unis, le système russe GLONASS, le système GALILEO de l'Union européenne et le système chinois BEIDOU. Les deux premiers sont pleinement opérationnels, GALILEO est déployé mais sera opérationnel à 100% en 2020 et BEIDOU est en cours de déploiement pour 2020.

Chaque satellite envoie des signaux, de différentes fréquences aux récepteurs GNSS. Chaque système fonctionne dans une bande spectrale qui lui est définie, comme l'illustre la figure 9 ci-contre :

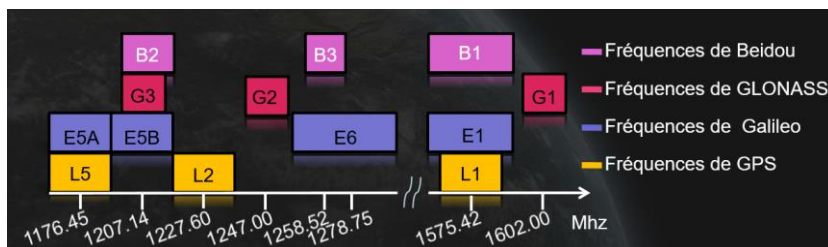


Figure 9 : Différents signaux de chaque satellite en fonction de la fréquence - Source : R. Lahaye, 2014

Ces signaux sont modulés par des codes binaires (Code C/A et code P pour le système GPS). En outre, le message de navigation contient d'autres informations à savoir : l'état du satellite, l'heure précise et la position du satellite. La mesure du code permet de calculer le temps de trajet du signal et la mesure de phase permet de déterminer, à un nombre inconnu de cycles près, le temps de parcours entre satellite et récepteur.

Le fonctionnement du GNSS est basé sur le principe de la trilatération (cf. figure 10).

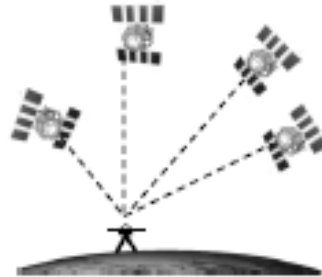


Figure 10 : Principe de la trilatération - Source : cours ESGT

Les ondes radioélectriques émises par les satellites se propagent à la vitesse de la lumière  $c \sim 3.10^8 \text{ km/s}$ . Connaissant la vitesse et le temps de propagation  $t$ , le récepteur peut calculer la distance  $D$  le séparant du satellite. Cette distance, appelée pseudo-distance, est définie par :

$$D = c \cdot t \quad (3)$$

Plusieurs sources d'erreurs viennent dégrader les signaux GNSS tels que : les erreurs d'orbite, les erreurs de décalages d'horloges satellite, les multi trajets et les erreurs atmosphériques. La solution permettant de réduire les erreurs d'orbite est l'utilisation de meilleures orbites disponibles sur le site IGS. Les autres erreurs peuvent être réduites par un traitement par simple ou double différence. Les mesures de phase réalisées par deux récepteurs sur un même satellite aux mêmes instants sont soustraites, il s'agit de la simple différence. La double différence consiste à la différence de ces simples différences lorsqu'il s'agit de deux satellites. Néanmoins, il existe d'autres méthodes permettant d'atténuer l'effet de ces mesures : la combinaison des fréquences pour les erreurs ionosphériques, l'utilisation d'une antenne à plan absorbant pour les multi trajets et l'utilisation des modèles de correction pour les erreurs ionosphériques et troposphériques.

Il existe 3 principales techniques de positionnement du GNSS : le mode navigation, le mode cinématique et le mode positionnement précis (PPP). Chacune de ces techniques présente un champ d'application précis, un mode de fonctionnement et un niveau de précision différents. La technique PPP sera brièvement décrite car elle est la mieux adaptée et la plus utilisée dans le cadre du suivi de subsidence en surface.

- **PPP (Precise Point Positioning)** : cette technique de positionnement absolu permet de monitorer la subsidence à une précision centimétrique. Son principe est basé sur le calcul de la position d'un unique récepteur en utilisant des corrections d'horloges et de satellites. Plusieurs fournisseurs qui proposaient des solutions d'augmentation ont étendu leurs offres grâce au PPP, dont VERIPOS avec les services Apex (Propriétaire) et Ultra (JPL), C-NAV avec C-Nav (1 & 2), Navcom avec Starfire, Trimble CenterPoint RTX et FUGRO avec Starfix G2 et G4 (Propriétaire) et Starfix XP (JPL). Pour leurs traitements PPP, les orbites et horloges précises peuvent être calculées soit par des centres tels le JPL soit par eux-mêmes à base de leurs propres réseaux de stations permanentes. Les précisions annoncées restent de l'ordre du décimètre.

L'utilisation de la technique PPP pour la mesure de subsidence impose des mesures continues et répétitives pendant une période définie à des endroits spécifiques. L'antenne GNSS ne doit pas être déplacée pendant toute la durée de la surveillance. Cette technique sera plus détaillée dans la partie IV.2.

- **Application PPP sur le champ YADANA**

La technique PPP temps différé a été utilisée sur plusieurs plateformes, l'une (Yadana) située au Myanmar et les autres (Franklin, West Franklin et Elgin PUQ) au Royaume Uni.

Yadana est une plateforme située au large du Myanmar. Entre 2008 et 2014, une subsidence d'environ 22 cm/an, observable en figure 11, a été mesurée. Elle était due à une haute production de gaz qui avait débuté depuis 1998. Pour mesurer cet affaissement, une antenne GNSS a été installée sur la plateforme au sommet d'une structure (cf. figure 12). Afin de confirmer l'enfoncement de la plateforme, deux autres antennes ont été installées : l'une sur le réservoir Yadana et l'autre sur un réservoir proche appelé Sein. Toutes les 30 secondes, chaque récepteur relève des données et les enregistre. Ces mesures sont transmises par Internet via un lien sécurisé à la société qui assure le traitement. Le traitement<sup>1</sup> de ces données est basé sur l'utilisation des orbites finales de l'IGS car ils fournissent une haute précision (<0.05m).

---

<sup>1</sup> Les détails du traitement se trouvent dans le document en *annexe 1*.

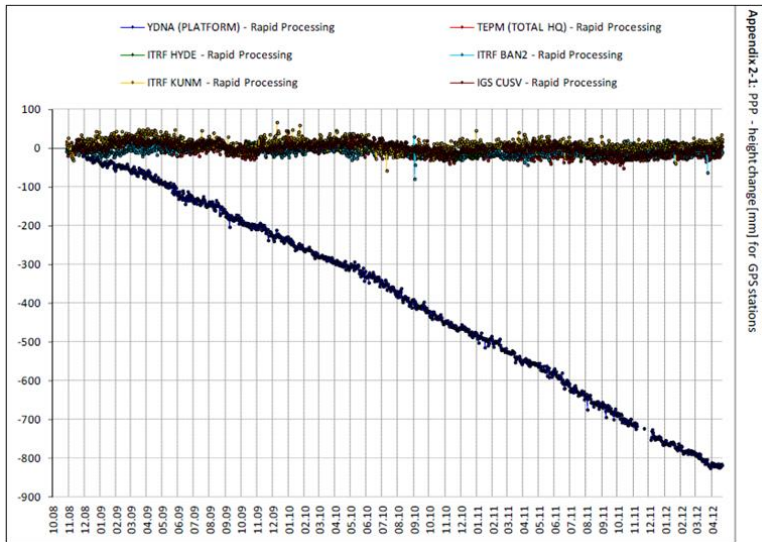


Figure 11 : Séries de temps des hauteurs estimées sur une durée de 5.5 années  
 En ordonnée, on retrouve les hauteurs en mm et en abscisse, les dates d'échantillonnages sous le format mois/année - source interne

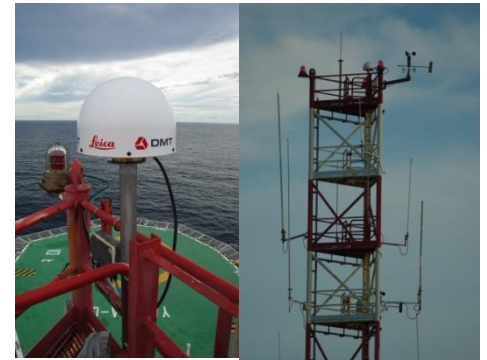


Figure 12 : Antenne GNSS - Source interne

- **Intérêts et limitations**

Les principaux avantages de la technique PPP sont :

- la détection de mouvements de l'ordre du centimètre en mer peu profonde. La précision des mesures dépendra des modèles utilisés (délais atmosphériques, orbites et horloges précises,...), du temps d'observation, du nombre et de la répartition des antennes GNSS ;
- pas besoin de récupérer les données de la base. La mise en place d'une base est inutile
- les résultats du positionnement sont donnés directement dans le système ITRF.

Les principales limitations de cette méthode sont :

- le temps de convergence qui reste long en raison de la conservation des différentes sources d'erreurs le plus souvent éliminées par doubles différences ;
- la conversion des coordonnées.

### II.2.1.2 Interférométrie radar

Cette technique spatiale permet de mesurer la déformation du sol en comparant la distance entre le satellite et le sol à différents moments d'acquisition. Le principe de l'InSAR est donc basé sur la comparaison entre deux images RSO acquises à deux dates différentes. Cette comparaison se fait à deux niveaux : premièrement, la phase et deuxièmement, l'amplitude. Ainsi, deux approches sont utilisées : l'interférométrie différentielle et l'interférométrie absolue (Yajing Yan, 2002). L'interférométrie différentielle est faite à

l'aide de la technique SqueeSAR<sup>2</sup>. On utilise les valeurs de la phase en calculant la différence de phase entre deux images (interférogramme) afin de déduire le déplacement en range. Les mouvements détectés à la surface ont une précision centimétrique, voire millimétrique. Les mesures sont faites par rapport à un point de référence localisé sur les structures voisines. Toutefois, la distance entre les plateformes et la ligne de côte (<2km) limite l'application de cette approche. Afin de pallier cela, l'interférométrie absolue est utilisée. Elle est basée sur l'amplitude entre deux images : c'est la technique de suivi de pixel, qui permet d'estimer le décalage en range et en azimuth entre les deux images. Les images utilisées sont celle acquises par le satellite TerraSAR-X permettant d'atteindre une précision centimétrique et d'obtenir des résultats dans le système ITRF (Tre Altamira, 2019).

Le champ Ekofisk est un cas d'étude traité par la société Tre Altamira. La stratégie de surveillance de ce champ a été de combiner les deux approches : les résultats issus de la technique différentielle SqueeSAR ont été calibrés avec les mesures absolues sub-pixelliques. Ces deux techniques combinées nous permettent d'obtenir une précision inférieure à 2cm/an.

Il existe une autre technique d'interférométrie appelée « Permanent Scatterer ». Elle diffère des autres techniques car elle utilise une image maitresse afin de générer une pile d'interférogrammes avec les images acquises. Cette technique repose sur l'identification de pixels stables durant toute la durée de l'étude (Matori et al., 2017).

Aujourd'hui, avec l'avancée technologique de l'InSAR dans l'industrie pétrolière, cette technique compte plus d'avantages que d'inconvénients. Elle permet de suivre l'évolution des mouvements lents à rapides sans aucune intervention humaine.

Cette technique sera utilisée par Total sur le site Tempa Rosa en Italie afin de mesurer l'affaissement du champ sur une durée d'environ 50 ans.

## **II.2.2 Positionnement sous-marin**

Dans le cas des champs de production, en eau très profonde, la configuration du réseau en mer est semblable à celle du réseau géodésique à terre. Dans le cadre de suivi de subsidence en eau très profonde, deux méthodes peuvent être utilisées : la méthode acoustique et la méthode utilisant les capteurs de pression.

---

<sup>2</sup> Technique développée par la compagnie Tre Altamira.

### II.2.2.1 Positionnement acoustique

Sous l'eau, les ondes électromagnétiques ne peuvent pas être exploitées à cause du caractère dissipatif lié à la forte conductivité de ces dernières. Une solution à ce problème a été trouvée, celle de l'utilisation des ondes acoustiques qui se propagent de manière favorable dans l'eau de mer.

Dans l'industrie offshore, trois méthodes sont généralement utilisées :

- la méthode LBL (Long Baseline) ;
- la méthode SBL (Short Baseline) ;
- la méthode USBL (Ultra Short Baseline).

Pour notre étude, seule la méthode LBL sera développée car elle reste la plus précise.

Selon Lekkerkerk et Theijis (2017), le terme *long baseline* fait référence au fait que la distance entre les transpondeurs est de plus de 100m. Cette distance varie en fonction de la profondeur de l'eau. La méthode LBL est très complexe à mettre en place car elle requiert un grand nombre d'équipements.

Elle consiste à déployer un réseau de transpondeurs sur le fond marin afin de réaliser des mesures de trilatération entre au moins trois transpondeurs. Un quatrième transpondeur est rajouté pour le contrôle. Ces transpondeurs peuvent être positionnés ou non sur des supports préinstallés connues en coordonnées.

La figure 13 ci-dessous montre la cartographie d'un réseau LBL. Au fur et à mesure que les transpondeurs supplémentaires sont rajoutés au réseau, le temps de mesure de lignes de base augmente. L'intervisibilité entre les transpondeurs voisins est nécessaire afin de garantir une bonne qualité des mesures. Le but étant d'avoir une redondance de mesures afin d'assurer un bon contrôle qualité (QC).

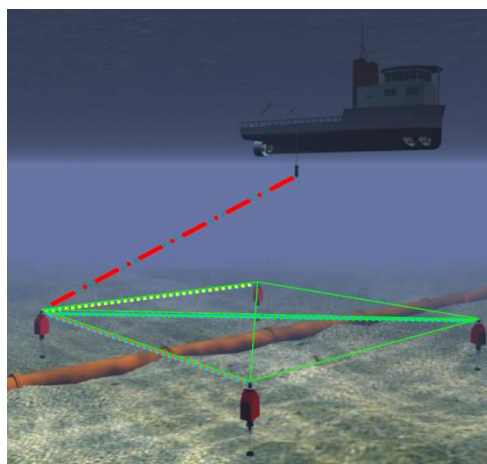


Figure 13 : Principe d'un réseau LBL (la ligne rouge illustre le signal acoustique envoyé par l'hydrophone au transpondeur et la ligne verte représente l'interrogation mutuelle de chaque transpondeur dans le réseau - source : Donald Thomson, 2005



Le principe du positionnement LBL est le suivant : un signal interrogatif commun est transmis à tous les transpondeurs par un hydrophone normalement installé sous le bateau ou sur un ROV. À la réception de ce signal, chaque transpondeur répond sur une fréquence propre par un signal individuel appelée IRS (Individual Reply Signal). Ainsi, il est possible de mesurer directement le temps aller-retour entre l'hydrophone et chaque transpondeur, et en déduire la distance :

$$D = Ct \quad (4)$$

$$2t = T - TAT \quad (5)$$

avec TAT (Turn-Around-Time), le délai de réponse du transpondeur en secondes (incluant le délai de détection du signal), T le, temps de trajet total mesuré en seconde, C la vitesse de propagation en m/s et D la distance en m.

De manière générale, la méthode LBL est utilisée d'une part pour sa haute précision de l'ordre du centimètre et d'autre part, pour le fait qu'elle soit indépendante de la profondeur de l'eau. Cependant, certains éléments doivent être pris en compte lors du positionnement à l'instar de la vitesse du son qui intervient dans le calcul de la distance. Elle varie en fonction de la profondeur de l'eau. Plusieurs méthodes permettent de mesurer la vitesse du son à savoir : la méthode CTD, la méthode SVP et la méthode SVS. Pour avoir des mesures très précises, les méthodes SVP et SVS sont utilisées car elles mesurent le temps de trajet d'un signal acoustique à un point connu, ce qui permet de déduire la vitesse du son exacte. Quant à la méthode CTD, elle sert à mesurer les facteurs environnementaux comme la pression, la salinité et la température de l'eau. Ces trois valeurs permettent de calculer la vitesse du son. Un mauvais calcul entraîne donc automatiquement une vitesse faussée. Cette méthode est la moins précise.

### **II.2.2.2 Utilisation des capteurs de pression**

Les capteurs de pression n'ont pas encore été utilisés chez TOTAL dans le cadre d'un suivi de déformation en mer profonde sur une longue durée. Ils sont intégrés en option lors de la construction des transpondeurs acoustiques afin de mesurer le déplacement vertical utilisé pour la surveillance des structures sous-marines. Cependant, la précision de ce type de capteurs ne garantit pas l'obtention d'une précision inférieure à 5cm des mesures.

L'apport d'un capteur de pression en milieu sous-marin serait de mettre en place un réseau de surveillance autonome de déformations, sans avoir besoin de garantir une inter visibilité entre chaque capteur. Sachant que chaque capteur fournit des informations en un seul point, la précision du champ mesuré sera fonction du type et du nombre de capteurs.

## II.3 Capteurs de pression

En dehors de la méthode acoustique, la mesure de pression fait partie des techniques les plus utilisées pour mesurer la subsidence d'un champ en eau très profonde. Eiken et al (2000) ont développé une technique permettant de mesurer le déplacement vertical des fonds marins en déployant un réseau de capteurs de pression de haute précision. Ces capteurs devront être placés à l'intérieur et à l'extérieur de la zone de subsidence. Cette technique a été appliquée sur le champ Ormen Lange en Norvège afin de mesurer sa subsidence entre 2012 et 2014. Seulement, malgré la haute précision de cette méthode (<1cm), elle s'est avérée très coûteuse à cause de l'utilisation abondante de ROV pour déplacer les capteurs ; premièrement parce qu'ils n'étaient pas compatibles à un suivi sur une longue durée et deuxièmement pour caractériser leurs dérives. Afin de pallier ce problème, des chercheurs ont décidé de fabriquer des capteurs qui seront installés de manière permanente et capables de prendre des mesures continues sur une longue durée d'étude.

### II.3.1 Principe des capteurs de pression

Comme pour la méthode acoustique LBL, les capteurs de pression sont déployés à l'aide d'un ROV soit sur un réseau de stands soit directement au fond de l'eau. Le principe est essentiellement basé sur la mesure de pression et de température. Il existe plusieurs types de capteurs de pression selon leur utilité. Dans le cas de la mesure de subsidence en eau très profonde, on n'en distinguera que deux : les PMTs<sup>3</sup> (Pressure Monitoring Transponder<sup>®</sup>) et les AZA Fetch<sup>3</sup> (Ambient Zero Ambient<sup>®</sup>). Ces deux types de capteurs de pression ont été utilisés lors du cas pratique en Angola (voir partie III.2), raison pour laquelle cette partie est plus développée que celle portant sur la méthode acoustique.

#### II.3.1.1 Pressure Monitoring Transponder<sup>®</sup>

Comme le décrivent Bourne et al (2009), les PMTs<sup>®</sup> sont des capteurs de pression installés de manière permanente sur le fond marin et qui mesurent la pression à une fréquence donnée pendant plusieurs années. Ils sont autonomes (durée de vie de la batterie d'environ

---

<sup>3</sup> Marque créée par Sonardyne

15 ans en fonction du taux d'échantillonnage) et capables de transmettre les données mesurées à la surface par télémétrie (Sonardyne, 2018). Leur principal avantage est qu'une fois les appareils déployés au fond de l'eau, l'utilisation de ROV n'est plus nécessaire.

La profondeur de l'eau est calculée grâce à la pression absolue ( $P_{abs}$ ) mesurée par ces capteurs. En effet, la densité de l'eau ( $\rho$ ) ainsi que la pression atmosphérique ( $P_{atm}$ ) sont connues, ce qui permet d'en déduire la profondeur de l'eau en fonction de la gravité. L'expression est la suivante :

$$h = \frac{P_{abs} - P_{atm}}{\rho g} \quad (6)$$

Bien que ces appareils soient d'une haute précision ( $\sim 4-5$  cm) et permettent un déploiement à faible coût pour une étude sur plusieurs années, ils dérivent à long terme. Cette dérive peut être égale ou supérieure à la subsidence (entre 2 et 20 cm à une profondeur de 2000 m). Par exemple, sur le champ Ormen Lange, une dérive d'environ 2 cm/an a été observée sur une étude faite pendant plus de 5 ans (Dunn et al., 2016). En effet, la fabrication des PMTs<sup>®</sup> ne permet pas de prendre en compte cette dérive lors des mesures. Il faudrait donc réaliser une calibration afin d'identifier les caractéristiques de la dérive sur une longue durée (voir paragraphe II.3.1.3).

### II.3.1.2 Ambient Zero Ambient<sup>®</sup>

L'AZA<sup>®</sup> a été développé par Sonardyne afin de pallier aux insuffisances des PMTs<sup>®</sup>. Il permet de mesurer l'affaissement du fond marin en prenant en compte cette fois-ci le phénomène de dérive. Ce type de capteur présente l'avantage de pouvoir mesurer des déplacements verticaux d'1 cm/an et peut être déployé à plus de 6000 m de profondeur. Afin de mieux comprendre le fonctionnement d'un AZA<sup>®</sup>, il est nécessaire de connaître les composants de son verre protecteur observable en figure 14.

Un Ambient Zero Ambient est composé des éléments suivants :

- 3 capteurs de pression :
  - ✓ Capteur de pression ambiante encore appelée HPS (High Pressure Sensor) qui est continuellement exposé à la pression ambiante extérieure ;
  - ✓ Capteur de basse pression encore appelé LPS (Low Pressure Sensor) ;
  - ✓ Capteur primaire encore appelée TPS (Transfer Pressure Sensor) utilisé pour comparer les deux autres capteurs.
- 2 valves utilisées pour séparer les différents capteurs lors des mesures :

- ✓ Valve à pression ambiante encore appelée A Valve ;
  - ✓ Valve à pression zéro encore appelée Z Valve.
- Pompe d'ajustement de pression qui permet de contrôler la pression dans le collecteur appelé « manifold ».

