

## Une nouvelle solution pour les métrologies sous-marines

■ **Éric GUILLOUX**

*Les métrologies sous-marines sont l'un des défis les plus ardues pour les hydrographes/topographes impliqués dans les travaux de construction en mer. Ces métrologies consistent en l'obtention de mesures précises entre différents objets installés sur le fond ou proche de celui-ci. Une précision de quelques centimètres est requise pour des objets distants de 15 à 80 m. Plusieurs méthodes sont mises en œuvre, chacune avec ses avantages et ses inconvénients. De façon invariable les métrologies sont requises lors des phases critiques des travaux en mer et l'un des principaux objectifs est de réduire le temps bateau nécessaire à l'obtention des mesures. La technique présentée ci-après offre des améliorations significatives en termes de temps et d'équipements nécessaires.*

### Construction en mer

Lors des mises en place de champs pétrolier offshore, il est nécessaire de connecter entre elles différentes structures sous-marines au moyen de connecteurs spool (horizontaux) ou jumpers (verticaux). Pour ce faire, différents instruments de mesures sont installés sur un ou des ROV afin de déterminer les dimensions et les attitudes relatives des différentes connexions. La recommandation IMCA S019 "Guidance on Subsea Metrology" donne comme objectifs les valeurs suivantes :

- 50 à 150 mm sur les trois axes (X, Y, Z)
- 0.5° à 1° pour les roulis, tangages et orientations relatives.

A ces recommandations, je voudrais ajouter qu'il est important de faire la différence entre les "jumpers" et les "spools". Un "jumper" se connecte verticalement sur deux réceptacles alors qu'un spool se connecte horizontalement entre deux brides ou collerettes (voir Figure 1). Il se comprend aisément qu'entre deux connecteurs verticaux la tolérance s'entend à plus ou moins xx cm, il n'en va pas de même pour une connexion entre deux brides où la tolérance ne peut s'exprimer qu'en négatif par rapport à la valeur nominale, pour résumer et employer ce qui se dit sur le

### MOTS-CLÉS

Hydrographie, construction, métrologie, photogrammétrie, acoustique, travaux sous-marins.

terrain, "trop court cela passera toujours, trop long cela ne passera jamais", sans trop exagérer sur le trop court.

Comme pour toutes activités de positionnement, une bonne pratique est d'obtenir deux ou plusieurs mesures d'une même quantité par des moyens différents, si possible, afin de permettre un bon contrôle qualité.

La précision finale d'une métrologie acoustique, qui est à ce jour la méthode la plus employée, peut être estimée en prenant en compte les différentes sources d'erreurs comme exposé dans le *tableau 1*. Dans ce tableau on prend en compte les erreurs maximales

données pour chaque instrument et on en fait simplement la somme afin de se mettre dans le cas le plus défavorable, il ne s'agit pas de faire des statistiques mais d'être certain à 100 % du résultat final.

On peut constater à la lecture de ce tableau que 30% des erreurs ont pour causes les interfaces et adaptateurs utilisés pour l'installation des instruments de mesures. 20 % supplémentaires sont la résultante du besoin d'effectuer la mesure sur un point déporté. Supprimer l'utilisation de ces interfaces devrait grandement améliorer la précision de la mesure finale.

La durée de vie des connecteurs (*spool, jumper*) est aussi potentiellement affectée par la précision de la métrologie. En effet, une métrologie imprécise et nécessitant une mise en place "en force" imposera des contraintes additionnelles au métal constituant les connecteurs, celles-ci venant s'ajouter aux contraintes normalement subies lors de la vie de la pièce (variations de pression et température). De plus, l'accroissement de la durée des opérations de mise en place lorsque la métrologie est imprécise aura un impact certain sur le "temps bateau" et donc sur le coût.