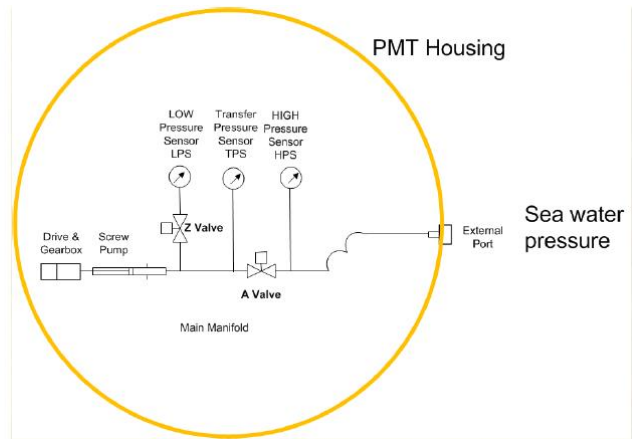
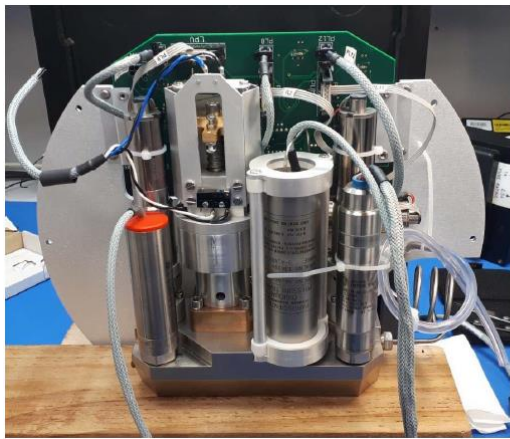


Figure 14 : Composantes principales d'un AZA® – Source : EAGE, 2019

En mode opératoire normal, l'A Valve (V-2) est ouverte et la Z Valve (V-1) est fermée ; cela signifie que les capteurs HPS et TPS sont tous les deux connectés au milieu ambiant extérieur et donc mesure la pression ambiante. C'est l'état 1 visible en figure 15.

Lorsque la mesure de référence est initiée, la valve V-2 est fermée et le piston de la pompe est retiré réduisant la pression dans le manifold jusqu'à ce que celle-ci soit proche de 0. Il s'agit de l'état 2 (cf. figure 15).

À ce moment, nous pouvons ouvrir la valve V-1 (état 3). Le biais du capteur HPS peut donc être mesuré par le capteur de basse pression. Ceci permet d'éliminer la dérive du capteur.

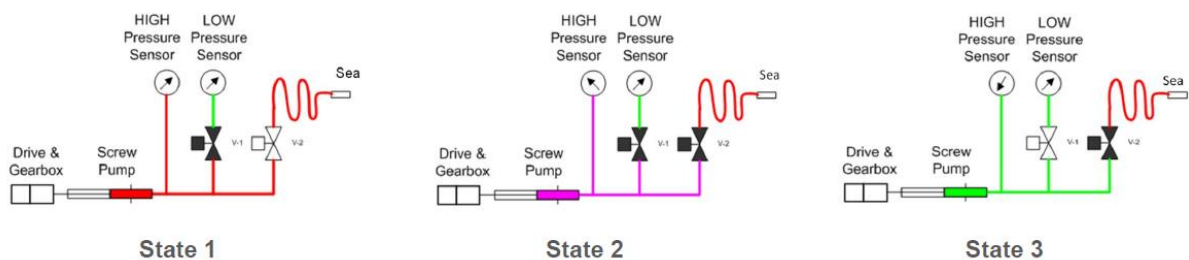


Figure 15 : Fonctionnement du mécanisme AZA® – Source : EAGE, 2019

Dès que le procédé est terminé, la valve V-1 est fermée et le piston de la pompe s'élargit afin de ramener la pression du manifold à l'état ambiant. Par conséquent, la valve V-2 s'ouvre et expose le TPS au milieu extérieur. Le cycle peut recommencer.

### II.3.1.3 Correction des mesures de pression

La dérive peut être définie comme étant la variation de signal d'un capteur causée par l'effet du temps. Il existe plusieurs méthodes capables de corriger la dérive d'un capteur in situ, mais dans notre cas nous ne nous limiterons qu'à trois principales méthodes :

- Étalonnage à long terme en laboratoire, qui doit être fait avant le déploiement des appareils au fond de l'eau. L'expérience consiste à placer les capteurs de pression dans des conteneurs soumis aux mêmes conditions de température et de pression que le champ à mesurer (cf. figure 16). Elle dure environ 4 mois et permet de mesurer la dérive du capteur. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet également de pré-évaluer la qualité et la performance des capteurs qui seront utilisées. Tout capteur présentant une anomalie sera retiré. Cette expérience peut aussi être réalisée après le déploiement sous l'eau afin de faire une comparaison des taux de dérive observés.

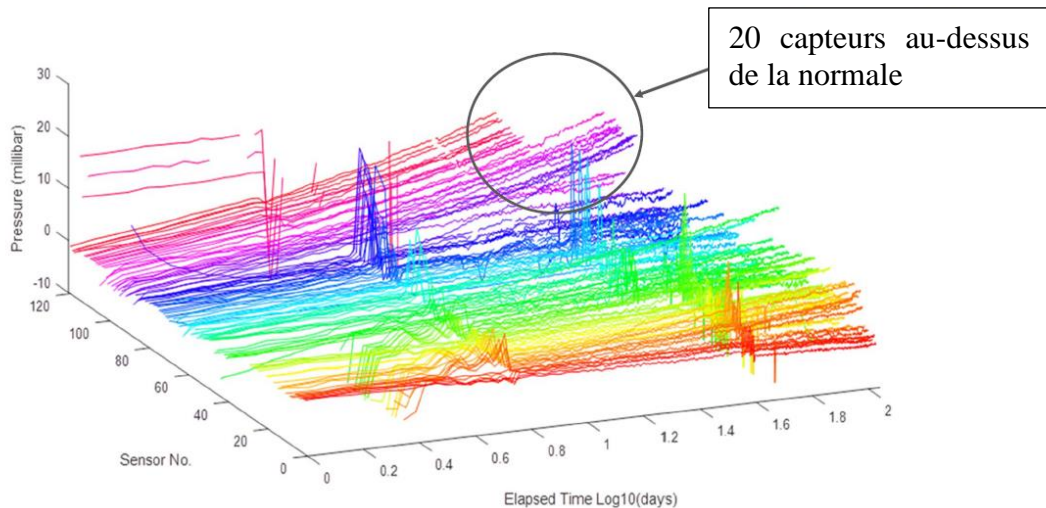


Figure 16 : Expérience réalisée sur 120 capteurs soumis aux mêmes conditions pendant plusieurs mois afin de déterminer les caractéristiques de la dérive et la qualité des capteurs. Chaque couleur correspond à un capteur. Les pics font référence à la perte d'informations lors des tests. - Source : Geophysical Society of Houston, 2018

- Organisation d'une campagne de ROV afin d'étalonner occasionnellement les capteurs au fond de l'eau. Pour cela, les capteurs sont déplacés d'un repère à l'autre à l'aide d'un ROV et la dérive est déterminée en occupant de manière répétitive un ou plusieurs repères de référence (Sasagawa et Zumberge, 2013).
- Méthode SCPR « Self-Calibrating Pressure Recorder » qui permet de mesurer la dérive en étalonnant les capteurs à l'aide d'une balance manométrique incorporée dans chaque appareil. La différence entre la dérive et le déplacement vertical réel est faite en étalonnant les capteurs périodiquement grâce à un jeu de valves (Sasagawa et Zumberge, 2013).

### II.3.2 Sources d'erreurs

Les mesures de pression peuvent être entachées d'erreurs (cf. figure 17):

- Biais, qui produit un écart constant entre la valeur mesurée et celle mise en entrée ;
- Facteur d'échelle, qui produit un écart proportionnel à la valeur mesurée. Il est plus ou moins fonction de la valeur observée.

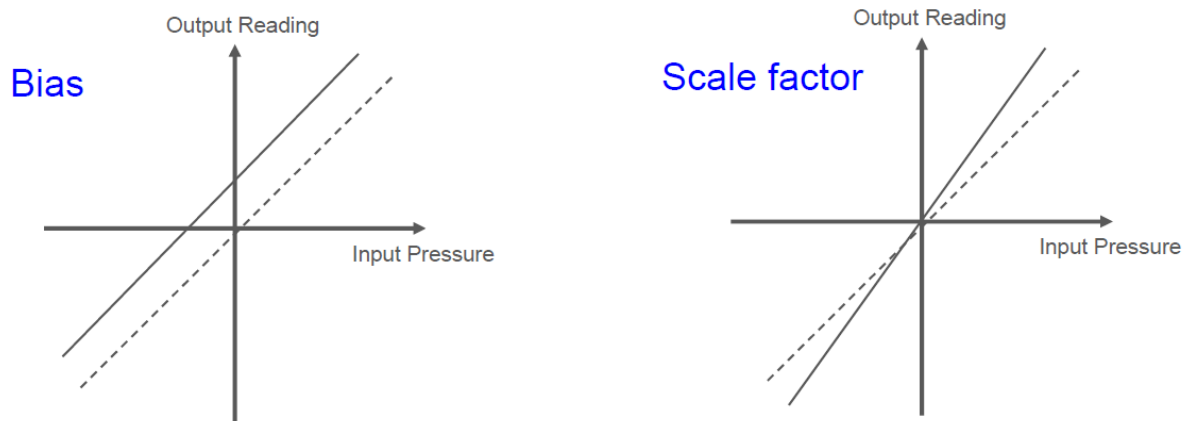


Figure 17 : Différences entre la position entachée d'erreur et la position vraie - Source interne

### II.3.3 Applications des capteurs de pression

Ils existent plusieurs types de capteurs de pression à des applications variées (aéronautiques, automobiles, etc.). Les PMTs<sup>®</sup> et AZAs<sup>®</sup> ont été développés pour mesurer directement les mouvements dans le fond marin, allant jusqu'à plusieurs kilomètres. Aujourd'hui, ils permettent de mesurer des mouvements tectoniques à vitesse lente et ceux à vitesse rapide.

Dans le domaine de l'océanographie, ils sont utilisés pour la surveillance des séismes et des tsunamis dans des pays comme les États-Unis, le Canada et le Mexique.

Ces capteurs ont contribué à la mesure des glissements sous-marins sur le flanc submergé du mont Etna en Italie, le plus actif en Europe.

### III Mise en place d'une application concrète sous-marine

Le cas pratique a été réalisé en Angola, sur le champ pétrolier de CLOV. Le but de ce cas pratique est de faire une étude de faisabilité et d'évaluer les résultats issus des différents scénarios.

#### Présentation de la zone d'étude

CLOV est un champ pétrolier qui se situe à 140 km au large des côtes angolaises, au Nord-Ouest de Luanda, dans le bloc 17. Il est opéré par un FPSO sur les réservoirs de Cravo, Lirio, Orquidea et Violetta. Ces réservoirs contiennent des huiles aux caractéristiques différentes datant soit du miocène (18 millions d'années), représentant  $\frac{1}{4}$  de la production soit de l'oligocène (26 millions d'années), représentant  $\frac{3}{4}$  de la production.

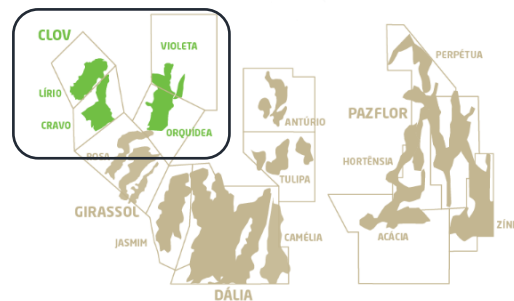


Figure 18 : Localisation du FPSO CLOV (squirrelle noir) par rapport aux autres champs - Source : Total, 2018

L'étude a eu lieu sur les parties Nord Est et Sud Est, à cheval sur les champs Orquidea et Violetta à une profondeur d'environ 1300m. Le but de cette étude est de surveiller et de mesurer cet affaissement. Pour ce faire, une première méthode, basée sur l'acoustique a été réalisée avec la société Sonardyne. Les difficultés rencontrées lors de nos traitements nous ont conduites à la mise en place d'une deuxième méthode, celle des capteurs de pression.

#### Contexte et préparation de l'étude

L'entreprise qui nous a accompagnés dans la réalisation de ce cas pratique s'appelle Sonardyne. Le choix de cette entreprise se justifie par le fait qu'elle possède une certaine expérience dans la surveillance des déformations en mer sur une longue durée. En effet, Sonardyne est une entreprise anglaise spécialisée dans le domaine de la navigation, du positionnement acoustique et de la communication sous-marine sans fil. Elle a élargi son champ d'application par la commercialisation de ses propres transpondeurs et capteurs de pression. Ces transpondeurs et/ou capteurs de pression sont déployés au fond de l'eau afin de réaliser une surveillance autonome sur une longue durée.

L'étape suivante est le choix de la zone d'essai. Entre 2012 et 2017, des géophysiciens ont réalisé une étude sismique 4D sur le champ CLOV<sup>4</sup>, bloc 17. L'analyse des données avec le logiciel Sismage a révélé un déplacement altimétrique d'environ 25 cm sur 5ans (cf. figure 19). La zone d'affaissement forme un polygone de dimensions 4km en largeur et 5 km en longueur.

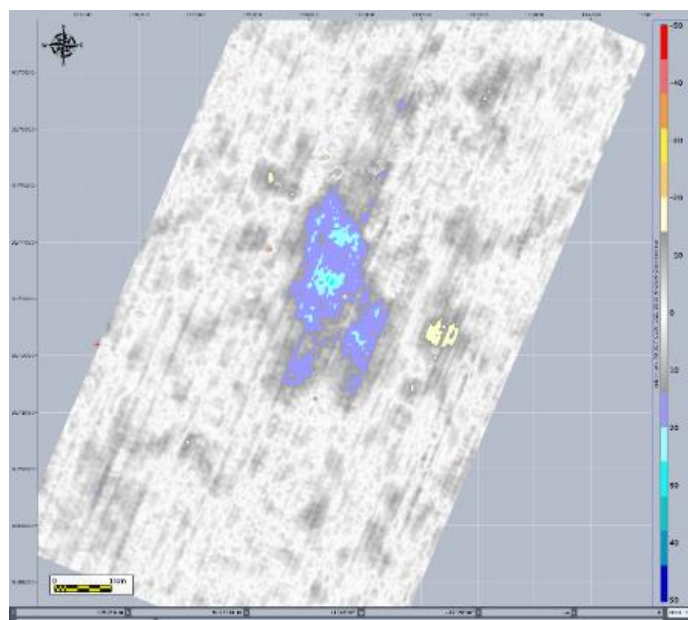


Figure 19 : Schéma illustrant l'évolution de la subsidence issue d'une étude sismique

Face à cet enfoncement, plusieurs échanges ont eu lieu avec l'équipe des géophysiciens afin de fixer les objectifs de cette étude :

- Relever des mesures précises du fond de mer avec des équipements capables de mesurer un déplacement d'environ 5 cm/an (2-sigma) sur une durée de 10 ans.
- Produire un MNT d'une précision altimétrique de 5 cm. Ce MNT sera utilisé pour suivre l'évolution de la subsidence sur l'ensemble de la zone.

Ces objectifs ont permis à Sonardyne de nous proposer différentes méthodes de suivi de subsidence ainsi que le matériel à utiliser. Il est important de noter que cette étude est conduite en vue d'une réalisation future, aucune réalisation concrète n'a été faite sur le terrain. Ainsi, nous cherchons à mieux anticiper le phénomène de subsidence en mer ainsi que ses conséquences néfastes. Cette étude pourra être utilisée comme référence pour les futurs travaux.

---

<sup>4</sup> La fiche du système géodésique employé sur CLOV se trouve en *annexe 2*.



### III.1 Simulation par méthode acoustique LBL

L'état de l'art a permis de mettre en exergue les avantages et limitations de chaque technique permettant de mesurer la déformation. La méthode acoustique LBL a été la première simulation réalisée sur le champ CLOV Angola. Cette technique est très maîtrisée par Total qui l'utilise pour faire du positionnement en mer.

#### III.1.1 Brève description du travail réalisé

Les quatre étapes d'une opération LBL sont : la planification du réseau, le déploiement des capteurs au fond de l'eau, la calibration et le suivi des données.

La 1<sup>ère</sup> étape consiste à établir un plan du réseau. Nous aurons besoin de plusieurs informations à savoir :

- La bathymétrie de la zone qui permet de cartographier la topographie du fond de mer. Cette bathymétrie est obtenue à l'aide des sondeurs multifaisceaux installés sur des navires et robots sous-marins ;
- Le profil de célérité qui représente la vitesse du son en fonction de la profondeur. Cette information permet de prévenir les sources d'erreurs dues aux trajets multiples et au phénomène de réfraction. La fonction première de la vitesse du son est de convertir une information de temps de propagation en distance. Il permet de calculer jusqu'à quelle distance l'onde acoustique peut se propager et donc de déduire la longueur maximale de ligne de base entre deux transpondeurs ;
- La profondeur de l'eau et la durée de l'étude.

Ces informations nous ont été fournies par les membres de TOTAL E&P Angola. Une fois toutes les informations collectées, j'ai pu commencer le traitement.

- Détermination de la longueur de la ligne de base maximum entre chaque transpondeur : elle a été calculée avec le logiciel RayTrace de Sonardyne. Ainsi, nous avons limité nos distances à 1200 m entre chaque transpondeur car au-delà, la trajectoire du signal commence à être fortement déviée<sup>5</sup>. En effet, en analysant les profils de célérité<sup>6</sup>, nous nous sommes rendu compte du changement de la vitesse

---

<sup>5</sup> L'annexe 3 illustre la trajectoire d'un signal acoustique entre deux transpondeurs réalisée par Sonardyne.

<sup>6</sup> Un exemple de profil de célérité a été mis en annexe 4.

du son en fonction de la profondeur de l'eau, manifesté le plus souvent sous forme de réfraction. La réfraction se définit comme étant le phénomène par lequel la trajectoire d'un signal acoustique est modifiée suite au déplacement du signal à travers des couches de densités différentes. Autrement dit, la trajectoire aura tendance à former une courbe.

- Répartition des transpondeurs sur l'ensemble de la zone : avec Sonardyne, nous avons décidé d'installer des capteurs à l'intérieur et à l'extérieur de la zone de subsidence. Ceux qui seront disposés à l'extérieur c'est-à-dire sur le terrain stable serviront de contrôle pour les mesures. Peu importe leur emplacement, il doit toujours exister une intervisibilité entre les capteurs. Afin d'optimiser nos solutions, nous avons décidé d'exploiter au maximum possible le réseau de supports installé antérieurement sur le champ lors des mesures de positionnement.

Cependant, nos traitements se sont limités à cette première étape. Nous nous sommes rendu compte que cette méthode était la moins adaptée pour atteindre nos objectifs.

### **III.1.2 Difficultés rencontrées**

Durant ce traitement, nous avons fait face à plusieurs difficultés.

Premièrement, certaines lignes de base étaient obstruées par la présence de structures sous-marines, d'une hauteur de 8m, installées auparavant pour l'exploitation (par exemple, les oléoducs ou « pipeline », les collecteurs, ...) d'hydrocarbures (cf. figure 20). En effet, les transpondeurs installés autour de ces structures ne pouvaient pas s'interroger. Afin de résoudre le problème, deux solutions ont été proposées, soit rajouter de nouveaux transpondeurs au réseau de départ soit modifier l'emplacement des stands déjà existants afin de permettre que les transpondeurs qui y seront montés puissent se voir et s'interroger mutuellement. Toutefois, peu importe la solution choisie, cela rapporte un coût supplémentaire à l'étude.

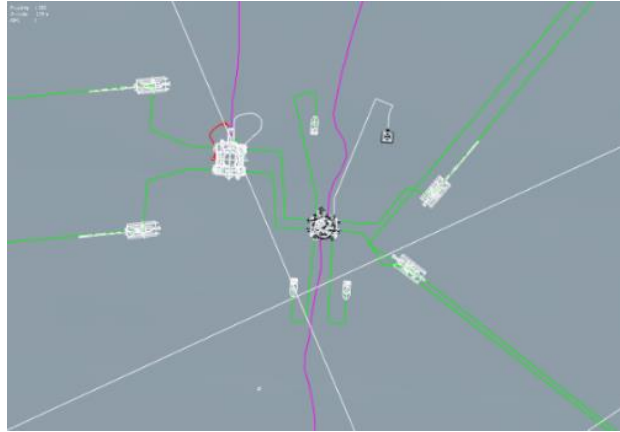


Figure 20 : Capture d'écran de deux lignes de base (lignes blanches) passant à travers des structures sous-marines (sans échelle). Les lignes vertes et roses représentent les canalisations servant au transport d'hydrocarbures et les petits objets en blanc représentent les collecteurs.

Deuxièmement, en analysant la bathymétrie de la zone, nous nous sommes rendu compte que le fond marin avait une dénivelée relativement faible (pente  $\sim 4\%$ ). L'obtention d'une précision des mesures à 5cm/an serait donc compliquée. En effet, les transpondeurs mesurent la distance oblique par méthode acoustique ; puisque la dénivelée du champ n'est pas assez prononcée, cette distance oblique peut être confondue à la distance horizontale.

Suite à ces deux difficultés, nous avons décidé de nous tourner plutôt vers la méthode des capteurs de pression qui est moins complexe et moins coûteuse par rapport à la méthode LBL.

## **III.2 Simulation par capteurs de pression**

### **III.2.1 Étude géologique du fond marin**

L'application de cette méthode nécessite la connaissance de la composition du fond marin. En effet, cela permettrait d'une part, de choisir les équipements adaptés au type du sol dans le but de garantir leur stabilité et d'autre part, d'orienter le choix du lieu d'installation de chaque transpondeur. Nous privilégierons des endroits dont l'affaissement est dû au phénomène de subsidence et non à d'autres phénomènes naturels (par exemple mouvements de sables,...).

Des essais géotechniques et géophysiques tels que la teneur en eau, les mesures de résistance au cisaillement et l'analyse à l'hydromètre ont permis d'affirmer que le fond marin de CLOV est constitué majoritairement d'argiles très fines (C&C Technologies, 2009). Ce sont des roches imperméables et très peu poreuses. Ces tests ont été menés par C&C Technologies à la demande de Total.

### **III.2.2 Densité des points**

#### **III.2.2.1 Description du problème**

Dans le cadre de suivi de subsidence, chaque capteur mesure la donnée à des lieux spécifiques. En d'autres termes, chaque PMT/AZA (voir partie II.3 ci-dessus) fournit des informations en un seul point. La surveillance d'une zone étendue nécessitera donc un échantillonnage conséquent. Deux hypothèses se présentent : soit faire un maillage régulier pour assurer une couverture entière, soit installer les capteurs à des points spécifiques et calibrer les mesures absolues de profondeur obtenues avec une étude sismique. Ces deux scénarios seront détaillés dans le paragraphe III.2.3 ci-dessous.

Lors du premier essai par la méthode acoustique, nous nous sommes rendu compte que le premier polygone qui nous a été fourni avait été surestimé c'est-à-dire qu'il contenait à la fois la partie qui s'affaisse et la partie stable. Il a été nécessaire de redéfinir ses dimensions à 4km en longueur et 2km en largeur afin de réduire le nombre d'équipements qui seront utilisés.

### **III.2.2.2 Choix d'une technique d'interpolation**

Comprendre l'interpolation facilite le choix judicieux du nombre et de la position des points à lever. Dans plusieurs domaines, la connaissance d'une valeur inconnue en un point défini sans mesure directe est un problème très récurrent surtout lorsque l'étude d'un phénomène s'étend sur une longue période. En effet, qu'il s'agisse des raisons économiques (mesure coûteuse) ou logistiques (accès au point limitée), l'échantillonnage est toujours limité : d'où la nécessité d'interpoler à partir d'observations proches<sup>7</sup>.

Les données qui seront relevées prochainement sur le terrain seront traitées par la méthode d'interpolation du krigeage car c'est la méthode d'interpolation la plus intéressante. Cette technique tient compte de la répartition des points entre eux ainsi que de la taille du champ à échantillonner. Les règles de pondération des données voisines ne sont plus uniquement basées sur la distance mais plutôt du comportement spatial de la donnée.

Toutefois, pour notre simulation, je vais utiliser plutôt la méthode d'interpolation par triangulation de Delaunay qui est proposée par Qgis.

### **III.2.3 Traitements réalisés**

Cette partie détaille les étapes nécessaires à l'établissement d'un scénario techniquement faisable et économiquement viable. Nous avons choisi de mettre en place deux scénarios. Chaque scénario a été détaillé ci-dessous. Les étapes se réfèrent au traitement que j'ai réalisé dans le but de comparer les résultats obtenus avec ceux de la société Sonardyne.

#### **III.2.3.1 Réalisation d'un maillage régulier**

##### ***III.2.3.1.1 Évaluation technique***

Cette étape a différé selon les traitements.

Sonardyne s'est basée sur leur expérience sur différents projets à l'instar de celui de Shell sur le champ Ormen Lange en Norvège, pour définir le nombre et l'emplacement de chaque point à échantillonner. Le traitement des données de température et de pression nécessite une certaine redondance. En d'autres termes, le champ doit être sur-échantillonné pour déterminer adéquatement la valeur de la subsidence annuelle dans un contexte où sont présents le bruit ambiant et la dérive de capteurs. Dans le but de fixer un niveau de référence

---

<sup>7</sup> Toutes les méthodes d'interpolation ont été décrites en *annexe 5*.

à partir duquel les autres mesures s'appuieront, nous avons décidé de placer 4 capteurs à l'extérieur de la zone d'affaissement. Pour optimiser nos solutions, nous avons décidé d'exploiter au maximum le réseau de supports déjà présents. Ces supports ont été installés antérieurement lors des mesures de positionnement pour pouvoir forer les différents puits. Ainsi, Sonardyne a réalisé une simulation avec 14 capteurs donc 4 situés en zone stable illustrée en figure 21.

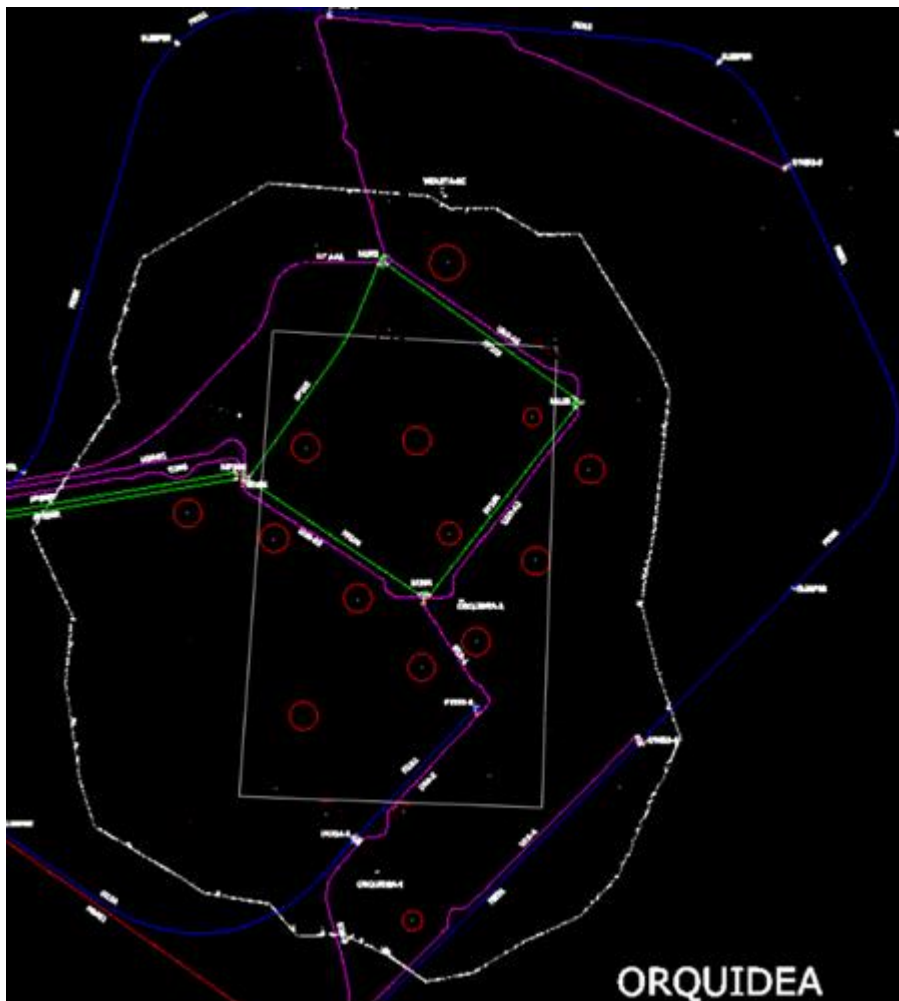


Figure 21 : Design d'un réseau de capteurs de pression issu des calculs de Sonardyne (le rectangle en blanc délimite la zone d'affaissement, les cercles rouges avec un point blanc au centre représentent les différents capteurs installés sur des supports déjà existants et ceux sans points désignent les capteurs qui seront installés directement au fond de l'eau).

Une enquête a été menée auprès de l'équipe de Géophysique pour connaître à quelle résolution il serait intéressant pour eux d'obtenir un modèle numérique de terrain. Cette résolution va permettre de définir la distance séparant chaque point échantillonné. Les résultats de cette enquête imposent une résolution définie à 100m afin d'obtenir une bonne visibilité en cas d'affaissement brusque du champ. Ainsi, deux hypothèses se présentent : soit espacer chaque capteur de 100m et obtenir des mesures absolues à chaque point échantillonné soit distancer chaque capteur d'un multiple de 100 (200, 300, ...) et faire une

interpolation tous les 100m. Chaque résolution utilisée permettra de déterminer le nombre de capteurs nécessaires pour couvrir toute la zone. Il est inutile d'utiliser 300 capteurs pour couvrir une zone fournissant le même résultat que si on n'avait utilisé que 60.

Nous avons réalisé deux tests avec des résolutions différentes, l'une fixée à 200m et l'autre à 500m. Tout d'abord, je me suis servie du logiciel AutoCAD pour placer arbitrairement les différents points qui seront échantillonnés et ainsi recueillir leurs coordonnées (East, North). Sachant que nous travaillons en 2D, nous avons décidé de tracer des courbes de niveau manuellement afin d'estimer une valeur Z de chaque point. Ces courbes sont tracées sous forme de cercles de rayon égal à 300m incrémenté par cette valeur à chaque tracé. L'équidistance entre chaque courbe de niveau est de 10mm. Une fois les coordonnées Z obtenues, les points sont importés dans le logiciel Qgis afin de simuler un MNT par interpolation. Le MNT nous aidera dans le choix de la meilleure résolution. La technique d'interpolation utilisée est celle proposée par Qgis à savoir la triangulation Delaunay ; l'outil utilisé est « Interpolation TIN ».

Une résolution à 200m impose un réseau d'au moins 178 capteurs pour couvrir toute la zone tandis qu'une résolution à 500m va exiger un déploiement de 30 capteurs. Un exemple de maillage régulier a été représenté en figure 22.

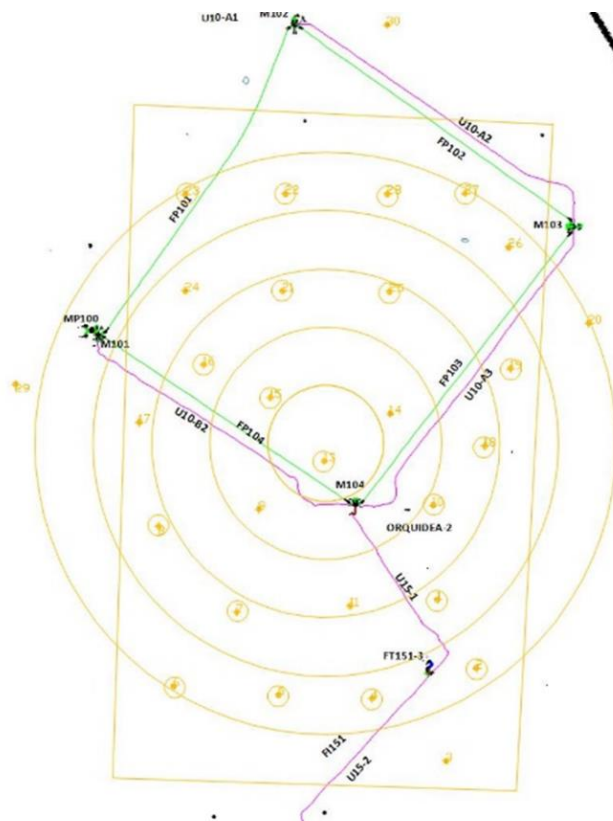


Figure 22 : Capture d'écran d'un réseau de 30 transpondeurs : les points entourés de petits cercles représentent les capteurs installés directement au fond de l'eau et le reste représente ceux installés sur les stands existants ; les grands cercles représentent les courbes de niveau tracées avec AutoCAD.

Les résultats de chaque test sont illustrés ci-dessous (cf. figure 23). À première vue, nous constatons que les cercles tracés à la main sur AutoCAD correspondent plus ou moins aux cercles tracés par Qgis par interpolation. Ensuite, nous observons que quelque soit la valeur de résolution choisie, Qgis est capable de tracer des courbes de niveau jusqu'à 40-50 mm. Le MNT nous permet donc de suivre l'évolution de l'affaissement du champ jusqu'à 5 cm. Sachant que le champ CLOV est assez plat et le bol de subsidence assez homogène, il n'est pas nécessaire d'installer plus de capteurs car cela rajouterai un coût conséquent qu'il est possible d'éviter.

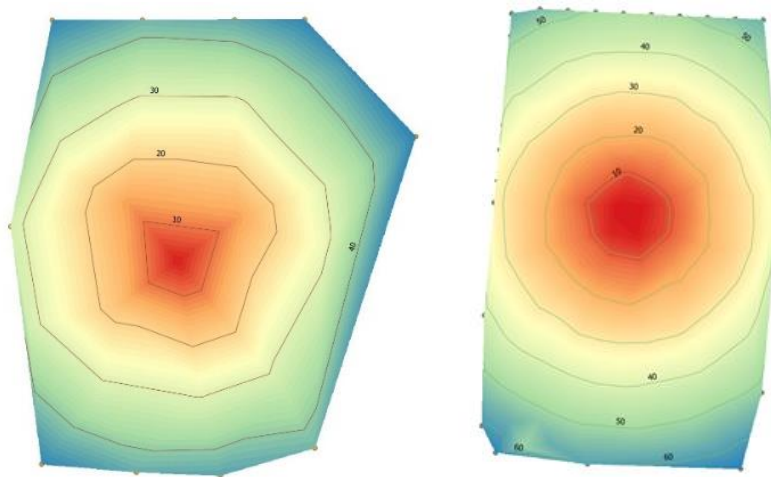


Figure 23 : Évolution de la subsidence avec une simulation de 30 capteurs (à gauche) et 178 capteurs (à droite)

### ***III.2.3.1.2 Évaluation du coût***

Après la qualité du résultat, l'évaluation du coût est le deuxième élément le plus important dans une étude de faisabilité. Un membre de l'équipe Sonardyne nous a fourni un devis comprenant les prix des équipements qui seront déployés au fond de l'eau. Le budget alloué pour cette mission doit être inférieur à 5.000.000 €. Ce budget va varier en fonction des coûts matériel et opérationnel.

- Coût matériel : il comprend le prix des différents matériels qui seront utilisés à savoir le type de capteurs (PMT<sup>®</sup> ou AZA<sup>®</sup>), les stands à base large pour placer les capteurs directement au fond de l'eau, les équipements de fixation mécanique pour stabiliser les capteurs sur les stands déjà installés et un appareil installé sous le bateau appelé



<sup>®</sup>Dunker 6<sup>3</sup> qui permettra de récupérer par télémétrie toutes les données enregistrées par chaque capteur<sup>8</sup>.

- Coût opérationnel : il comprend le personnel et le coût du support navire<sup>9</sup>.

### III.2.3.1.3 Faisabilité du scénario

Afin d'étudier la faisabilité du scénario, nous avons décidé de tracer un graphe montrant l'évolution du coût en fonction de la résolution. Ainsi, nous avons choisi trois résolutions à savoir 500, 400 et 200 m puis nous avons dressé deux tableaux récapitulatifs (cf. tableau 1 et 2) du coût final de l'étude en fonction de chaque résolution selon le type de capteurs.

Résolution (m)	500	400	200
Nombre de capteurs	30	50	178
Prix PMTs <sup>®</sup> (euros)	2 752 116.49	4 936 411.64	16 662 482.96
Prix AZAs <sup>®</sup> (euros)	3 332 471.29	5 981 050.28	20 105 921.44

Tableau 1 : Coûts finaux en fonction de la résolution

À partir de ce tableau, nous avons tracé les deux graphes ci-dessous (cf. figure 24). Nous constatons qu'à une résolution de 200m, nous sommes à un budget maximal d'environ 21 000 000 €, ce qui est économiquement irréalisable. Comme expliqué au paragraphe III.2.3.1.1, nous souhaitons obtenir en sortie un MNT, nous permettant de suivre l'évolution de la subsidence pendant toute la durée de l'étude. La résolution du MNT définit la distance entre chaque capteur. Le fait pour les géophysiciens de fixer la résolution à environ 100m entraîne un budget conséquent. Ainsi, pour obtenir un meilleur rapport qualité/prix et rendre le projet économiquement viable, il faudrait que notre budget soit inférieur ou égal à 5.000.000 €. Pour cela, il est donc intéressant de choisir une résolution dans l'intervalle [400, 500]. Nous réaliserons des interpolations tous les 100m afin d'obtenir des informations sur des points *a priori* inconnus.

---

<sup>8</sup> Les caractéristiques de chaque matériel se trouvent en *annexe 6*.

<sup>9</sup> Une estimation du coût opérationnel a été faite en *annexe 7*.

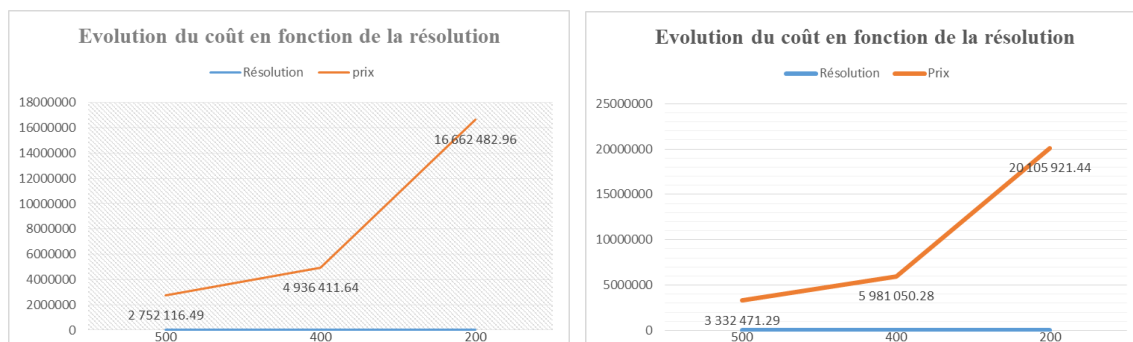


Figure 24: Évolution du coût avec usage de PMTs® (à gauche) et d'AZAs® (à droite)

### III.2.3.2 Combinaisons des mesures de pression avec ceux issues de l'étude sismique

Chaque technique présente ses avantages et ses limitations. Parfois, certains avantages d'une technique peuvent combler les inconvénients de l'autre. Le but est donc de combiner ces deux techniques afin d'apporter une amélioration au résultat final.

Dans ce cas pratique, nous rappelons que l'objectif est de mettre en place un scénario techniquement faisable et économiquement viable afin de mesurer la déformation du fond marin. Le premier scénario décrit ci-dessus nous permet de mesurer une déformation à l'échelle du centimètre et d'obtenir un MNT à une résolution limitée entre 400 et 500m.

Toutefois, l'étude sismique nous permet d'obtenir une meilleure résolution (6.25 par 6.25m) du MNT à une précision relative. L'objectif est d'utiliser les mesures absolues relevées par les capteurs de pression pour calibrer les résultats issus de l'étude sismique. Ainsi, nous n'installerons les capteurs qu'à des endroits présentant un enfoncement réel ou susceptibles de s'enfoncer. Pour cela, j'ai contacté un membre de l'équipe sismique qui m'a fourni une cartographie de la zone d'enfoncement appelé « time shift » datant de 2017. La figure 25 nous montre un enfoncement prononcé (variation des couleurs bleu ciel et violet correspondants aux valeurs positives de la subsidence) autour des puits *OVM-651*, *OVM-652* et *OVM-654*. Il est donc intéressant d'installer des capteurs autour de ces puits.

Sachant qu'une étude sismique est toujours faite lors d'une exploitation en offshore, il n'y aura pas de coût supplémentaire à rajouter en dehors de celui concernant les capteurs de pression.

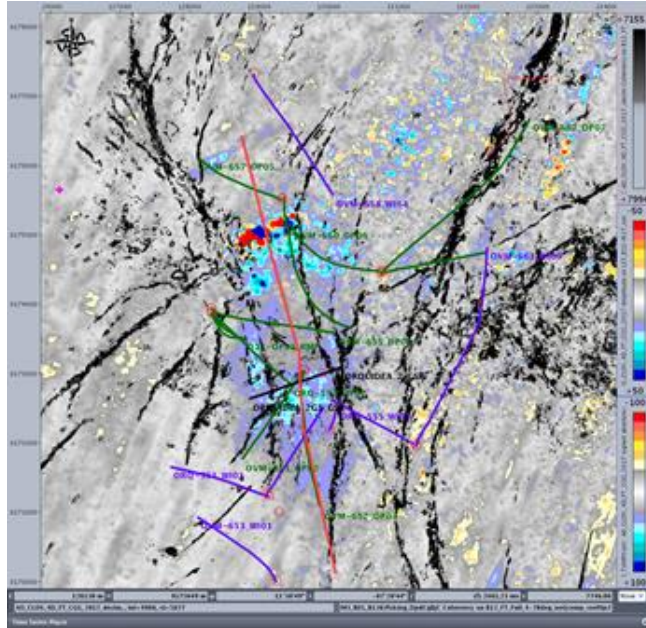


Figure 25 : Time shift issu d'une étude sismique (les traits noirs représentent les failles, les trajectoires en vert correspondent aux puits de production)

### III.2.3.3 Acquisition des données

Cette partie est décrite juste de manière théorique ; aucune pratique n'a été faite sur le terrain.

Une fois le nombre de capteurs déterminé et le déploiement réalisé, nous pouvons lancer l'acquisition des données. Les capteurs de pression ont été programmés pour mesurer la pression, la température et la vélocité toutes les heures. Chaque capteur sort du mode « veille » et prend la mesure du point.

Toutes les mesures de pression sont enregistrées dans la mémoire du capteur. Ces enregistrements sont transmis vers la surface via un modem acoustique intégré par télémétrie. Tous les trois mois, un navire d'occasion est chargé de visiter le site et de récupérer les données qui seront immédiatement transférées vers la surface pendant que le navire continuera à se déplacer.

Une fois toutes les mesures obtenues, le traitement des données peut débuter.

## **IV Mise en place d'une application concrète en surface**

### **IV.1 Contexte de l'application**

L'essai mené dans le cadre de ce projet a été réalisé sur trois sites : le premier situé au Myanmar, le deuxième au Pays-Bas et le troisième au Royaume-Uni. La mission consiste à la mise en œuvre des moyens nécessaires pour la surveillance des mouvements de subduction et de glissement-rupture. L'objectif est de faire une quantification en temps et en amplitude de la facilité du logiciel PPP-Client à détecter en post-traitement et en temps réel des mouvements verticaux lents.

#### **IV.1.1 Description de la mission**

Aujourd'hui, TOTAL est capable de monitorer les mouvements lents en post-traitement via les services FUGRO et DMT avec une latence de 21 jours. Ce type de monitoring a déjà été appliqué sur les plateformes du Myanmar, du Royaume Uni et des Pays Bas. Dans le but d'élargir leur champ d'application, TOTAL aimerait déterminer le plus rapidement possible et avec fiabilité des mouvements de diverses amplitudes à un temps de latence réduit. C'est dans cette optique que TOTAL a fait appel à la société GEOFLEX qui a développé il y a quelques temps, un service appelé PPP-IAR (Precise Point Positioning with Integer Ambiguities Resolution), permettant un suivi de déformations avec une précision pouvant atteindre 4cm (95%) avec un temps de convergence de 30min.

Les algorithmes utilisés par GEOFLEX étant confidentiels, ma tâche a donc été de suivre à distance l'évolution de chaque étape du traitement avec GEOFLEX afin de pouvoir comprendre tout ce qui sera fait.