Mesures des distances acoustiques	<+/- 20.0 mm
Erreur due aux tolérances de fabrication du réceptacle des instruments côté PLEM	<+/- 5.0 mm
Erreur due aux tolérances de fabrication du réceptacle des instruments côté PLET	<+/- 5.0 mm
Erreur de centrage des instruments dans leur réceptacle côté PLEM	<+/- 1.5 mm
Erreur de centrage des instruments dans leur réceptacle côté PLET	<+/- 1.5 mm
Erreur due à l'inclinomètre côté PLEM (0.1° sur 1.200 m)	<+/- 3.5 mm
Erreur due à l'inclinomètre côté PLET (0.1° sur 1.200 m)	<+/- 3.5 mm
<b>ERREUR TOTALE SUR LA DISTANCE OBLIQUE</b>	<b>&lt;+/- 40 mm</b>

**Tableau 1.** Sources d'erreurs en métrologie acoustique



© SAIPEM



Figure 1. Structures sous-marines  
**Méthodes de métrologies**

Quatre méthodes sont principalement utilisées :

- Acoustique LBL (transpondeurs installés sur le fond)
- Inertielle en utilisation seule ou combinée avec de l'acoustique.
- Photogrammétrie
- Par plongeurs avec "taut wire" (fil tendu).

Les méthodes acoustiques et inertielles autorisent des prises de distances sur de grandes longueurs, mais demandent l'installation d'aides (réceptacles...) et un contrôle dimensionnel à terre afin de connaître précisément les décalages entre le point de mesure (réceptacle des instruments) et le point d'intérêt (centre

de la bride). Les attitudes (cap, roulis, tangage) sont obtenues par la mise en œuvre de capteurs additionnels comme des capteurs de pression et gyrocompas. La calibration des instruments et la combinaison des différentes mesures incluant celles faites à terre sont des sources d'erreurs difficilement quantifiables et pas toujours détectées par le contrôle qualité. Ces méthodes nécessitent aussi la mise en œuvre d'interfaces et adaptateurs qui sont une source d'erreur qu'il est mieux de supprimer afin d'améliorer la précision finale.

La méthode par plongeurs est limitée en terme de profondeur d'intervention, de distance de mesure et de contrôle qualité. Cette méthode est aussi



© SAIPEM

Figure 2. Une bride de son interface de métrologie

consommatrice de temps en raison de la nécessité d'opérer des plongeurs en saturation au-delà de quelques dizaines de mètres. Le fil tendu perd par ailleurs rapidement en précision avec la distance en raison de la chaînette et de la prise au courant.

La méthode par photogrammétrie, ne requière aucune interface et aucun contact avec les points entre lesquels les distances sont à mesurer. Cette méthode autorise une très grande précision mais est limitée en distance maximum de mesure en raison de la faible visibilité sous-marine. Cette méthode est la seule ne nécessitant aucun contact avec les points de mesures (tableau 2) ; ceci est un avantage non négligeable pour des structures déjà installées ou en production sur lesquelles l'installation des interfaces de métrologie et le contrôle dimensionnel fait à terre ne sont plus possibles.

Tableau 2. Comparaison des méthodes

Comparaisons de méthodes existantes	Inertiel	Acoustique	Photo.	Plongeurs
Contrôle dimensionnel à terre	Oui	Oui	Non	Oui/ Non <sup>1</sup>
Obtention des attitudes relatives	Oui <sup>2</sup>	Non	Oui	Oui
Opération sans contact	Non	Non	Oui	Non
Positionnement absolu	Oui	Oui	Non <sup>3</sup>	Non
Besoin d'interfaces	Oui	Oui	Non	Oui
Équipements additionnels pour l'obtention des attitudes	Non	Oui	Non	Non
Durée de travail sur le fond estimée	10 h 00	18 h 00	15 h 00	Variable en fonction du temps de désaturation
Contrôle qualité et redondance	Oui	Oui	Oui	Limité
Bonne visibilité requise	Non	Non	Oui	Oui

- 1- Les plongeurs peuvent dans certains cas effectuer les mesures sur le fond.
- 2- Les centrales inertielle disposent de tous les capteurs nécessaires (gyroscope et inclinomètres) pour l'obtention de ces valeurs.
- 3- Il sera toujours possible de recalculer en absolu les positions obtenues lors de la phase de traitement des données.