#### **IV.1.2 Préparation de la mission**

Durant ce stage, la préparation de la mission a été la partie la plus longue.

GEOFLEX a été choisie pour détecter les mouvements de subduction et de glissement/rupture en post traitement et en temps réel. En effet, GEOFLEX est une start-up française spécialisée dans le domaine de la navigation, du positionnement et du monitoring. Ils ont élargi leur moyen d'application par l'ouverture de leur propre service PPP. Ce service permet un suivi de déformations en temps réel et en temps différé. Pendant le traitement des données, les ambiguïtés sont fixées à des valeurs entières grâce aux corrections d'orbites et

d'horloges des satellites calculées et diffusées par GEOFLEX. C'est dans le cadre de la commercialisation de ce logiciel que ce projet a vu le jour avec la participation de TOTAL. Pour GEOFLEX, il s'agit de tester les capacités du logiciel PPP-IAR sur des sites en mer peu profonde.

Les différents choix des zones d'études ont été proposés par TOTAL, suivant la logique que chaque site ait déjà fait l'objet d'un suivi de déformation par une société extérieure sur plusieurs années.

Pour qu'une nouvelle technique soit adoptée par TOTAL, il est important de la tester en parallèle d'une autre qui a déjà fait ses preuves dans le but d'examiner les performances.

#### **IV.1.3 Objectifs de la mission**

Plusieurs échanges ont été faits avec GEOFLEX pour aboutir à la réalisation d'une proposition de monitoring. La rédaction de cette dernière par GEOFLEX permet de définir la portée de l'étude ainsi que les résultats attendus.

Les différents résultats attendus sont :

- Les séries quotidiennes de chaque site obtenues en post-traitement avec une latence de 24h ;
- L'amplitude de glissement minimum détectable des mouvements ;
- Les séries temporelles de chaque site obtenues en temps réel avec une latence de 2h ;
- Comparer les résultats obtenus avec des résultats de référence.

Cette proposition a permis à GEOFLEX d'établir un diagramme de Gantt, nous permettant de suivre avec eux l'évolution des travaux. L'étude a commencé le 10 juin 2019 et s'est achevée le 31 juillet 2019.

## **IV.2 Méthode Precise Point Positioning**

### **IV.2.1 Description de la méthode traditionnelle**

Le terme « Precise Point Positioning » a été employé pour la première fois par Héroux et Kouba en 1995, lorsqu'ils ont proposé l'utilisation d'orbites et d'horloges satellites précises pour obtenir un positionnement précis à partir d'un récepteur.

La technique PPP est une méthode de positionnement basée sur le calcul d'une solution GNSS en utilisant les corrections obtenues à partir un réseau global de stations, comme celui de l'IGS. En effet, la méthodologie du PPP se divise en trois étapes : 1) le centre d'analyse calcule les corrections d'orbites et d'horloges des satellites à partir des observations d'un réseau de stations GNSS global, 2) les corrections calculées sont mises à disposition des utilisateurs au travers d'un caster NTRIP, 3) elles sont intégrées dans un logiciel client permettant de réaliser un monitoring précis des stations. Durant ces dernières années, plusieurs logiciels de traitement de PPP ont été développés par les universités et agences de gouvernement (Bernese, GIPSY-OASIS, GINS,...). Aujourd'hui, il existe aussi certains services gratuits en ligne tels que MagicGNSS, APPS, SCRS-PPP qui permettent à un utilisateur d'envoyer ses observations GNSS par courriel et recevoir quelques minutes plus tard les coordonnées de sa station en ITRF. Dans notre cas, le traitement des données a été fait avec le logiciel Bernese en PPP temps différé pour les plateformes F15A au Pays Bas et YADANA au Myanmar, et avec le logiciel Trimble pour la plateforme WFR au Royaume Uni.

### **IV.2.2 Méthodologie utilisée dans cette étude**

#### **IV.2.2.1 Présentation du service PPP-IAR**

Au fil des années, la méthode PPP a continué de se développer afin d'être adoptée dans différents domaines. Jusqu'à présent, la plupart des logiciels parvenait à résoudre les ambiguïtés en faisant du traitement relatif. Afin d'estimer les ambiguïtés entières des mesures de phase, la connaissance des biais électroniques satellites est indispensable dès lors que des mesures non combinées sont utilisées. GEOFLEX utilise une méthode propriétaire permettant de les estimer et brevetée par le CNES. GEOFLEX à l'exclusivité de son exploitation à des fins commerciales.

Le service PPP-IAR de GEOFLEX permet de réaliser plusieurs types de positionnement à savoir :

- Le positionnement cinématique en mode post-traitement et proche temps réel ;
- Le positionnement cinématique en mode temps réel ;
- Le positionnement pseudo-statique en mode post-traitement et proche temps réel ;
- Le positionnement pseudo-statique en mode temps réel.

Par la suite, nous ne développerons que le traitement PPP en mode pseudo statique car il permet de détecter une rupture ou un affaissement.

#### IV.2.2.2 Paramètres estimés

En PPP pour réussir à fixer les ambiguïtés, il faut prendre en compte tous les termes de l'équation de mesure de pseudo-distance (7) et celle de phase (8) GNSS :

$$P_{if} = \rho + c(dt_r - dt^s) + T_0 + I_{if} + M_{Pif} + b_{r,Pif} - b^s_{Pif} + \varepsilon_{Pif} \quad (7)$$

$$L_{if} = \rho + c(dt_r - dt^s) + T_0 - I_{if} + M_{Lif} + \lambda_{if}N_{if} + b_{r,Lif} - b^s_{Lif} + \varepsilon_{Lif} \quad (8)$$

Où  $\rho$  représente la distance géométrique entre le satellite et le récepteur,  $dt_r$  et  $dt^s$  les décalages respectifs d'horloge récepteur et satellite,  $M_{Pif}$  et  $M_{Lif}$  les erreurs de multi-trajet,  $b_{r,Pif}$  et  $b^s_{Pif}$  les biais de code du récepteur et du satellite respectivement,  $b_{r,Lif}$  et  $b^s_{Lif}$  les biais de phase du récepteur et du satellite respectivement,  $\varepsilon_{Pif}$  et  $\varepsilon_{Lif}$  les bruits de mesure de code et de phase respectivement,  $T_0$  et  $I_{if}$  les délais respectifs ionosphérique et troposphérique.

Les erreurs d'orbites, d'horloges et de biais électroniques satellites sont corrigés grâce aux corrections de précision GEOFLEX. Ainsi, les termes à estimer côté utilisateur sont la position, le décalage d'horloge récepteur, les biais électroniques récepteurs, les délais ionosphériques et troposphériques, et les ambiguïtés de phase. Ces paramètres peuvent être estimés par moindres carrés ou alors par l'utilisation d'un filtre de Kalman.

#### IV.2.2.3 Paramétrage du traitement

Le modèle fonctionnel de la résolution des ambiguïtés par PPP-IAR se base sur la notion de mesures non-différenciées et non-combinées des signaux. Cette formulation a été proposée par le consortium RTCM basé sur l'idée selon laquelle un biais de phase soit représenté par fréquence (D. Laurichesse, 2014). Comme pour les biais de code, on ajoute les biais de phase à chaque observable indépendante. Une fois les observables « dé-biaisées », on obtient la nature entière des ambiguïtés de phase. Le modèle général est basé sur des équations non combinées (D. Laurichesse, 2014) :

$$P_1' = P_1 + \Delta b_{p1} = D + e + \Delta h_p \quad (9)$$

$$P_2' = P_2 + \Delta b_{p2} = D + \gamma e + \Delta h_p \quad (10)$$

$$\lambda_1 L_1' = \lambda_1 (L_1 + \Delta b_{L1}) = D - e + \Delta h_p - \lambda_1 N_1 \quad (11)$$

$$\lambda_2 L'_2 = \lambda_2 (L_2 + \Delta b_{L2}) = D - \gamma e + \Delta h_p - \lambda_2 N_2 \quad (12)$$

$$\text{avec } \gamma = \frac{f_1^2}{f_2^2}, \quad \lambda_1 = \frac{c}{f_1}, \quad \lambda_2 = \frac{c}{f_2} \quad (13)$$

où  $c$ ,  $f_1$  et  $f_2$ ,  $L_1$  et  $L_2$ ,  $P_1$  et  $P_2$  sont respectivement la vitesse du son, les fréquences, les mesures de phase et les mesures de code GPS.

$e$  représente l'allongement du trajet dans l'ionosphère

$\Delta b_p$  et  $\Delta b_L$  sont respectivement les biais de code et de phase

$\Delta h_p$  représente les horloges de codes

$D$  est la distance géométrique entre le centre de phase du satellite et du récepteur (incluant les effets troposphériques et relativistes)

$N$  représente les ambiguïtés entières.

#### IV.2.2.4 Traitement PPP en mode pseudo statique

Tel qu'expliqué dans le paragraphe précédent, le PPP peut être utilisé en mode pseudo-statique en définissant simplement la longueur de la session et le seuil minimum. Toutes les mesures de tous les satellites à toutes les fréquences sont utilisées. Avec GEOFLEX, nous avons décidé de traiter les données de chaque site dans un premier temps sur une session de 24h et dans un second temps sur une session de 2h.

##### IV.2.2.4.1 Concept du temps réel

Les données sont traitées par sessions. Sachant que la technique PPP-IAR nécessite un temps de convergence de 30min, une session de 2h permet d'obtenir une série d'1h30 avec fixation entière des ambiguïtés. Le calcul de la position en temps réel est fait toutes les  $X$  heures ( $X$  représente la longueur de la session). La figure 26 illustre le temps nécessaire pour la détection d'une rupture.

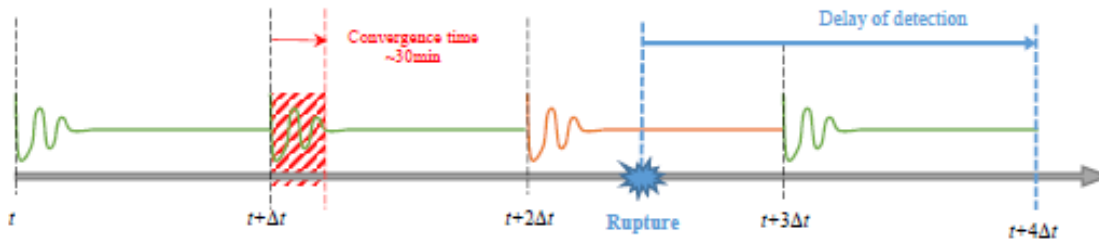


Figure 26 : Positionnement pseudo-statique en temps réel ( $\Delta t$  : longueur de session) – source interne

Les données en orange utilisées pour le calcul présentent des discontinuités qui pourraient ralentir la détection de rupture. Une solution à ce problème est l'utilisation des fenêtres



glissantes. Plus le temps entre chaque fenêtre glissante est court plus le temps de détection de rupture sera réduit (cf. figure 27).

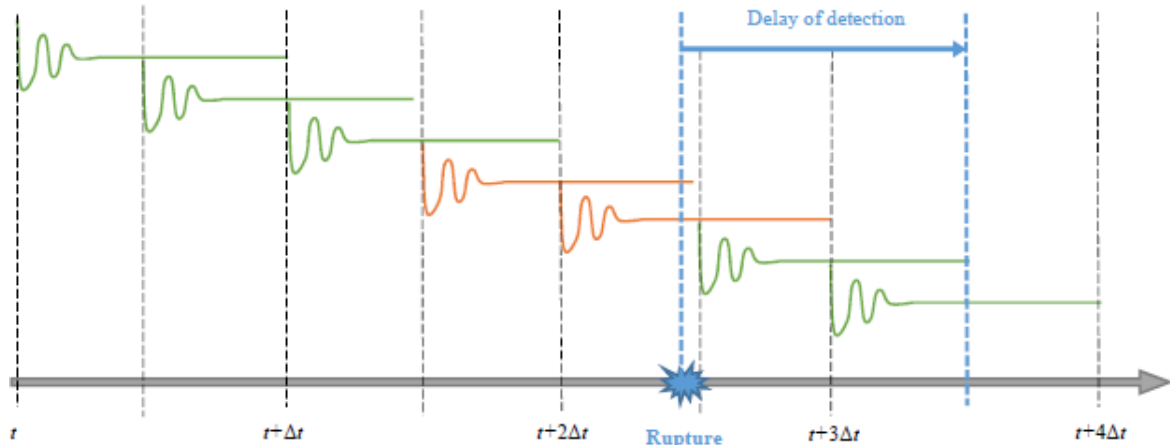


Figure 27 : Positionnement pseudo-statique en temps réel (longueur de la session  $\Delta t$  et un temps de glissement  $\Delta t/2$ )

#### IV.2.2.4.2 Concept du post-traitement (quasi temps réel)

Ce traitement a l'avantage d'utiliser le mode Forward+Backward c'est-à-dire que la phase de convergence n'a lieu qu'une seule fois au début de traitement. Il permet de réduire voir éliminer les temps de convergence-reconvergence observés en temps réel. La figure 28 illustre le déroulement d'un traitement Forward+Backward. La ligne verte représente le traitement en mode forward : nous constatons au début une phase de convergence initiale, puis une réinitialisation de la solution à  $t=1200s$  qui va conduire à une re-convergence. La ligne rouge quant à elle représente le traitement en mode backward, qui est inversé dans le temps par rapport au mode forward. La ligne bleue est la combinaison des modes forward et backward. Une fois que les données d'une session ont été collectées, le traitement PPP peut débiter. Pour un traitement de 24h échantillonné à 30s, le temps de traitement est de moins d'une heure pour une station.

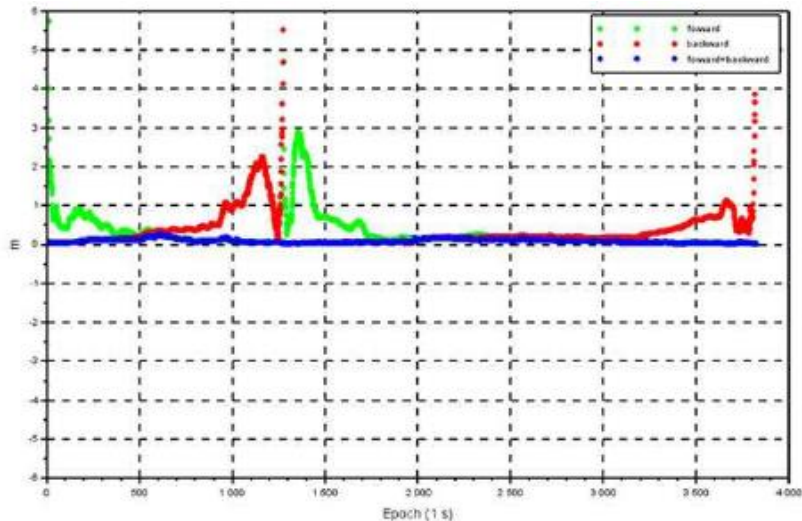


Figure 28 : 3 traitements forward (vert), backward (rouge) et forward+backward (bleue) en mode statique – source interne

### IV.2.3 Cas concret

Les parties précédentes ont présenté de manière globale la technique PPP et particulièrement la technique PPP-IAR qui a été utilisée dans nos cas pratiques. Nous avons travaillé sur trois sites : Royaume-Uni sur la station WFR (West Franklin), Pays Bas sur la station F15A et Myanmar sur les stations YDNA, WP02, WP03 et TEPM.

#### IV.2.3.1 Équipements installés

Les informations concernant les équipements installés ont été récupérées dans les fichiers RINEX de chaque site. En dehors de la plateforme West Franklin au Royaume Uni dont les récepteurs sont de type Trimble, tous les autres sites sont de type Leica. Le tableau 2 fait un récapitulatif des équipements de chaque station. À la lecture de ce tableau, nous constatons que les micrologiciels (firmwares : Fw) des plateformes situées au Myanmar sont de versions différentes. Par exemple, sur la station YDNA, on utilise un micrologiciel de version 5.62 tandis que sur la station WP02, le micrologiciel est de version 7.53. Ceci s'explique par le fait que lors du suivi de subsidence sur Yadana, nous nous sommes rendu compte en 2008 que la plateforme s'enfonçait à une grande vitesse. Afin de confirmer ces mesures, nous avons décidé d'installer en 2010 deux autres stations, un appelé WP02 sur le réservoir Yadana et l'autre, WP03 sur un réservoir différent ; raison pour laquelle les firmwares ont des versions différentes. Toutefois, il est important de noter que le fait d'avoir des antennes et des versions de firmwares différentes peut entraîner des variations importantes dans les mesures.

Stations	WFR	F15A	TEPM	YDNA	WP02	WP03
Emplacement	Royaume Uni	Pays Bas	Myanmar	Myanmar	Myanmar	Myanmar
Récepteurs	TRIMBLE 9205 Fw 5.12	LEICA GM10 Fw 2.51/6.110	LEICA GRX1200GGPRO Fw 5.62/3.014	LEICA GRX1200GGPRO Fw 5.62/3.014	LEICA GRX1200GGPRO Fw 7.53/3.017	LEICA GRX1200GGPRO Fw 3.71/3.823
Antennes	TRM55970.00	VXP3G+C	LEIAT504GG	LEIAT504GG	LEIAR25	LEIAT504GG
Radôme	AUCUN	AUCUN	AUCUN	AUCUN	AUCUN	AUCUN
Constellations	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS	GPS	GPS	GPS	GPS
Fréquences	GPS:L1,L2; GLONASS:L1,L2	GPS:L1,L2,L5; GLONASS: L1, L2	GPS: L1, L2	GPS: L1, L2	GPS: L1, L2	GPS: L1, L2
Jours d'observations	2018	2013	2014	2014	2014	2014

Tableau 2 : Détails des équipements utilisés sur chaque station

#### IV.2.3.2 Fichiers d'observations des données

Premièrement, toutes les données acquises par les récepteurs vont être converties et stockées en format de fichiers d'observation et de navigation RINEX (Receiver Independent Exchange).

Pour notre étude, TOTAL fournit des données GNSS au format RINEX de trois sites sur une année, échantillonnées au minimum à 30s. Pour garantir la qualité des résultats, il est souhaitable que nos données soient bi-fréquences et qu'elles ne soient pas trop anciennes (en-deçà de 2013) afin de bénéficier des dernières avancées en termes de qualité et de nouvelles constellations.

#### IV.2.3.3 Autres fichiers

Afin de réduire les différentes sources d'erreurs, la méthode PPP nécessite des informations complémentaires à savoir :

- Les corrections d'horloges, d'orbites et de biais électroniques des satellites. Dans notre cas, les corrections utilisées sont calculées directement par un logiciel interne de GEOFLEX. Ces corrections sont estimées et modélisées en temps réel. Toutes les erreurs modélisées (orbites, horloges et biais de code et de phase satellites) sont envoyées au récepteur de l'utilisateur sous formes de corrections. Les corrections d'orbite sont additionnées aux positions approchées des satellites puis archivées au format SP3 tandis que les corrections d'horloge sont archivées au format CLK et les biais au format SNX.
- Les informations concernant les antennes satellite et récepteur : ces informations sont fournies dans les fichiers ANTEX (ANTenna Exchange). Ces fichiers permettent la correction du biais centre de phase – point de référence des antennes. Dans le cas des satellites, le point de référence est son centre de masse.

#### IV.2.4 Présentation des résultats

Toutes nos coordonnées sont exprimées dans le système courant ITRF2014. Les résultats sont centrés sur la valeur médiane de l'année. Les calculs et la mise en forme des résultats ont été réalisés par GEOFLEX.

##### IV.2.4.1 Traitement pseudo-statique des séries journalières en post-traitement

Afin d'illustrer la qualité typique des solutions calculées avec la technique PPP-IAR, un calcul des séries journalières a été fait par GEOFLEX sur une plateforme en Suède appelée ONSA.

Sur la figure 29, on observe des mouvements d'amplitude de l'ordre de 1cm en planimétrie et 0.7cm en vertical. Ces valeurs correspondent bien aux performances attendues du PPP-IAR avec un échantillonnage toutes les 30s. Que ce soit en planimétrie ou en vertical, les écart-types sont relativement faibles, ce qui traduit l'homogénéité des mesures et le fait qu'elles soient centrées sur la moyenne.

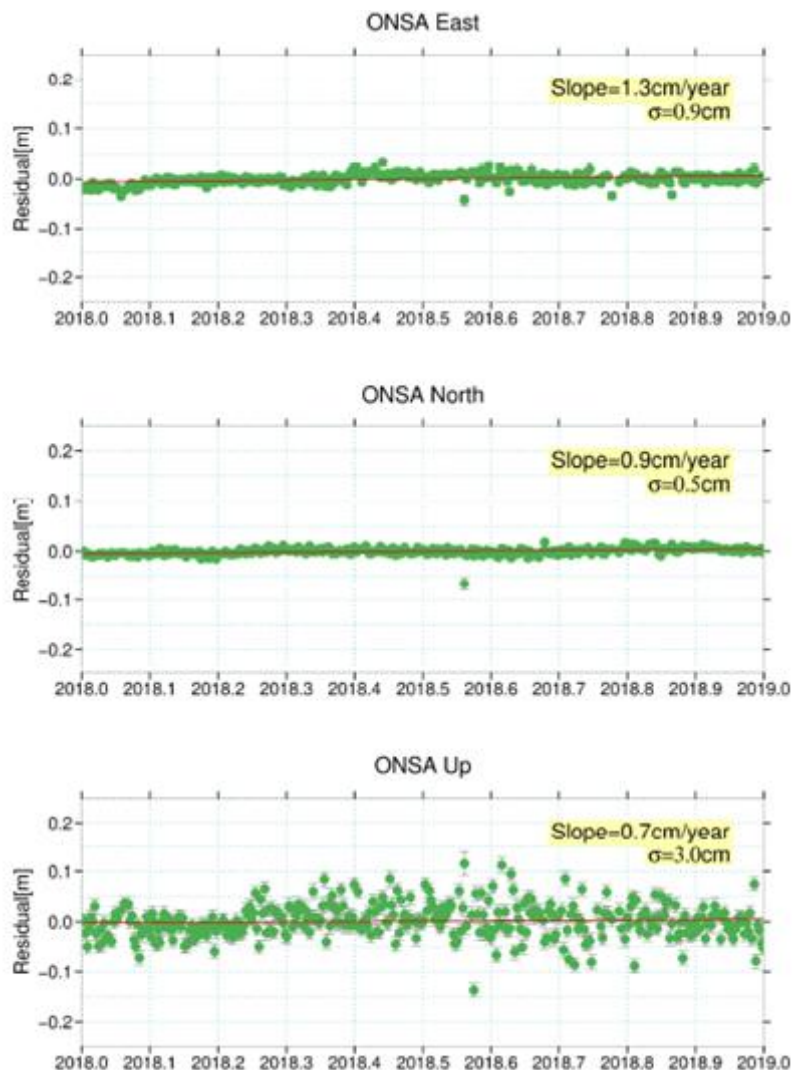


Figure 29 : Séries de temps journalières de la station IGS, ONSA

#### IV.2.4.1.1 Station WFR

La dispersion des séries journalières est plutôt homogène (écart type faible). Mais nous constatons sur la partie Nord, la présence d'un point aberrant qui peut être due au fait que les fichiers RINEX sont incomplets. La figure 30 nous montre les séries de temps de la station WFR en sessions de 24h. Les écarts types sont semblables à ceux obtenus sur un site normal, ce qui nous amène à dire qu'il n'y a pas de ruptures sur ce site. On observe des mouvements d'amplitude de 2cm en planimétrie et 3.5cm en vertical. Dans d'autres domaines (tectonique des plaques,...), cet affaissement pourrait être très significatif. Mais dans notre cas, cela ne constitue pas une alerte. Nous pourrions si possible réajuster le niveau de production d'hydrocarbures mais une descente sur le terrain n'est pas nécessaire. Ces résultats se rapprochent de ceux qu'avaient obtenus FUGRO.

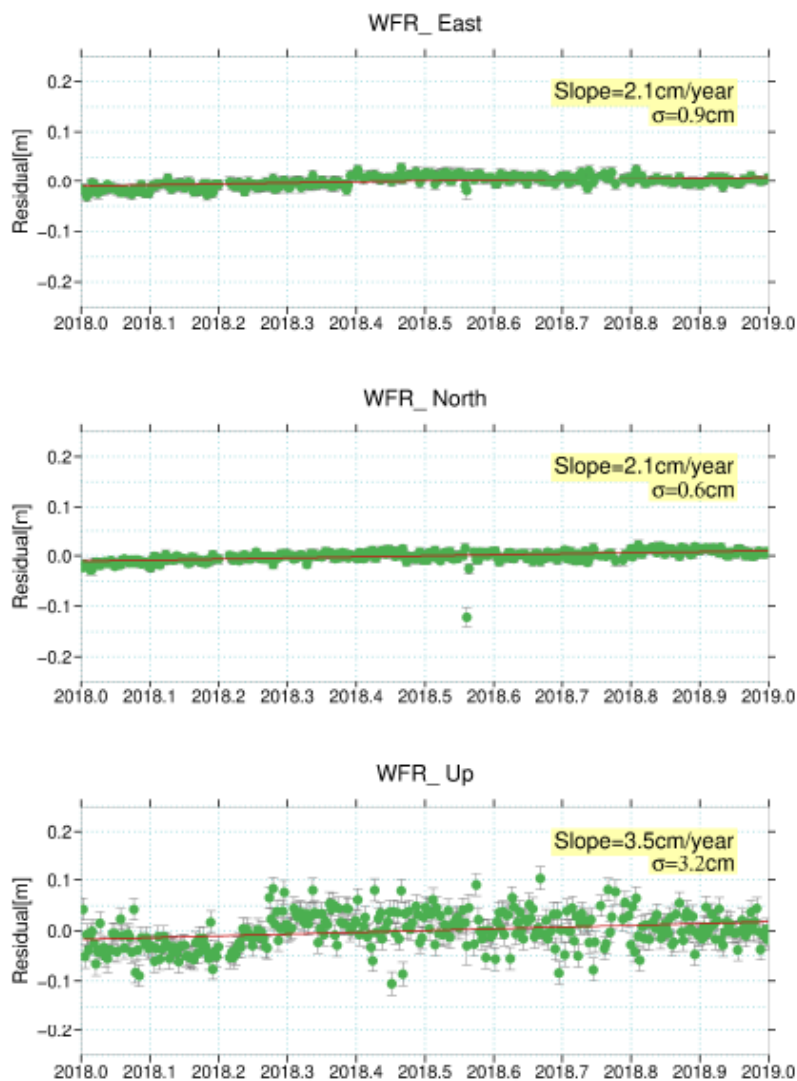


Figure 30 : Séries de temps journalières de la station WFR

#### IV.2.4.1.2 Station F15A

La présence des trous dans les résultats est due à l'absence des données dans les fichiers RINEX de départ. Nous constatons que les données sont très erratiques surtout en vertical avec un écart-type d'environ 6 cm et une pente de 12cm/an (cf. figure 31). Ces résultats diffèrent fortement des résultats obtenus par DMT. En effet, les mesures ont été stoppées après une année d'étude car on observait un enfoncement d'environ 3-4cm/an, ce qui n'était pas significatif pour eux. Les calculs devraient être repris sur ce site mais le temps imparti ne nous l'a pas permis.

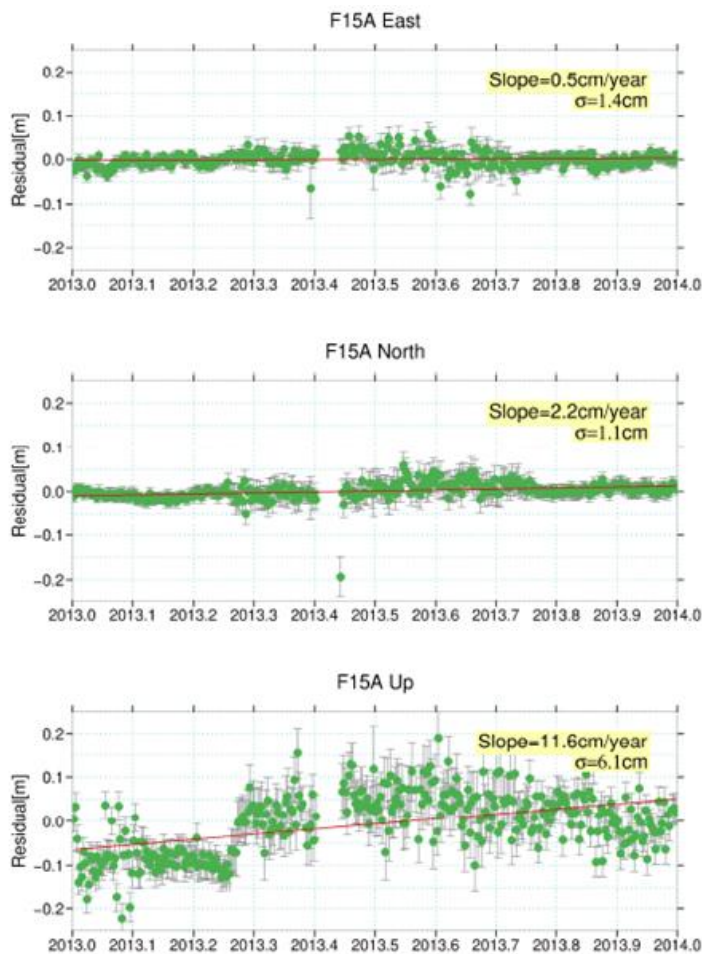


Figure 31 : Séries de temps journalières de la station F15A

#### IV.2.4.1.3 Station TEPM

Cette station a été installée à terre, sur le toit des bureaux TOTAL E&P Myanmar afin de vérifier que les bureaux ne s'enfonçaient pas aussi. Les trous dans les données représentent les données manquantes dans les fichiers RINEX notamment entre février et mai 2013 puis juillet à août 2014. Les ordres de grandeur des écart-types en planimétrie sont presque semblables à ceux obtenues sur ONSA et WFR, ce qui nous permet de déduire que

ce site ne présente pas de ruptures. Les séries temporelles issues du premier calcul<sup>10</sup> présentaient des données manquantes, raison pour laquelle nous avons proposé à GEOFLEX de reprendre les calculs sur des séries plus longues (entre 2010 et 2015) afin d’avoir des données continues sur plusieurs années (cf. figure 32). L’amplitude du mouvement en vertical de 1cm, nous permet de déduire que les bureaux ne s’enfonçaient pas à la même vitesse que la plateforme. Ce qui avait été bien confirmé aussi par les mesures réalisées par DMT. Ici, un enfoncement de 1cm n’est pas significatif pour nous.

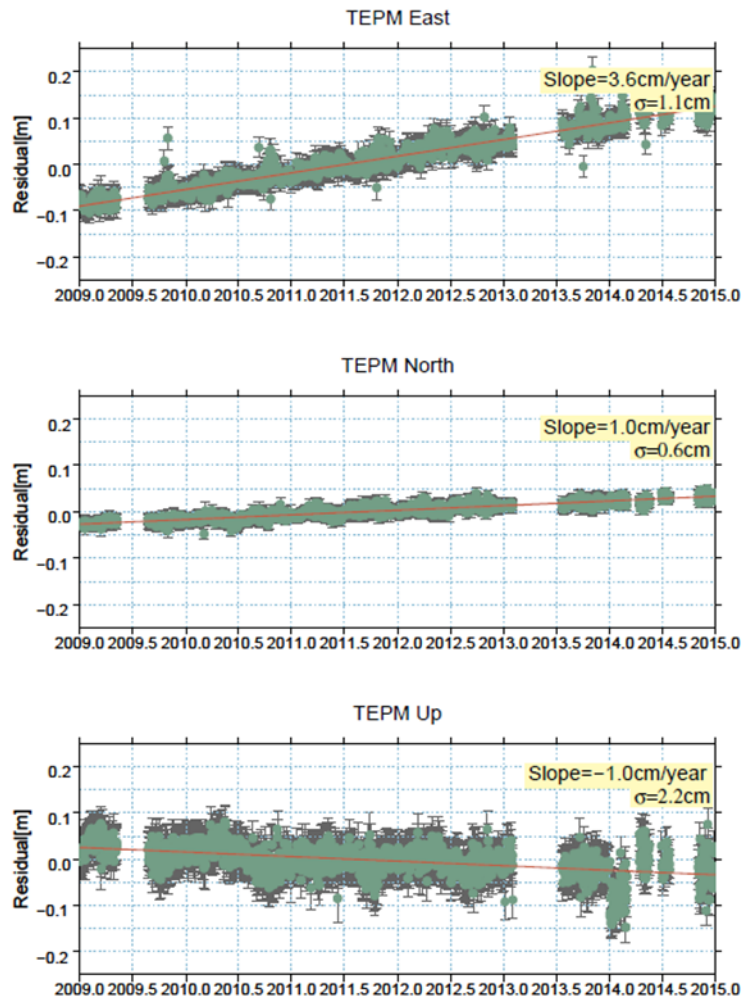


Figure 32 : Séries de temps journalières de la station TEPM

#### IV.2.4.1.4 Station YDNA

Comme sur la station F15A, la valeur de la pente en altimétrie (39cm/an) issue des premiers calculs<sup>10</sup> de GEOFLEX est différente de celle calculée avec les services de DMT

---

<sup>10</sup> Les séries temporelles issues du premier calcul par GEOFLEX sont visibles en *annexe 8*.

où ils obtenaient une pente moyenne d'environ 23cm/an. Néanmoins, que ce soient les résultats obtenus par DMT ou ceux obtenus par GEOFLEX, un cas de subsidence est déclaré. Nous avons été d'accord avec GEOFLEX pour qu'il reprenne les calculs avec d'autres données datant d'une période différente. Ces nouvelles données seront traitées sur 5ans, de 2010 à 2015. À travers l'analyse du contenu des fichiers RINEX, je peux déduire l'évolution des données. Les matériels utilisés (LEIAT504GG, LEICA GRX1200GGPRO) restent les mêmes durant les cinq années, seulement le satellite GPS est utilisé et les données sont monofréquences à bifréquences. Notamment en 2014 (entre le 10 janvier et le 31 décembre), les fichiers RINEX nous révèlent des mesures monofréquences, ce qui conduit à des décalages au niveau des séries temporelles (t = 2014.0 à 2015.0). En outre, entre 2013.0 et 2013.5, les fichiers RINEX nous révèlent également des données manquantes. La figure 33 illustre les séries temporelles issues du second calcul fait par GEOFLEX avec un enfoncement de 25cm/an. Le fait d'élargir la temporalité des observations nous a permis de trouver une valeur de pente qui se rapproche de celle de DMT.

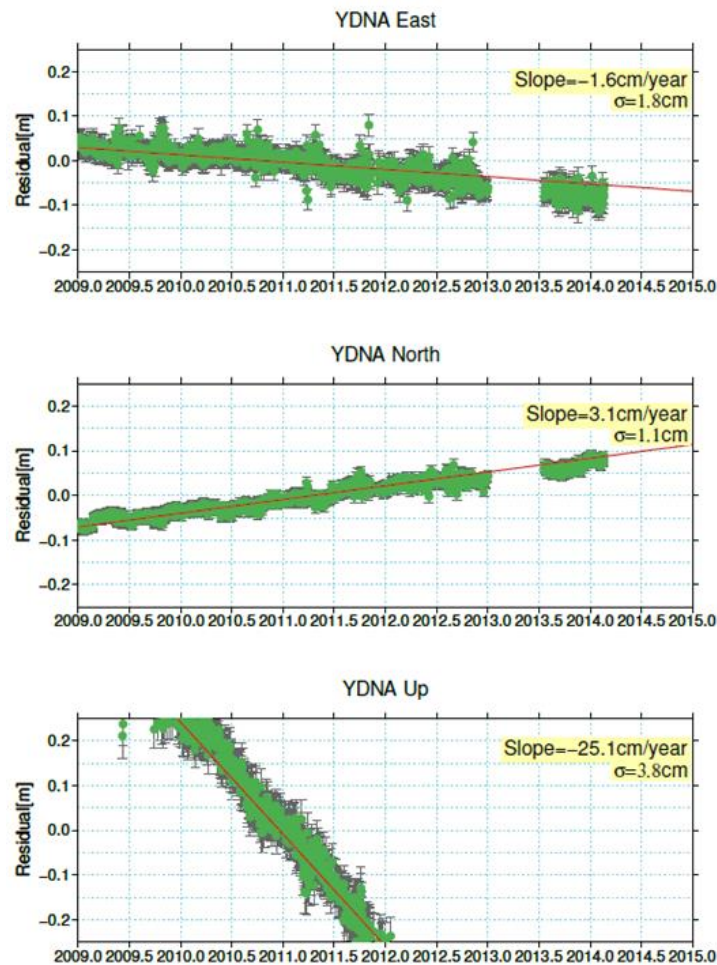


Figure 33 : Séries de temps journalières de la station YDNA



#### IV.2.4.1.5 Station WP02

Les valeurs de pente de cette station ont été aussi surestimées<sup>10</sup>. Ainsi, les traitements ont été repris sur cette station sur une durée de 5 ans. En analysant les séries, nous constatons qu'entre  $t = 2010.0$  et  $t = 2010.7$ , les résultats sont très bruités. Ceci correspond à la période (17 août 2010) où le boîtier de l'antenne a été changé sur le terrain à cause des problèmes de réception du signal satellite. Aussi, le contenu des fichiers RINEX nous montre d'une part, des données manquantes et d'autre part, des données monofréquences entre janvier et mars 2014 puis de nouveau à partir de novembre jusqu'en décembre 2014. Tout ceci conduit à des changements au niveau des séries (décalages, changement du niveau de bruit). Les traitements des deux sociétés confirment un cas de subsidence très avancé, ce qui corrobore la valeur de pente calculée précédemment sur la station YDNA.

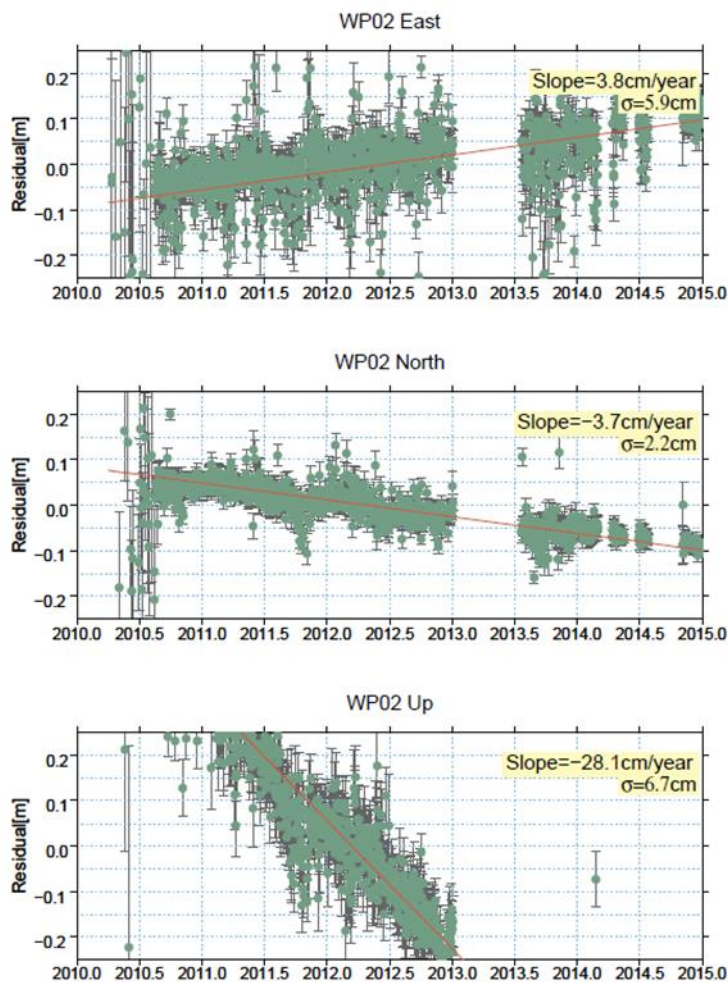


Figure 34 : Séries de temps journalières de la station WP02

#### IV.2.4.1.6 Station WP03

Cette station est particulière, les séries temporelles sont très bruitées avec un écart-type allant jusqu'en 14cm en vertical. Les bruits observés jusqu'à  $t = 2010.5$  ont la même

cause que ceux de la station WP02 (changement du boîtier de l'antenne). Entre autre, le contenu des fichiers RINEX nous révèlent des données monofréquences seulement, des changements de matériel dans l'historique des sites (versions de firmwares différentes). Cela explique les décalages et les changements au niveau de bruit.

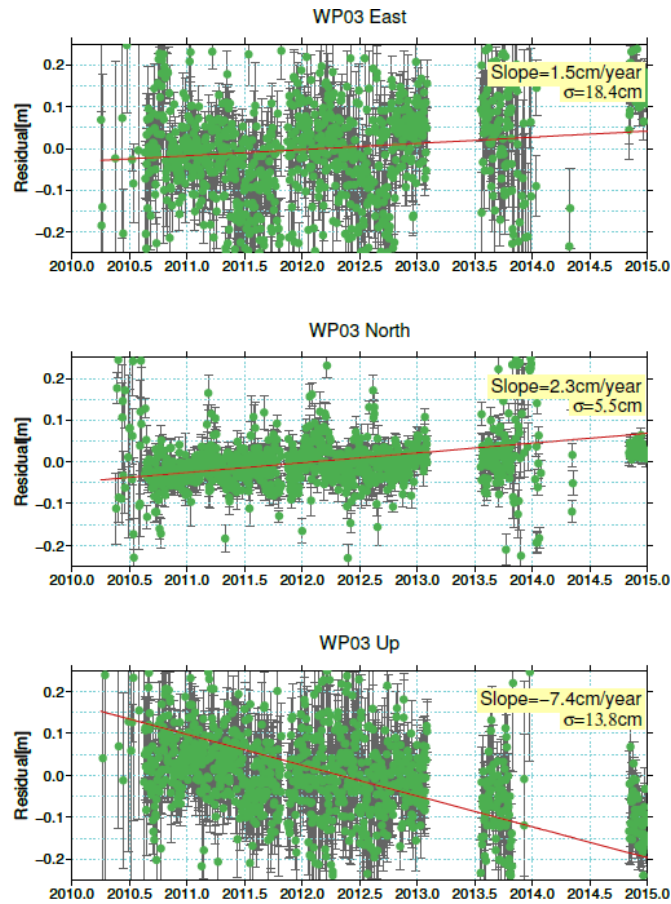


Figure 35 : Séries de temps journalières de la station WP03

#### IV.2.4.2 Traitement de sessions de 2h

Ce traitement a été réalisé dans le but d'estimer la capacité du PPP-IAR à pouvoir détecter en temps réel une déformation. Ceci nous permettrait de pouvoir mieux anticiper un affaissement sur le terrain. Comme dans le traitement des séries journalières, un calcul de sessions de 2h a été fait par GEOFLEX sur la station ONSA au sud de la Suède (cf. figure 36), afin d'illustrer la qualité typique des traitements. Ainsi, nous arrivons à détecter des mouvements d'amplitude de 5mm en altimétrie avec un écart type d'environ 6cm. Contrairement aux séries obtenues en post-traitement, les résultats ici sont très erratiques.