## Nouvelle méthode proposée

Lors d'un projet d'extension de champ gazier en Egypte, nous avons eu à effectuer une métrologie entre un manifold en production et un nouveau PLET sans effectuer d'arrêt de production lors des opérations de métrologie. Et de fait, l'installation d'une interface et son contrôle dimensionnel était impossible pour la structure déjà en place. L'idée a été de combiner deux méthodes existantes pour en faire une troisième tirant partie des points forts de chaque méthode. La combinaison des mesures acoustiques (LBL) avec leur capacité de mesure sur de longues distances et de la photogrammétrie pour sa très grande précision sur de courtes distances devait permettre d'obtenir cette troisième méthode alliant longue distance



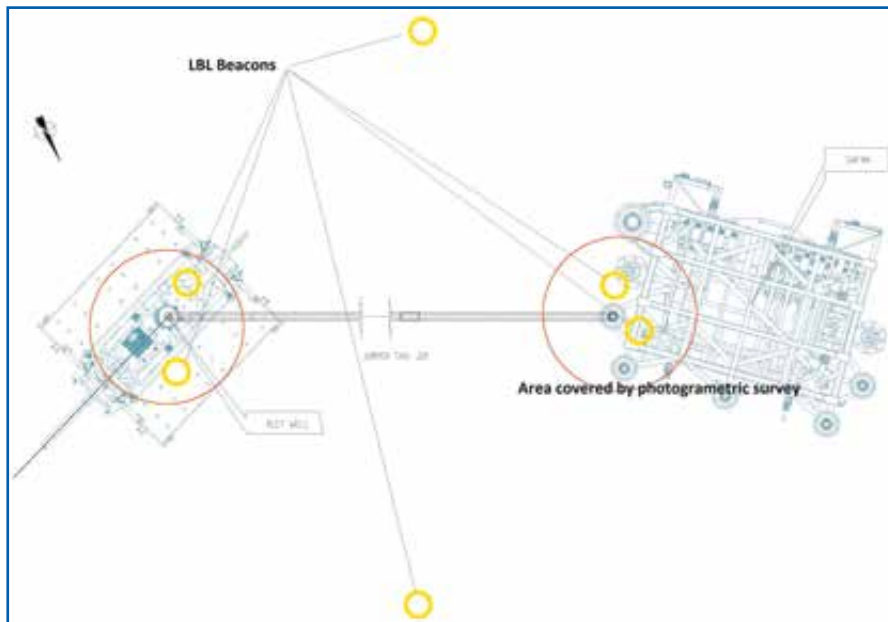


Figure 3. Réseau LBL déployé

et très grande précision en s'affranchissant des interfaces et points déportés. La photogrammétrie offre une vue tridimensionnelle de la zone d'intérêt avec une précision de quelques millimètres. Les deux scènes de photogrammétries (chaque connecteur) sont alors combinées en utilisant les transpondeurs inclus dans les scènes et le réseau LBL qui fournit un référentiel commun aux deux scènes permettant ainsi de les lier entre elles.

Dans chaque scène de photogrammétrie (une pour chaque connecteur) il y a deux transpondeurs dont les coordonnées sont connues dans le référentiel de chaque scène mais aussi dans celui absolu du réseau LBL (voir Figure 3). L'application de matrices de rotation et

translation dérivées des points connus dans les deux systèmes permet de combiner en un seul système les deux scènes. Les attitudes relatives (roulis, cap, tangage) des deux connecteurs sont obtenues en utilisant des transpondeurs avec inclinomètre intégré. Le réseau LBL déployé comportait 6 transpondeurs :

- 2 avec célérimètres
- 2 avec inclinomètres
- 2 avec capteurs de pressions

Les transpondeurs avec célérimètres sont utilisés afin de corriger les distances mesurées de la vitesse de propagation du son dans l'eau et ceux avec inclinomètres et capteurs de pression afin de fournir un référentiel vertical commun. Le procédé de photogrammétrie

utilisé par le sous-traitant retenu pour ce travail (FIT/ESIC) rend nécessaire d'avoir quelques distances connues afin de déterminer la mise à l'échelle de la scène. Pour ce faire des cibles ont été ajoutées sur les transpondeurs et les supports puis les distances précisément mesurées avant la mise à l'eau des équipements. La mesure se faisant simplement avec un mètre ruban.