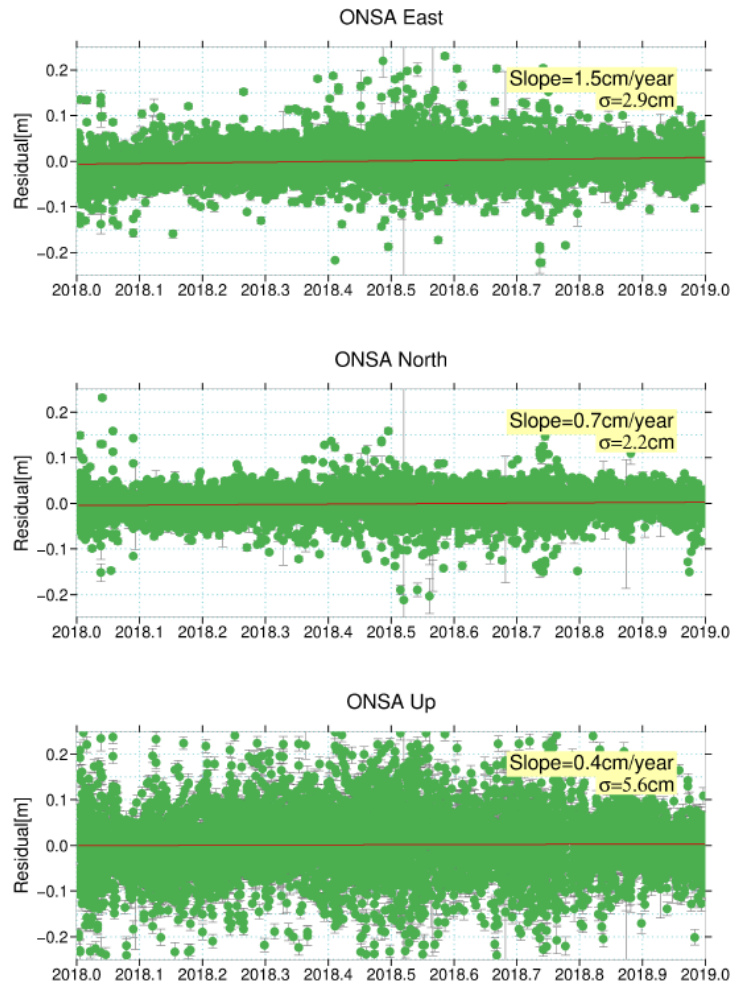


Figure 36 : Séries de temps issues du traitement de session 2h de la station ONSA

#### IV.2.4.2.1 Station WFR

Nous constatons que les données sont très erratiques en vertical, ce qui pourrait contribuer à l'augmentation de l'écart type (7cm en vertical) par rapport à ce qui a été obtenu pour le traitement des sessions de 24h. Nous avons détecté les mouvements d'amplitude 2cm en planimétrie et 3cm en vertical (cf. figure 37).

Les résultats obtenus sur les stations ONSA et WFR nous permettent de conclure que le service PPP-IAR est capable de détecter des mouvements de l'ordre du centimètre en temps réel avec une latence de 2h. Ainsi, nous pourrions être capables à l'avenir d'anticiper le plus rapidement possible une déformation à la surface. Le temps imparti ne nous a pas permis d'effectuer le traitement sur les autres stations.

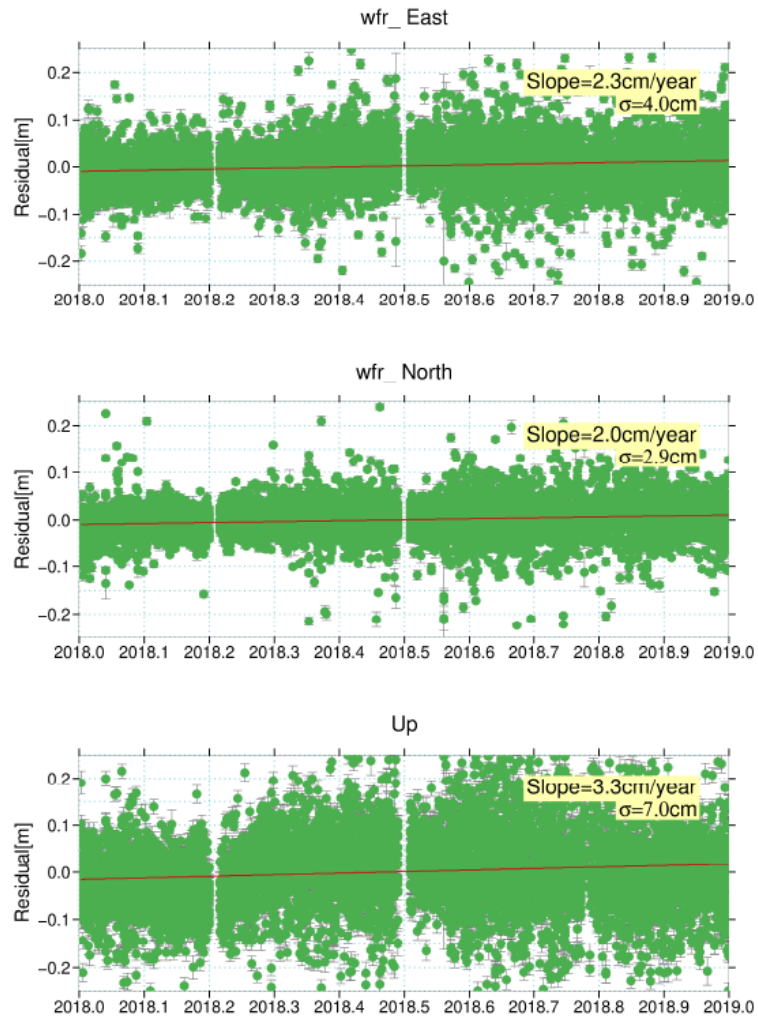


Figure 37 : Séries de temps issues du traitement de session 2h de la station WFR

## Conclusion

Au fil des années, la mesure de subsidence suscite de plus en plus d'intérêt. D'une part, pour anticiper (réduire ou stabiliser) le taux de la production d'hydrocarbures et d'autre part, pour limiter les conséquences que cela peut entraîner sur le plan humain et technique. Les techniques de mesure dans le domaine marin sont en constante évolution allant du GNSS à l'utilisation des capteurs de pression. Chaque technique sera limitée en fonction du milieu où l'on se trouve. Par exemple, la technique GNSS ne pourra être utilisée que pour des plateformes à la surface de l'eau. Sur des champs deep-offshore (très profonds), on utilisera soit la méthode acoustique soit les capteurs de pression.

Aujourd'hui, TOTAL possède peu d'expériences dans le suivi de subsidence en sous-marin. Mon rôle a été donc de faire une étude sur les possibilités précises de suivi de subsidence en mer très profonde et de la concrétiser par une étude sur le champ CLOV en Angola. Deux scénarios ont été proposés : l'un consistant à un maillage irrégulier et l'autre à une combinaison de deux techniques. Pour le moment, nous sommes allés au bout de l'étude concernant le premier scénario mais, vu le temps imparti, nous n'avons pas pu conduire le second scénario jusqu'à sa fin. Nous espérons qu'il soit beaucoup plus développé à l'avenir.

Ce projet, comprenant une partie bibliographie, a permis de rédiger un état de l'art de toutes les techniques existantes du suivi de déformation dans le domaine marin ainsi que d'analyser les avantages et les inconvénients de chacune de ces techniques. La recherche des cas concrets déjà mis en œuvre nous a permis d'appuyer notre description.

À la suite d'une étude de mouvement de subduction avec le logiciel PPP-IAR de GEOFLEX, nous nous sommes rendus compte que l'étude sur les séries plus longues nous a permis d'obtenir des résultats semblables à ceux calculés par les services FUGRO et DMT. Toutefois, l'évolution des données et le changement de matériel dans l'historique des sites expliquent entre autre les changements du niveau de bruit et les décalages dans les résultats.

Aujourd'hui, une nouvelle technique de positionnement est en train d'être développée, le GPS-A qui combine la technique GPS et l'Acoustique. Pour le moment, cette technique n'est pas utilisée pour la mesure de subsidence. Mais, on espère voir un développement futur dans ce domaine.

## Bibliographie

- H. Alnes, S. Torkjell et E. Ola. Experiences on Seafloor Gravimetric and Subsidence Monitoring Above Producing Reservoirs, [en ligne]. Disponible sur : <https://fr.slideshare.net/Statoil/alnes-et-al-gravity-and-subsidence-monitoring>. (consulté le 11 juillet 2019)
- S. Baillargeon, 2005. Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire de maîtrise en statistique, Université Laval, 137p.
- P. Bosser. (2017). Cours de GNSS : Systèmes globaux de positionnement par satellite, 5<sup>ème</sup> année, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées Bretagne.
- D. Brown. *Tracking, positioning and monitoring technologies for reservoir surveillance*. Baseline Magazine, 2014, n°12, p. 1-32
- O. Chassagne. *Le futur de la navigation par satellites : une précision à un centimètre avec le PPP*. Revue XYZ, 2012, N° 132, [en ligne]. Disponible sur : [www.aftopo.org/download.php?matricule=413209](http://www.aftopo.org/download.php?matricule=413209). (Consulté le 01 juin 2019)
- Connaissance des énergies. Pétrole, [en ligne]. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/petrole>. (consulté le 20 mai 2019)
- M. J. Cook, E. C. Roland, G. S. Sasagawa et al. An Absolute Self-Calibrating Pressure Recorder for Campaign-Style Detection of Vertical Seafloor Deformation in the Cascadia Subduction Zone, [en ligne]. Disponible sur : <http://adsabs.harvard.edu/abs/2016AGUFM.T31C2906C>. (consulté le 07 juin 2019)
- D. Doornhof, T. Golder, N. Nagel et al. *Compaction and Subsidence*. Oilfield Review, 2006, [en ligne]. Disponible sur : [www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/compaction-and-subsidence](http://www.slb.com/-/media/files/oilfield-review/compaction-and-subsidence). (consulté le 05 juin 2019).
- S. Doucet, 2008, Combinaison de mesures géodésiques pour l'étude de la subsidence : application à la saline de Vauvert (Gard, France). Thèse en Sciences de la Terre, Université De Montpellier, 235 p.
- F. Duquenne, 2016. Lexique GNSS pour le positionnement. Ed. Association française de topographie, 32p.
- Duro J., Marc G. et David A. 2012. Monitoring Of The Yadana Platform, 71p.
- L. Fournet, 2002. Positionnement d'engins autonomes grands fonds : Etat de l'art et perspectives. Mémoire de fin d'études, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, 77p.

Y. Gratton. *Le Krigeage : La Méthode Optimale D'interpolation Spatiale*. Les articles de l'Institut d'Analyse Géographique, 2002, p1-4

P. Hatchell, Robin de Vries, V. Gee et al. *Seafloor Deformation Monitoring: Past, Present and Future*. GSH Journal, 2018, vol 8, n°7, p. 14-19

Hsien-Jen Tien, 1996, A Literature Study of the Arching effect. Master of Science, Massachusetts Institute Of Technology, 196p.

N C Kelland. 2006. *Acoustic positioning training course lecture notes*. Pages 1-80.

R. Lahaye, S. Ladet. *Les principes du positionnement par satellite : GNSS*. Le cahier des Techniques de l'INRA, 2014, p. 18

D. Laurichesse. *Les évolutions du PPP : l'apport d'une troisième fréquence pour réduire les temps de convergence*. Revue XYZ, 2015, N° 144, [en ligne]. Disponible sur : [www.aftopo.org/download.php?matricule=414409](http://www.aftopo.org/download.php?matricule=414409). (Consulté le 20 juin 2019)

H-J. Lekkerkerk et M-J. Theijis, 2017. *Offshore Surveying: Acquisition Sensors* 2<sup>nd</sup> ed. 225p.

J. P. R. Marreiros, 2012, *Kinematic GNSS Precise Point Positioning*. Ph.D. Thesis in Surveying Engineering, the University of Porto, 177p.

N. Matori, A. Latip et A. Aobpaet. *A Case Study on Offshore Platform Deformation Monitoring by using InSAR*, [en ligne]. Disponible sur : [https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/62/mateconf\\_iccoee2018\\_04002.pdf](https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2018/62/mateconf_iccoee2018_04002.pdf). (consulté le 01 juillet 2019)

M.N. Mayuga et D.R. Allen. (1970). *Subsidence in the Wilmington Oil Field*, [en ligne]. Disponible sur: <http://www.saveballona.org/gasoilfields/WilmSubGC.pdf>. (consulté le 02 juin 2019)

L. Morel. (2018). *Cours GNSS et Géoréférencement*, 5<sup>ème</sup> année, Ecole Supérieure de Géomètres et Topographes Le Mans.

L. Morel, F. Fund, R. Legros. *PPP, la maturité ?*. Revue XYZ, 2014, N° 138, [en ligne]. Disponible sur : [www.aftopo.org/download.php?matricule=413809](http://www.aftopo.org/download.php?matricule=413809). (Consulté le 01 juin 2019)

Paroscientific, Inc. *Metrology*, [en ligne]. Disponible sur : <http://www.paroscientific.com/metrology.php>. (consulté le 20 juin 2019)

Paulo Sergio de Oliveira Jr., 2017, *Definition and implementation of a new service for precise GNSS positioning*. Thèse en Géomatique, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur, Géosciences et Architecture, 272p.

F. Perosanz, S. Loyer, F. Mercier et al. Contribution du GRGS à la campagne REPRO2 de l'IGS: Intérêts pour les traitements GPS statiques et dynamiques en mode IPPP, [en ligne]. Disponible sur : [https://eost.unistra.fr/uploads/media/G2\\_Perosanz.pdf](https://eost.unistra.fr/uploads/media/G2_Perosanz.pdf). (consulté le 30 mai 2019)

P. Samier. Simulations de réservoirs dans l'industrie pétrolière, [en ligne]. Disponible sur : <http://lma.univ-pau.fr/meet/momas2006/resumes/samier2.pdf>. (consulté le 25 mai 2019)

G. Sasagawa, M.J. Cook et Zumberge M. A. Drift-corrected seafloor pressure observations of vertical deformation at Axial Seamount 2013–2014, [en ligne]. Disponible sur : <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/2016EA000190>. (consulté le 15 juin 2019)

SCPR (Self Calibrating Pressure Recorder), [en ligne]. Disponible sur : <https://quadgeo.com/services/pressure-measurements-for-subsidence-monitoring/pressure-recording-deployment-data-collection/>. (consulté le 10 juin 2019)

D. Shaun, A. Parsons, N. Street et al. Practical Monitoring of Seafloor Deformations. 2019, 28p.

D. Shaun. Sonardyne Settlement Monitoring Capabilities. 2013, 37p.

Sonardyne. 2017. *10 years at Ormen Lange*. Pages 1-3.

Sonardyne. 2019. *AMT FETCH FETCH AZA*. Pages 1-2.

Sonardyne. 2011. *Autonomous Monitoring System: A Long-Life Acoustic Surveillance Sensor Platform*. Pages 1-4.

Total. ANGOLA - CLOV, [en ligne]. Disponible sur : <https://wiki.total.fr/angola-clov>. (consulté le 31 mai 2019).

Tre Altamira. 2019. *Offshore Monitoring with satellite radar systems : overview and case study*. Pages 1-45

W.E. Pratt et D.W. Johnson. *Local Subsidence of the Goose Creek Oil Field*. Journal of Geology 34, 1926, n°7, p. 1-590

White Paper sur la technique de résolution des ambiguïtés entières de phase du CNES, [en ligne]. Disponible sur : <http://www.ppp-wizard.net/Articles/WhitePaperL5.pdf>. (consulté le 25 juillet 2019).

K. Zimmermann, 2011. Modeling and Prediction of Ground and Strata Deformation based on InSAR & GPS Measurements, Reservoir Parameters and Production Data, 25p.



## Table des annexes

Annexe 1 Subsidence sur le champ YADANA.....	65
Annexe 2 Système géodésique employé en Angola.....	74
Annexe 3 Exemple de profil de célérité .....	75
Annexe 4 Trajectoire d'un signal acoustique entre deux transpondeurs .....	76
Annexe 5 Techniques d'interpolation .....	77
Annexe 6 Types de matériels à utiliser .....	80
Annexe 7 Simulation d'un suivi de subsidence d'une durée de 10 ans avec un déploiement de 30 capteurs.....	82
Annexe 8 Résultats issus lors des premiers calculs (1 an) sur les stations YDNA, TEPM, WP02, WP03 .....	85

# Annexe 1

## Subsidence sur le champ YADANA



### Summary of Yadana Platform Subsidence Monitoring Services

**DMT GmbH & Co. KG**

Exploration & Geosurvey Surveying & Geomonitoring

**Client:** TOTAL E&P Myanmar  
No. 5 Sacred Tooth Relic Lake Ave. Punn Pin Gone Quarter No. 5  
Mayangone Township  
Yangon, Myanmar

**DMT project number:** EG-IG-07-152

**Report date:** 20.01.2016

**Number of pages including appendix:** 30

**Editors:** Dr.-Ing. Karsten Zimmermann  
Dipl.-Ing. Andre Lüttmann Dipl.-Ing. Gerd Palte

Am Technologiepark 1  
45307 Essen Germany

Phone +49 201 172-1970  
Fax +49 201 172-1971  
dmt@dmt.de  
www.dmt.de

Managing Company:  
DMT Verwaltungsgesellschaft mbH  
represented by its managing directors  
Heinz-Gerd Körner (CEO)  
Prof. Dr. Eiko Räkera

Chairman of the Supervisory Board: Dr.  
Guido Rettig

DMT GmbH & Co. KG Registered  
office: Essen Registration court:  
Amtsgericht  
Essen, registration no. HRA 9091

DMT Verwaltungsgesellschaft mbH  
Registered office: Essen Registration  
court: Amtsgericht Essen, registration  
no. HRB 20420

Member of TÜV NORD Group



## **INHALTSVERZEICHNIS**

<b>1</b>	<b>Monitoring System .....</b>	<b>3</b>
1.1	Yangon - TEPM Building .....	3
1.2	Yadana – Offshore Quarter Platform .....	3
1.3	Yadana – Offshore Wellhead Platform 2 .....	3
1.4	Yadana – Offshore Wellhead Platform 3 .....	4
<b>2</b>	<b>GPS Data Processing and Results .....</b>	<b>4</b>
2.1	General .....	4
2.2	Equipment Settings .....	5
2.3	Raw Data (RINEX Files) .....	6
2.4	Data Processing.....	7
2.5	Processing Parameter .....	8
2.6	Results - Precise Point Positioning (PPP) .....	9
2.7	Results - Network Processing (NET) .....	11
<b>3</b>	<b>Tide Gauge Monitoring.....</b>	<b>12</b>
3.1	Leveling .....	12
3.2	Results.....	12
<b>4</b>	<b>Appendix Section .....</b>	<b>12</b>

# **1 Monitoring System**

This section gives an overview of the installations for the GPS monitoring system.

## **1.1 Yangon - TEPM Building**

The reference station (abbr. TEPM) of the GPS system was installed in the office of the TEPM-building in 10/2008. While the GPS antenna was installed on top of the radio tower the control unit of the GPS was installed in a technical room. Power supply, LAN connection and the plug in of the antenna was available there. Rustproof steel was used for the bracket of the antenna.

The GPS station on TEPM- building is the reference station for the GPS monitoring network. It is assumed that this station is not exposed by movements in the future. To check the stability of this point a GPS static measurement was performed measuring two additional independent control points next to TEPM. One point is close to the building on TEPM parking place and the other point is a few kilometers away on a parking place of the Sedona Hotel. During the annual maintenances in the next years these points will be used to validate/evaluate the coordinate of the reference station. The results will be submitted in separate reports.

## **1.2 Yadana – Offshore Quarter Platform**

Offshore, on the quarter platform of the Yadana field the second GPS station (abbr. YDNA) was installed in 10/2008. The installation of the YDNA GPS station was similar to the TEPM-building station. In the technical room the control unit of the GPS could be installed, because of available power supply, LAN connection and plug in of the antenna. The GPS antenna was installed on the top of the radio tower.

## **1.3 Yadana – Offshore Wellhead Platform 2**

On wellhead platform 2 of the Yadana field the third GPS station (abbr. WP02) was installed in 02/2010. The environmental conditions on wellhead platform 2 required an explosion-proof installation. Therefore both antenna and control unit were installed in explosion-proof enclosures. All the installations were equipped with power supply and LAN connection. The GPS antenna was installed on the upper deck of the wellhead platform.

Because of satellite signal reception problems the antenna enclosure was changed on 17.08.2010 by a new enclosure type. The new enclosure type is supposed to increase the signal quality.

### **1.4 Yadana – Offshore Wellhead Platform 3**

On wellhead platform 3 of the Yadana field the fourth GPS station (abbr. WP03) was installed in 02/2010. The installation of WP03 GPS station was similar to WP02 station. The environmental conditions on wellhead platform 3 required an explosion-proof installation. Therefore both antenna and control unit were installed in explosion-proof enclosures. All the installations were equipped with power supply and LAN connection. The GPS antenna was installed on the upper deck of the wellheadplatform.

Because of satellite signal reception problems the antenna enclosure was changed on 20.08.2010 by a new enclosure type. The new enclosure type is supposed to increase the signal quality.

## **2 GPS Data Processing and Results**

### **2.1 General**

For the GPS processing the Bernese GPS Software is used. This software is a high-end processing software for analyzing GNSS data, developed at the Astronomical Institute of the University of Bern/Switzerland. Since many years the software is used for the contribution of the Center of Orbit Determination in Europe (CODE) to the International GNSS Service (IGS).

On November 11th 2013 a software update from Bernese 5.0 to the latest release 5.2 was conducted.

Besides the GPS stations TEPM (Total Headquarter), YDNA (Yadana – Oil Platform), WP02 (Yadana – Wellhead Platform 2) and WP03 (Yadana – Wellhead Platform 3), also the ITRF Stations KUNM (ITRF Station – Kunming China), BAN2 (ITRF Station – Bangalore India) and HYDE (ITRF Station – Hyderabad India) are processed. As additionally requested by Total also IGS station CUSV (Bangkok Thailand) is included in the processing starting from 09.11.2008. This station is not part of the ITRF 2005 reference network solution.

**GPS data of all stations were processed from:**

**28.10.2008 - 31.01.2015, 22.11.2015 - 28.11.2015**

The processing is based on post processing orbits from IGS. IGS provides orbit data with different accuracy levels. The highest accuracy is provided by IGS final orbits. These orbits are only available with a delay of about 3 weeks. To be able to process and provide a short term solution, IGS rapid orbits were used. These orbits still provide very high accuracy and are available with about 3 days of time delay. This analyzing report presents both a final orbit processing (with delay in time) and a rapid orbit processing.

The results presented in this report have been generally performed on the following approach:

1. Rapid and final processing of a Precise Point Positioning (PPP) of daily solutions using 24 h (if available) observations of the GPS stations TEPM (Total Headquarter), YDNA (Yadana – Oil Platform), WP02, WP03, KUNM , BAN2, HYDE and CUSV.
2. Rapid and final processing of daily network solutions using 24 h (if available) observations of the GPS station YDNA, WP02, WP03 and TEPM. The station TEPM is introduced as reference station with fixed coordinates. The TEPM reference coordinates are heavily constrained to mean coordinates of the PPP result.
3. Rapid and final processing of weekly network solutions derived from the daily network solution for GPS station YDNA, WP02 and WP03.

Please see the following sections for a processing- and result summary.