Sur le terrain, le processus demande de déployer un réseau LBL en utilisant un ROV (opération de routine pour ceux-ci) puis de procéder à la calibration et l'ajustement de ce réseau. Enfin, les prises de vues photographiques en appliquant quelques règles simples : une photo tous les 30° et un recouvrement de 50 % entre deux photos consécutives. La caméra utilisée a été choisie en fonction de sa capacité d'enregistrement interne en raison des problèmes de transfert d'images en temps réel sur l'ombilical des ROV (bande passante limitée). Le choix s'est donc porté sur une TIGER SHARK, en y regardant de plus près, il s'agit en fait d'un CANON IXUS 130 installé dans un caisson étanche.

## Précision attendue

La photogrammétrie offre généralement une précision de l'ordre de 0,2 mm/m ou encore D/5000 (données FIT/ESIC en utilisant leur logiciel MeeX) et dans ce cas précis une estimation de la précision était inférieure à  $\pm 5$  mm pour chaque scène, prenant en considération la taille maximum de la scène photogramétrique (25 m). La précision finale étant obtenue par comparaisons multiples entre des valeurs mesurées et/ou connues (diamètre de pipeline, longueur des transpondeurs...) et les résultats obtenus par la photogrammétrie.

Les transpondeurs utilisés pour l'opération sont donnés par le constructeur (SONARDYNE 6G) pour une précision meilleure que 2 cm une fois la correction de célérité appliquée. Après ajustement du réseau (comme en topographie terrestre) la précision estimée sur celui-ci était de 7 mm RMS. Le logiciel utilisé pour la création et l'ajustement du réseau LBL est FUSION de SONARDYNE.

La mesure de célérité n'a qu'une



Figure 3. Transpondeurs inclus dans la photogrammétrie



Tableau 3. Précision attendue en combinant les méthodes

Mesures des distances acoustiques	<+/- 20.0 mm <sup>1</sup>
Erreur due à l'inclinomètre côté PLEM (0.1° sur 1.200 m)	<+/- 3.5 mm
Erreur due à l'inclinomètre côté PLET (0.1° sur 1.200 m)	<+/- 3.5 mm
Nouvelle erreur introduite par le traitement photogrammétrique côté PLEM	<+/- 5mm
Nouvelle erreur introduite par le traitement photogrammétrique côté PLET	<+/- 5mm
<b>ERREUR TOTALE SUR LA DISTANCE OBLIQUE</b>	<b>&lt;+/-37.5mm</b>

1- avant ajustement de réseau.

influence faible sur la précision des mesures de distances dans le réseau LBL en raison des faibles distances mises en jeux (une erreur de 1 m/s sur une distance de 50 m induit une erreur de 0,03 m). La précision des célérimètres utilisés est de  $\pm 0,02$  m/s et rend donc négligeable cette erreur (vitesse moyenne du son dans l'eau 1 500 m/s). L'erreur due aux inclinomètres est identique à celle montrée dans le *tableau 1* ( $\pm 3,5$  mm). Au final l'erreur totale sur la mesure oblique si l'on reprend le *tableau 1* est de :  $\pm 37,5$  mm. Cela ne représente pas un gain extrême mais permet de valider le procédé sur le papier. On se rendra compte que les erreurs sur la précision finale du procédé de photogrammétrie ont été largement surévaluées.

## Calculs et contrôle qualité

Le traitement des photos est fait à terre en utilisant le logiciel MeeX de FIT/ESIC ; celui-ci délivre un fichier AUTOCAD pour chaque connecteur.