## 2.2 Equipment Settings

The following equipment settings and parameters are used for the processing:

Station	Receiver Type	Antenna Type	Antenna Height	Description
YDNA	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG	0,000	Total QP Yadana
TEPM	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG	0,000	Total HQ Rangoon
WP02	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAR29	0,000	Total WP 2 Yadana
WP03	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAR25	0,000	Total WP 3 Yadana
HYDE	LEICA GRX1200GGPRO	LEIAT504GG	0,000	ITRF Station India
KUNM	ROGUE SNR-8000	AOAD/M_T	0,079	ITRF Station China
BAN2	AOA BENCHMARK ACT	AOAD/M_T	0,046	ITRF Station India
CUSV	TRIMBLE NETRS	TRM41249.00	0,000	IGS Station Thailand

Table 2-1: station equipment

Details on ITRF station equipment is based on the information provided on the ITRF website: <http://itrf.ensg.ign.fr>.

As defined in the relative antenna phase center variation model ([ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/igs\\_08.atx](ftp://igsceb.jpl.nasa.gov/igsceb/station/general/igs_08.atx)) neither elevation nor azimuth dependent corrections are applied for these antennas.

The distribution of the GPS stations is visualized below:

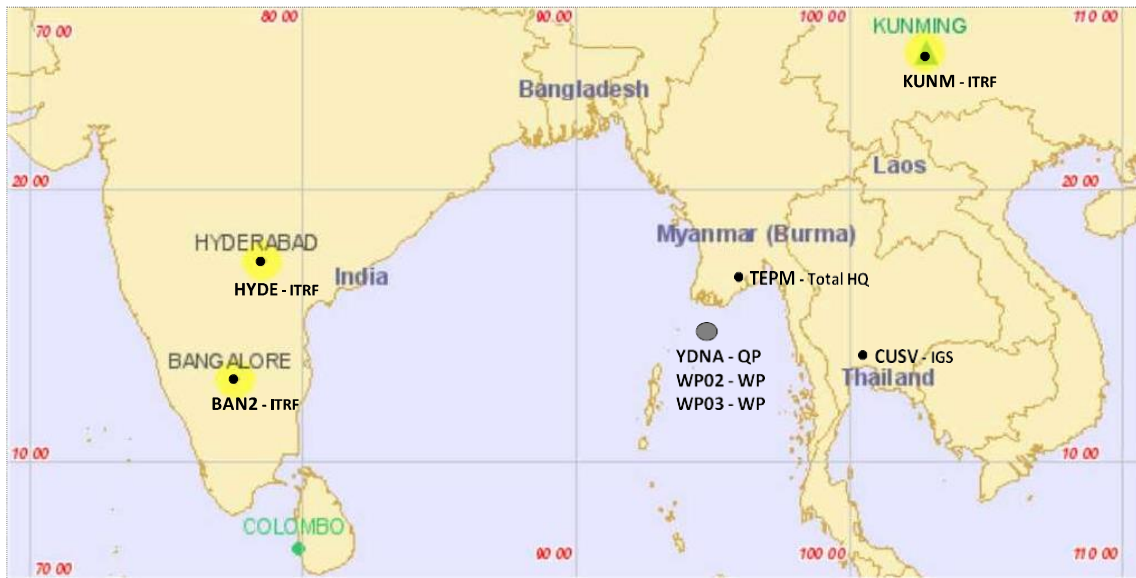


Figure 2-1: Location of GPS stations

### 2.3 Raw Data (RINEX Files)

The RINEX raw data of GPS stations TEPM, YDNA, WP02, WP03 and ITRF/IGS provide 24 h observation files with 30 second time interval.

The RINEX data of stations TEPM, YDNA, WP02 and WP03 was transferred via Total/DMT ftp internet connection. The ITRF data was down- loaded from the public IGS webpage:

<ftp://igs.ensg.ign.fr/././././pub/igs/data/>.

The illustrations in Appendix 1-1 show the observation times of all processed GPS stations. A statistical plot of available and processed data for the complete measurement period is given, showing the total observation time and the lost observation time (due to receiver offs, no electricity, bad observation data) in days and total percentage.

The total observation time of TEPM and YDNA is close to 100%. The total observation time of WP02 and WP03 is lower, but nearly 90% in terms of total measurement time. Several days of observation were lost because of receiver logging and tracking failures due to the first installed enclosure type. However, the latest available data files with the new enclosure type installed indicate a much better signal reception and therefore higher total observation times in the future.

As shown in the Appendix ITRF/IGS in the last 3 months GPS data of BAN2, CUSV, HYDE, KUNM were not or only temporally available. IGS states on their website the station status “DOMRANT” and no data is currently available. However, also a no data situation for ITRF stations has no influence on subsidence processing of YDNA, WP02 and WP03 platform.

## **2.4 Data Processing**

The Bernese GPS Software Version 5.0 and 5.2 (with latest updates) was used for processing. For detailed information concerning the software the user manual is available at:

<http://www.bernese.unibe.ch/DOCS/DOCU50.pdf>

The general data flow through the software is displayed in the figure below:



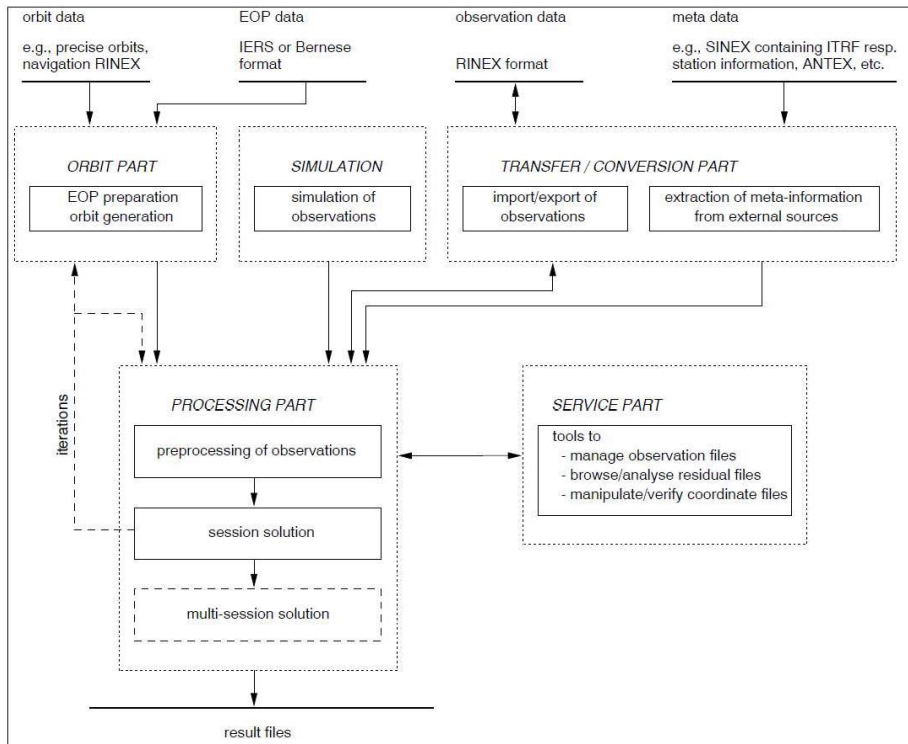


Figure 2-2: General data flow using Bernese GPS software

## 2.5 Processing Parameter

The data was processed in four main steps. The steps and used parameters are the same for IGS final and rapid orbits. The most important processing options for each processing step are listed below:

1. A first coordinate solution for all stations was performed by a Precise Point Positioning (PPP) introducing the IGS orbits and satellite clocks

The results are compiled in section 2.6

The elevation cut-off is 5 degree, an elevation-dependent weighting is applied ( $1/\cos z$ )

Phase and smoothed code measurements are used together in a weighting relation of 100:1

The ionosphere-free linear combination is used

Site-specific vertical troposphere parameters are estimated every two hours; the Niell mapping function is used; in addition one set of troposphere gradient parameters are solved per day

2. The pre-processing includes the cycle slip detection and (if possible) correction, a screening of post-fit residuals from a double-difference network solution, and the resolution of phase ambiguities to their integer value. Almost all ambiguities could be resolved to their integer value.
3. The final network solution is computed for the TEPM, YDNA, WP02 and WP03 using double-differences of the observations with the following processing options:

The results are compiled in section 2.7

The elevation cut-off is 3 degree, an elevation-dependent weighting is applied ( $1/\cos z$ )

Only phase measurements are used introducing the phase ambiguities as integers

The ionosphere-free linear combination is used

The position for the reference station TEPM is heavily constrained to its PPP mean value of the daily solutions

Gradient parameters are estimated for the troposphere with an 24 h resolution (which is mandatory for the baseline lengths); vertical troposphere parameters are estimated with an hourly resolution

4. A weekly solution was derived from daily solutions by combining the normal equations containing the station coordinate as well as the troposphere parameters. Due to the piece-wise linear parameterization the troposphere is continuously modeled during this week. The results are summarized in section 2.7

# Annexe 2

## Système géodésique employé en Angola

TOTAL E&P ANGOLA



EP/EXPLO/TE/MTG/TTP Topography  
December 2015

### GEODETIC SYSTEMS on offshore blocks 3 – 17 – 25 – 40 & onshore North of Luanda

#### 1. OFFICIAL COORDINATE REFERENCE SYSTEM

Datum Name : **CAMACUPA VUMBATUMBA** **TOTAL code: CAM**  
*Triangulation of « Missao Hidrografica da Angola (MHCA) along North Coast of Angola. VUMBATUMBA is a prime order marker of MHCA, situated in the center of this area, North of LUANDA.*

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

Projection : **UTM zone 33S (Universal Transverse Mercator zone 33 South)** **TOTAL Code : S33**  
 Central meridian            = 15° East Greenwich  
 Latitude of origin            = Equator  
 False Easting                = 500 000 m  
 False Northing              = 10 000 000 m  
 Scale factor on C.M.        = 0.999 6

Projected Coordinate System: **Camacupa / UTM zone 33 South** **EPSG Code : 22033**

#### 2. GNSS DATUM

Datum Name : **International Terrestrial Reference Frame (ITRF 2008)** **TOTAL code: W84**  
*This datum is equivalent to the WGS 84 (World Geodetic System 1984) datum.*

Spheroid : **GRS 1980** **TOTAL code: GRS**  
 Semi major axis            a = 6 378 137.000  
 Semi minor axis            b = 6 356 752.314  
 Inverse flattening        1/f = 298.257 222 1

#### 3. DATUM SHIFT

From **CAMACUPA VUMBATUMBA** to **ITRF 1992** :

*Datum shift parameters calculated from data acquired using DORIS system (ITRF 1992 at epoch November 1994) on platform PAL-F2 by TOPNAV / ELF.*

Delta X                    =        minus    50.9 m  
 Delta Y                   =        minus    347.6 m  
 Delta Z                   =        minus    231.0 m

Geodetic transformation : **Camacupa to WGS 84 (10)** **EPSG Code : 1327**

#### 4. EXAMPLE of TRANSFORMATION

Geodetic Point Vumbatumba MHCA		Datum Camacupa Vumbatumba code CAM	Datum ITRF 1992 (WGS84) code W84
Geographic	Latitude	6° 26' 17.1103" S	6° 26' 22.5100" S
	Longitude	12° 27' 22.9784" E	12° 27' 12.2900" E
	Ellipsoid height	33.2 m	43.0 m
Grid	Easting S33	218 636.36 m	218 313.72 m
	Northing S33	9 287 732.57 m	9 287 499.77 m

Geodesy-Angola- blocs 3-17-25-40 & onshore North.docx

10/11/2014

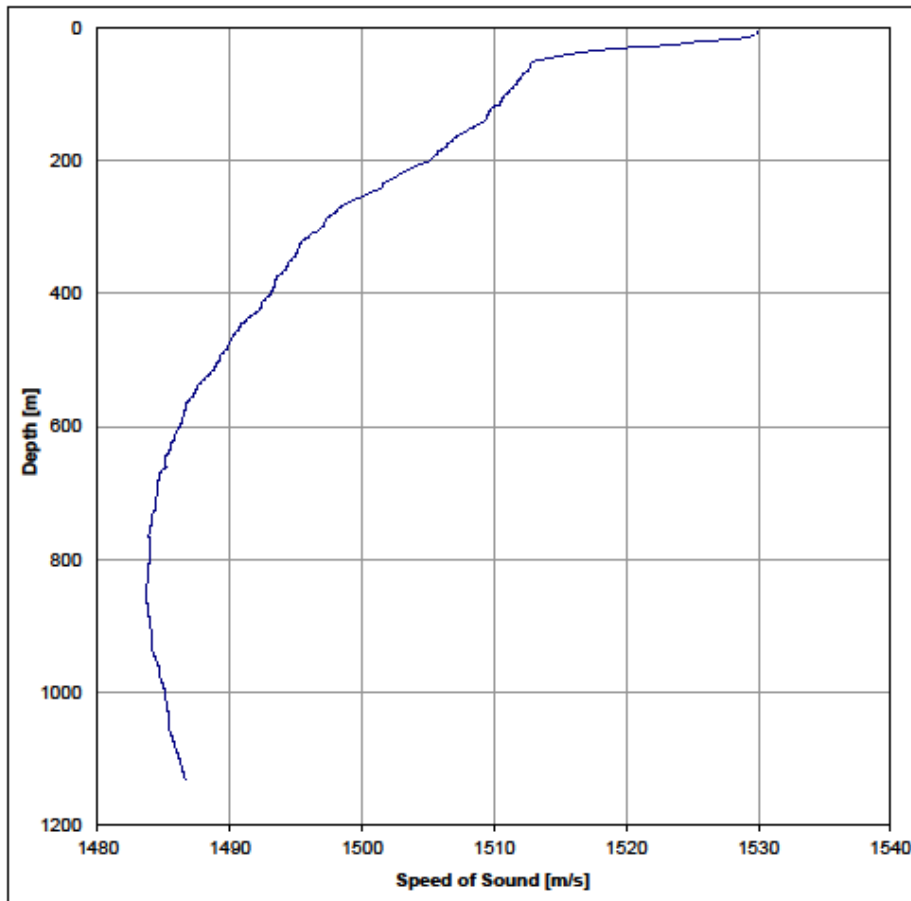
# Annexe 3

## Exemple de profil de célérité

**SOUND SPEED PROFILE REPORT**



Profile details		
Project number: CA245	Date and time: 23:35 07/Sep/2015	
Client: Total Angola	Transducer depth: 10.00 m	
Survey area: CLOV 654	Water depth: 1130.69 m	
Easting: 130792 m	Transducer speed of sound: 1529.89 m/s	
Northing: 9174459 m	Bottom speed of sound: 1486.68 m/s	
Sensor type: CD204	Average speed of sound: 1492.47 m/s	
Sensor S/N: 1209.00	Average density: 1029.65 kg/m <sup>3</sup>	

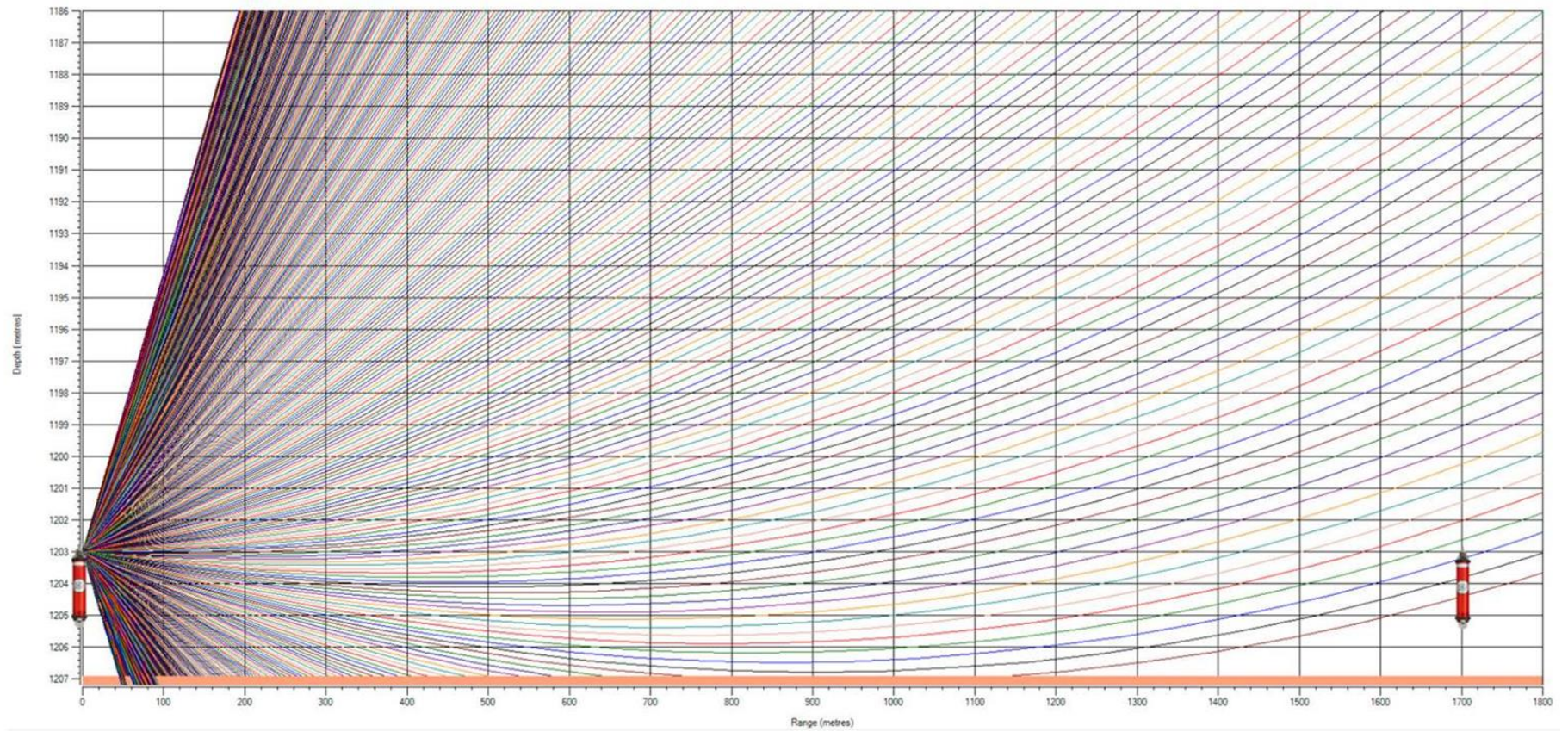


For Fugro Survey B.V.

For Total E&P Angola



## Annexe 4 Trajectoire d'un signal acoustique entre deux transpondeurs



## Annexe 5

### Techniques d'interpolation

Il existe une multitude de techniques d'interpolation variant selon les domaines d'application, allant du domaine de la prospection minière à n'importe quel domaine dont les données possèdent une répartition spatiale. Toutes ces techniques d'interpolation (triangulation, krigeage, inverse de la distance au carré, ...) permettent d'estimer une valeur  $s$  (*a priori* inconnu) à une position  $z$  (connu) en prenant en compte les valeurs proches pondérées de la distance à  $z$ . Un inventaire de méthodes d'interpolation spatiale a été dressé par Baillargeon (2005).

On distingue deux grandes classes de méthodes d'interpolation spatiale : les méthodes déterministes et les méthodes probabilistes dites stochastiques.

#### Méthodes déterministes :

- Méthode barycentrique encore appelée « moyenne mobile », c'est la méthode la plus classique : la valeur  $s$  en un point non échantillonné est estimée par une moyenne pondérée des valeurs proches observées. Ces poids sont fonction de la distance au point  $s$  de telle sorte que les sites les plus proches aient plus d'influence dans l'interpolation. Ainsi, seules les observations se trouvant dans un rayon  $R$  défini sont prises en compte. Un exemple très connu est la méthode de l'inverse de la distance à une puissance  $d$ . La valeur par défaut de cette puissance est  $d = 2$ , malgré le fait qu'il n'existe pas d'arguments théoriques démontrant ce choix.
- Méthode d'interpolation par partitionnement de l'espace, c'est un sous-ensemble de la méthode barycentrique à la différence que le champ d'étude est partitionné dans l'intention de déterminer les poids des observations ainsi que le voisinage des points. Les techniques de partitionnement sont soit par polygones soit par triangles. Le partitionnement par polygones (à l'instar de Polygones de Thiessen, diagramme de Voronoï et mosaïque de Dirichlet) consiste à définir pour chaque site d'observation, un polygone et à lui attribuer une valeur. Tandis que le partitionnement par triangle (par exemple Triangulation de Delaunay) consiste à découper le champ en triangles disjoints dont les sommets sont les points échantillonnés. Dès que les partitions ont été créées, la méthode d'interpolation peut varier de la méthode du plus proche voisin (la plus simple des méthodes) à la méthode d'interpolation linéaire (utilisée en triangulation Delaunay). Généralement, ces méthodes d'interpolation ne permettent

pas d'extrapoler les valeurs au-delà de l'enveloppe convexe des sites échantillonnés : on dit qu'elles possèdent des propriétés locales et exactes. Si l'échantillonnage n'est pas assez homogène, l'interpolation peut présenter des surfaces abruptes.

- Splines : elle est différente des deux autres méthodes car elle n'interpole pas point par point mais ajuste une surface sur tout le champ. Cette surface peut être formée en passant à proximité des points échantillonnés, particulièrement les splines de lissage ou alors en étant contraint de passer par ces points, il s'agit des splines d'observations.

#### Méthodes stochastiques :

- Régression : on distingue la méthode d'interpolation par régression classique et celle par régression locale. La deuxième est une extension de la régression classique. La méthode d'interpolation de la régression classique repose sur le même principe que l'interpolation par spline car elle consiste en un ajustement de la surface aux valeurs proches observées. Toutefois, certains auteurs considèrent cette technique comme étant déterministe mais, développée à l'origine dans un but statistique et possédant des propriétés à la fois approximatives et globales, elle sera considérée comme stochastique.
- Krigeage : cette méthode est très utilisée dans le domaine de l'exploration géologique et minière. Elle tient compte de la dépendance spatiale des données c'est-à-dire que le poids appliqué aux valeurs proches n'est plus uniquement corrélé par la distance. Le choix des poids est basé sur la corrélation entre les points et la distance qui les sépare. Ceci permet d'obtenir une estimation non biaisée, raison pour laquelle le krigeage est le nom donné à la meilleure technique de prévision linéaire sans biais. Cette technique est très souple et peut être globale ou locale en fonction du voisinage choisi. Ainsi, ses avantages sont nombreux et ont été listés par Marcotte (2006). Nous ne citerons que ceux qui nous seront utiles dans le cadre du suivi de subsidence :
  - ✓ C'est un interpolateur exact (estimation d'un point connu est égale à la valeur initiale), linéaire, non biaisée ;
  - ✓ Il tient compte de la répartition des points entre eux ainsi que de la taille du champ à échantillonner ;
  - ✓ L'utilisation d'un variogramme permet de tenir compte de la continuité du phénomène étudié.