Le contrôle qualité est lui, fait en utilisant des distances connues mais non incluses dans le calcul, telles que les distances entre les transpondeurs inclus dans les scènes photos ou encore des

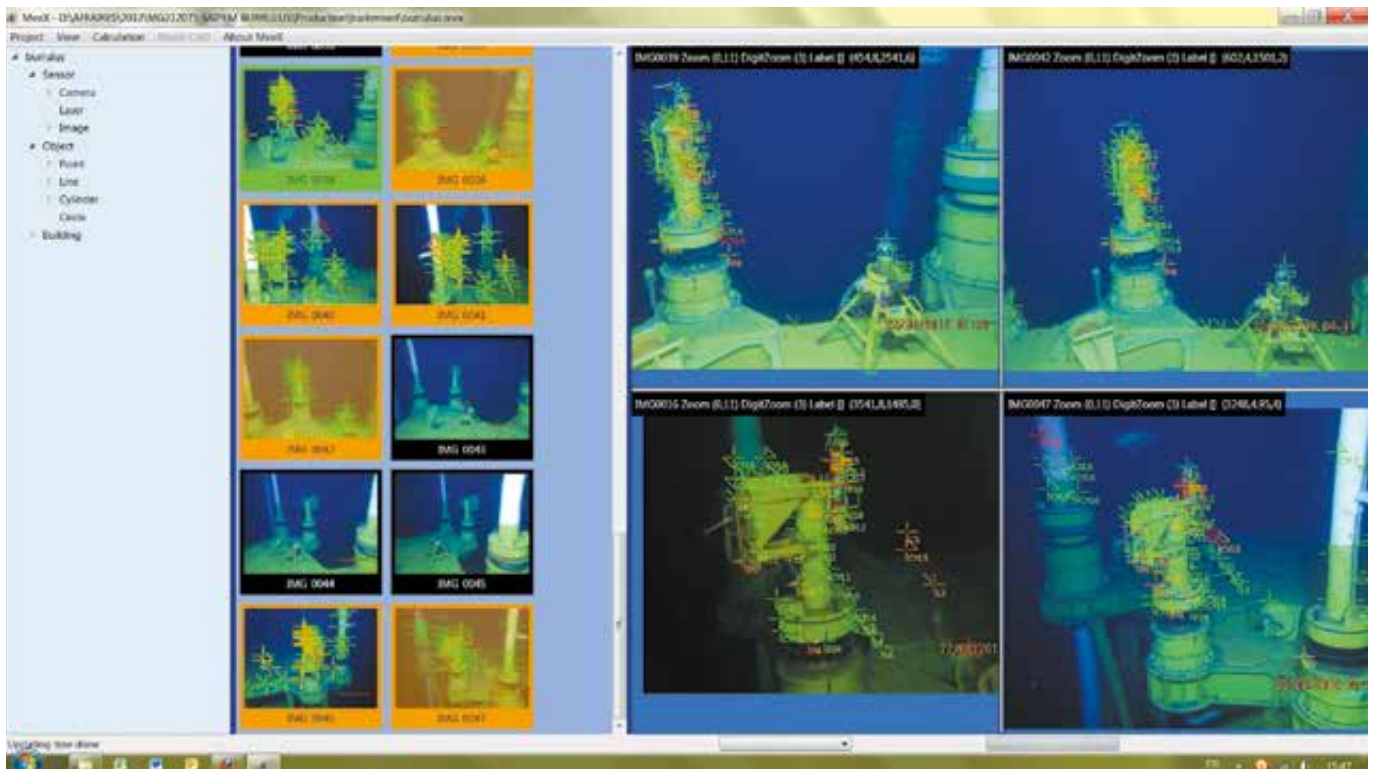
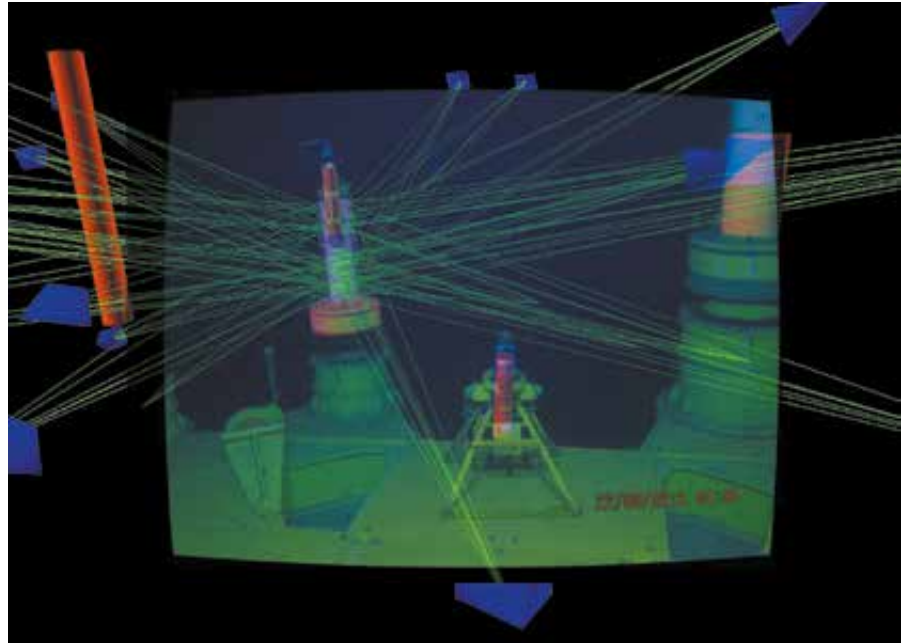