Au vu de ses différents avantages, il est clair que le krigeage ressort comme étant la méthode d'interpolation la plus intéressante. Contrairement aux autres méthodes citées précédemment, c'est la seule qui prend en compte la dépendance spatiale des données. Toutefois, si les positions des données sont mal réparties avec des écarts importants entre les valeurs proches, les estimations peuvent être peu ou pas fiables.



## Annexe 6

### Types de matériels à utiliser

Modèles	PMT <sup>®</sup>	AZA <sup>®</sup>	Dunker 6 <sup>®</sup>
Constructeur	Sonardyne	Sonardyne	Sonardyne
Longueur x diamètre	684 x 330 mm	691 x 350 mm	692 x 200 mm
Autonomie	Entre 5 et 12 ans	Jusqu'à 10 ans	3 jours
Contrôle	Autonome	Autonome	Pilotage à l'aide d'un câble dans un rayon de 10 m
Communication	Télémetrie	Télémetrie	Télémetrie
Énergie	Batterie	Batterie (504 Ah)	Batterie
Vitesse	Jusqu'à 1.125ko/s	Jusqu'à 1.125ko/s	Jusqu'à 1.125ko/s
Support	Oui	Oui	Non

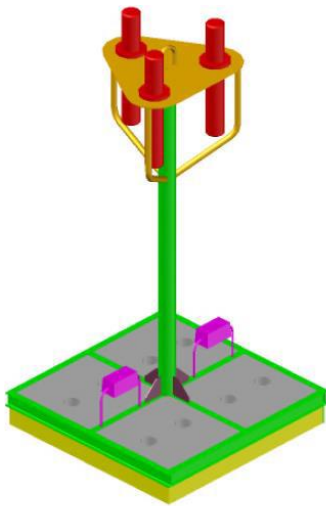


Figure 6.1 - De gauche à droite : PMT<sup>®</sup>/AZA<sup>®</sup> ; Dunker 6<sup>®</sup> ; Supports permanents ; Supports utilisés pour installer directement les transpondeurs au fond de l'eau (Sonardyne, 2019)

## **Annexe 7**

### **Simulation d'un suivi de subsidence d'une durée de 10 ans avec un déploiement de 30 capteurs**

Ces calculs ont été faits à l'aide du logiciel Excel. Les prix des différents matériels sont issus du devis confidentiel que nous a fourni un membre de l'équipe de Sonardyne. Ainsi, le coût opérationnel sera détaillé et calculé dans cette partie.

- Il comprend le coût du personnel et celui du support navire. En se basant sur les expériences réalisées par Total lors du positionnement en mer, le tarif est fixé à 20 000€/jour. Le coût du support navire comprend la durée de déploiement des capteurs qui seront utilisés, le temps de transmission des données vers la surface. Ces données sont calculées en jour puis converties en coût (euros). Le calcul du temps de transmission des données par télémétrie fait intervenir plusieurs paramètres :
  - ✓ la taille des fichiers enregistrés par chaque capteur de manière journalière : en moyenne, elle est de 2ko/jour. Afin de surveiller le phénomène de subsidence de près, il faut récupérer les données tous les 3 mois (90 jours). Toutefois, si on constate un affaissement brusque ou anormal du champ, des mesures peuvent être récupérées à la demande à n'importe quel moment.
  - ✓ la vitesse de transmission des données : Il est important de noter que la vitesse de transmission varie en fonction des conditions environnementales du champ à savoir la vitesse du son, le bruit, etc. Plus les conditions sont mauvaises plus la vitesse de transmission est réduite. D'après la fiche de constructeur, la valeur maximale est fixée à 1.125ko/s. Pour un champ comme CLOV dont les conditions sont peu variables, nous avons décidé de définir l'intervalle de la vitesse entre 0.375 et 0.75 ko/s.
  - ✓ le temps de trajet du bateau entre chaque capteur : il est déduit de la résolution (distance entre chaque capteur) et de la vitesse parcourue par le bateau. Cette vitesse moyenne est de 10 nœuds donc 18.7km/h.

Afin de récupérer la donnée, le bateau doit être placé à une distance minimum du capteur. Cette distance varie en fonction de la profondeur d'eau. Une profondeur de 1300m

nécessitera une distance d'environ 10m entre le bateau et le capteur (cf. figure 7.1). Ainsi, chaque capteur est interrogé individuellement.

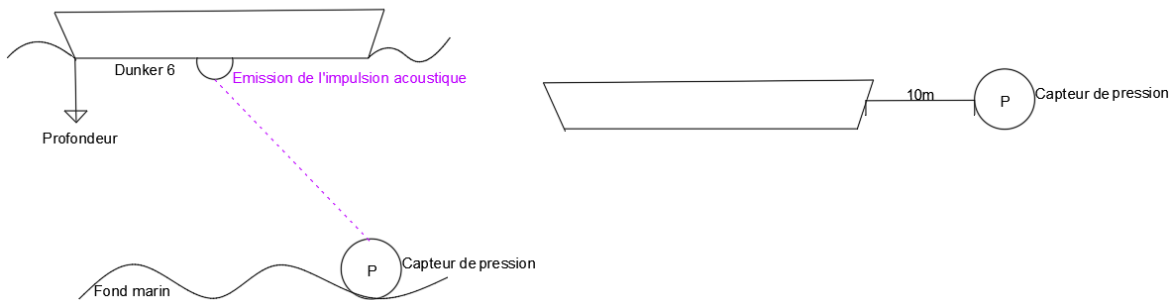


Figure 7.1 : Représentation de la méthode de transmission des données - sans échelle

### *Démonstration de calcul*

<b>Données en entrée</b>	<b>Valeurs</b>
Durée d'installation de 30 capteurs $D_I$	10 jours
Taille de fichier enregistré par jour $T$	2 ko/jour
Vitesse de transmission des données $V_t$	0.625 ko/s
Vitesse du bateau $V_b$	18.7 km/h
Durée de l'étude $D$	10 ans
Nombre de capteurs déployés $N$	30
Résolution $R$	0.5 km

Les données telles que la taille de fichier, la vitesse de transmission ont été fournies par Sonardyne tandis que les autres données à l'instar de la durée d'installation et la vitesse du bateau se sont basées sur les différents projets de TOTAL déjà effectués.

Les résultats de chaque calcul sont disponibles dans le tableau suivant. Le calcul est d'abord fait sur une durée de 3 mois (période à laquelle l'équipe de Géophysique aimerait recevoir la donnée) puis il sera agrandi à une échelle de 10 ans.

Le premier calcul numérique est de déterminer en moyenne la taille de fichier que va enregistrer un capteur sur 3 mois (90 jours) :  $P = T \cdot 90 = 180 \text{ ko}$

Calculs	Pour N égale à 1 capteur	Pour N égale à 30 capteurs
Temps de transmission des données (en heure) $T_d = P/V_t$	0.08 h	2.4 h
Temps de trajet du bateau (en heure) $T_b = R/V_b$	0.03 h	0.9 h
Total	0.1h	<b>3.3 h</b>

Si pour trois mois la durée nécessaire pour transmettre les données vers la surface est de 3.3h, ainsi sur une durée de 10 ans (120 mois), la durée sera estimée à 132h soit environ 5 jours réparties séquentiellement.

Enfin, la durée totale de l'opération est exprimée par  $S = 5+10 = 15$  jours

Les tableaux ci-dessous illustrent le coût d'une étude de suivi de subsidence sur 10 ans.

Article	Action	Prix à l'unité	Coût (euros)
30	PMT	64 611.84	1 938 355.20
30	Service de pré-caractérisation de la dérive	5 033.62	151 008.60
11	Fixations mécaniques	4 491.30	49 404.30
19	Stand à base large	14 274.47	271 214.93
1	Dunker 6		42 133.46
15	Ingénieur visite lors de la simulation de la subsidence (en jours) réévaluation des conditions météorologiques de CLOV	20 000	300 000.00
		Total	2 752 116.49

Tableau 7.1 : Proposition de coût avec utilisation de capteurs type PMT®

Article	Action	Prix à l'unité	Coût (euros)
30	AZA fetch	88 990.62	2 669 718.60
11	Fixations mécaniques	4 491.30	49 404.30
19	Stand à base large	14 274.47	271 214.93
1	Dunker 6		42 133.46
15	Ingénieur visite lors de la simulation de la subsidence (en jours) réévaluation des conditions météorologiques de CLOV	20 000.00	300 000.00
		Total	3 332 471.29

Tableau 7.2 : Proposition de coût avec utilisation de capteurs type AZA®

## Annexe 8

### Résultats issus lors des premiers calculs (période d'1 an) sur les stations YDNA, TEPM, WP02, WP03

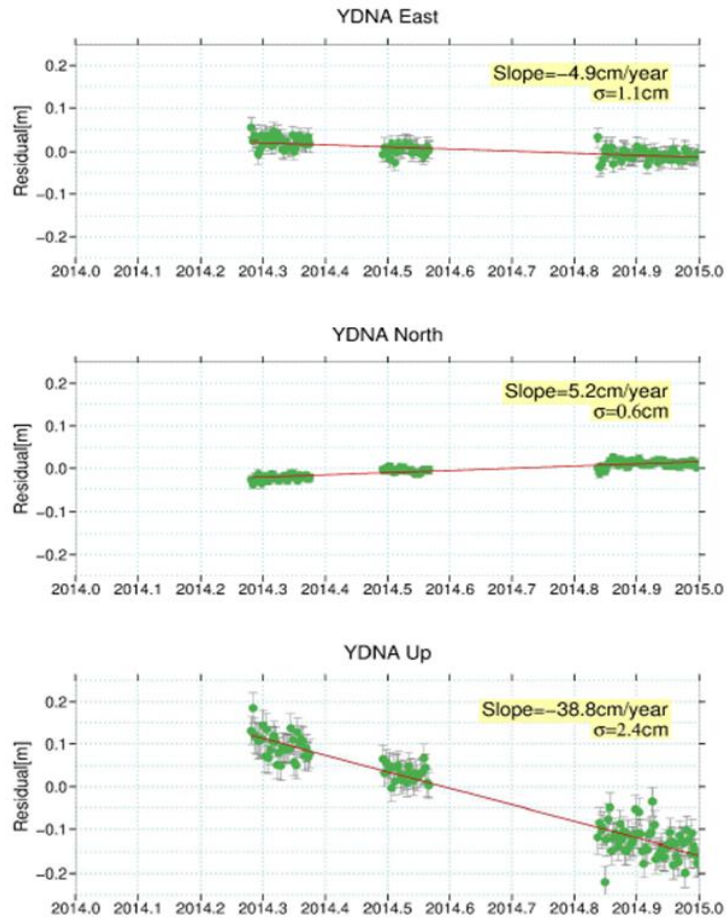


Figure 8.1 : Séries de temps journalières de la station YDNA

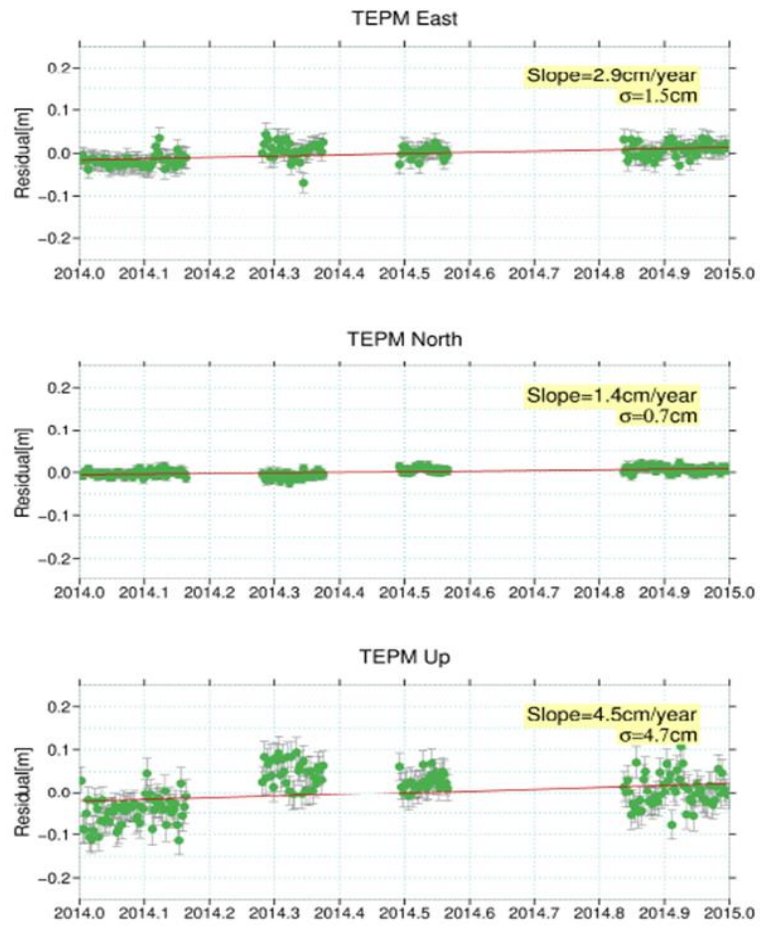


Figure 8.2 : Séries de temps journalières de la station TEPM

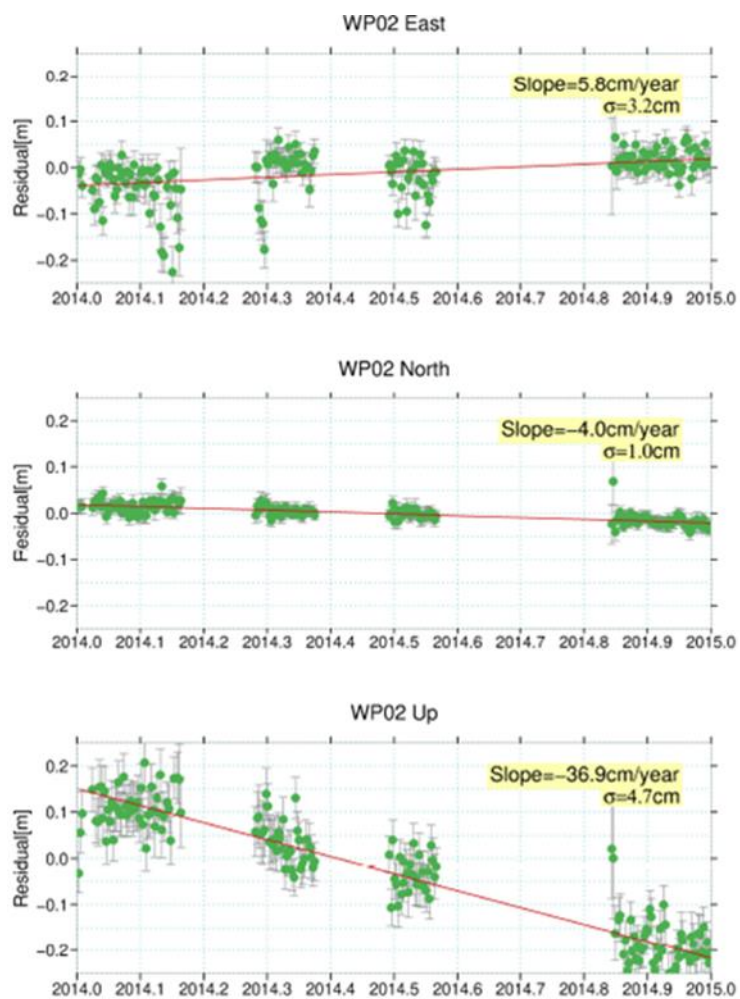


Figure 38 : Séries de temps journalières de la station WP02



## Liste des figures

Figure 1: Entité AST au sein du groupe TOTAL - sans échelle .....	8
Figure 2: Modélisation de la subsidence - Source : Karsten Z., 2011 .....	11
Figure 3 : Constitution du modèle géomécanique - Source : Journée MOMAS 2006 – UPPA.....	12
Figure 4 : Démonstration de l'effet d'arc - Source : Jithu G Francis .....	12
Figure 5 : Photographie de la subsidence du champ Goose Creek - Source : Galloway et al., 1999	13
Figure 6 : Processus d'exploration - croquis sans échelle .....	15
Figure 7 : FPSO CLOV mobilisée sur le bloc 17 - Source : Total, 2019.....	16
Figure 8 : ROV en acquisition sous l'eau - Source : 3D Techniques-Effects, 2013 .....	17
Figure 9 : Différents signaux de chaque satellite en fonction de la fréquence - Source : R. Lahaye, 2014.....	18
Figure 10 : Principe de la trilatération - Source : cours ESGT.....	19
Figure 11 : Séries de temps des hauteurs estimées sur une durée de 5.5 années.....	21
Figure 12 : Antenne GNSS - Source interne .....	21
Figure 13 : Principe d'un réseau LBL (la ligne rouge illustre le signal acoustique envoyé par l'hydrophone au transpondeur et la ligne verte représente l'interrogation mutuelle de chaque transpondeur dans le réseau - source : Donald Thomson, 2005 .....	23
Figure 14 : Composantes principales d'un AZA – Source : EAGE, 2019.....	27
Figure 15 : Fonctionnement du mécanisme AZA– Source : EAGE, 2019 .....	27
Figure 16 : Expérience réalisée sur 120 capteurs soumis aux mêmes conditions pendant plusieurs mois afin de déterminer les caractéristiques de la dérive et la qualité des capteurs. Chaque couleur correspond à un capteur. Les pics font référence à la perte d'informations lors des tests. - Source : Geophysical Society of Houston, 2018.....	28
Figure 17 : Différences entre la position entachée d'erreur et la position vraie - Source interne ....	29
Figure 18 : Localisation du FPSO CLOV (squirrel noir) par rapport aux autres champs - Source : Total, 2018.....	30
Figure 19 : Schéma illustrant l'évolution de la subsidence issue d'une étude sismique .....	31
Figure 20 : Capture d'écran de deux lignes de base (lignes blanches) passant à travers des structures sous-marines (sans échelle). Les lignes vertes et roses représentent les canalisations servant au transport d'hydrocarbures et les petits objets en blanc représentent les collecteurs.....	34
Figure 21 : Design d'un réseau de capteurs de pression issu des calculs de Sonardyne (le rectangle en blanc délimite la zone d'affaissement, les cercles rouges avec un point blanc au centre représentent les différents capteurs installés sur des supports déjà existants et ceux sans points désignent les capteurs qui seront installés directement au fond de l'eau). .....	37
Figure 22 : Capture d'écran d'un réseau de 30 transpondeurs : les points entourés de petits cercles représentent les capteurs installés directement au fond de l'eau et le reste représente ceux installés sur les stands existants ; les grands cercles représentent les courbes de niveau tracées avec AutoCAD. ....	38
Figure 23 : Évolution de la subsidence avec une simulation de 30 capteurs (à gauche) et 178 capteurs (à droite).....	39
Figure 24: Évolution du coût avec usage de PMTs (à gauche) et d'AZAs (à droite).....	41
Figure 25 : Time shift issu d'une étude sismique (les traits noirs représentent les failles, les trajectoires en vert correspondent aux puits de production).....	42
Figure 26 : Positionnement pseudo-statique en temps réel ( $\Delta t$ : longueur de session) – source interne.....	47
Figure 27 : Positionnement pseudo-statique en temps réel (longueur de la session $\Delta t$ et un temps de glissement $\Delta t/2$ ).....	48
Figure 28 : 3 traitements forward (vert), backward (rouge) et forward+backward (bleue) en mode statique – source interne .....	49
Figure 29 : Séries de temps journalières de la station IGS, ONSA.....	51
Figure 30 : Séries de temps journalières de la station WFR .....	52
Figure 31 : Séries de temps journalières de la station F15A.....	53
Figure 32 : Séries de temps journalières de la station TEPM.....	54

Figure 33 : Séries de temps journalières de la station YDNA.....	55
Figure 34 : Séries de temps journalières de la station WP02 .....	56
Figure 35 : Séries de temps journalières de la station WP03 .....	57
Figure 36 : Séries de temps issues du traitement de session 2h de la station ONSA .....	58
Figure 37 : Séries de temps issues du traitement de session 2h de la station WFR .....	59

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Coûts finaux en fonction de la résolution.....	40
Tableau 2 : Détails des équipements utilisés sur chaque station.....	50

## Mesure de subsidence dans le domaine marin.

Mémoire d'Ingénieur C.N.A.M., Paris

---

---

### RÉSUMÉ

La subsidence est un phénomène qui est de plus en plus rencontrée dans le secteur de l'industrie pétrolière et même ailleurs. Afin d'anticiper les conséquences que cela peut entraîner tant en surface que sur le fond marin, il est nécessaire de le mesurer. Cette mesure est la plus souvent faite sur le long terme car c'est un phénomène lent et progressif. Dans ce travail de fin d'étude, nous proposons deux méthodes de suivi de subsidence : le GNSS PPP en surface et la mesure par capteurs de pression en sous-marin. Ces deux méthodes ont été évaluées à l'aide de deux cas d'étude. À l'issue de nos traitements, nous sommes en mesure de garantir la précision de chaque méthode.

**Mots clés : Subsidence, GNSS PPP, capteur de pression, surface, sous-marin, précision.**

---

---

### SUMMARY

Subsidence is a phenomenon that is increasingly encountered in the oil industry and elsewhere. In order to anticipate the consequences that this can cause both on the surface and on the seabed, it is necessary to measure it. This measure is most often made in the long term because it is a slow and progressive phenomenon. In this final work, we propose two subsidence monitoring methods : GNSS PPP on the surface and measurement by pressure sensors for deepwater. Both methods were evaluated using two case studies. At the end of our treatments, we are able to guarantee the accuracy of each method.

**Key words : Subsidence, GNSS PPP, pressure sensors, surface, submarine, accuracy.**