Figure 4. Logiciel de traitement (FIT/ESIC).

► dimensions connues sur les structures (diamètre de pipe, de boulons...). Les mesures finales sont faites directement sur le fichier AUTOCAD obtenu réunissant les deux scènes de photogrammétrie.

## Résultats

La méthode a été mise en œuvre avec succès lors de l'installation d'un "jumper" sur un projet en mer Méditerranée par 750 m de fond. Les résultats obtenus ont été comparés à la métrologie acoustique faite en parallèle.

La précision attendue sur la métrologie faite par photogrammétrie était de  $\pm 5$  mm. La comparaison faite avec la distance mesurée entre deux transpondeurs et le fichier CAD entre les mêmes deux transpondeurs de -0,5 mm en X/Y et de + 5 mm sur l'axe vertical (Z). Le rapport fourni donne une précision de  $\pm 0.45$  mm (2DRMS), précision estimée par le logiciel de traitement de manière statistique en prenant en compte les distances connues et celles issues de la photogrammétrie. Le résultat bien meilleur que celui estimé lors de la définition de la méthode s'explique simplement par le fait que la scène photogrammétrique est de dimension bien plus réduite (3 m au lieu de 25 m). La différence entre longueur finale du "jumper" obtenue par acoustique et celle obtenue par cette nouvelle méthode est de -70 mm. Cette différence est expliquée par certains jeux non maîtrisés sur l'interface nécessaire dans le cadre de la métrologie acoustique et qui était constituée d'une boîte fixée par des aimants sur le connecteur. Le temps bateau utilisé par cette nouvelle méthode de métrologie a été de 6 heures ("data processing" non inclus).

Le plus surprenant a été combien les calculs pour obtenir le résultat final ont été simples. Une fois le fichier CAD remis par notre sous-traitant en charge du traitement des images, les points d'intérêts piqués sur celui-ci et intégrés dans une feuille de calcul EXCEL pour l'application des translations et rotations nécessaires à l'expression des deux jeux de coordonnées dans

le même système. Les différentes valeurs requises pour la construction du connecteur ont été disponibles.

## Conclusions

Cette méthode représente une réelle amélioration en termes de précision, de simplification des opérations et de réduction des coûts pour la métrologie sous-marine. De plus le contrôle qualité permet de quantifier de manière précise la qualité de la mesure et de fait accroît le niveau de confiance lors du design de la pièce finale.

Nous travaillons actuellement sur une nouvelle approche afin de réaliser le calcul directement à bord du navire afin de minimiser le temps nécessaire au transfert des images vers la terre. Cette méthode pourrait aussi être utilisée avec d'autres moyens de mesures haute précision / courtes distances tels que les scanners laser ou acoustique 3D. Dans le cadre des opérations en mer et particulièrement sous-marines, la photogrammétrie devrait apporter, lorsque les conditions de visibilité ne sont pas trop dégradées, et toujours en combinaison avec d'autres moyens, une amélioration notable de la précision dans les mesures. Ainsi, des essais d'amélioration de la navigation d'AUV par post-traitements d'images acquises et couplage de la centrale de navigation ont été faits et semblent prometteurs. ●

## Glossaire

- AUV (*Autonomous Under water Vehicle*) : Drone sous-marin, porteur de capteurs.
- Jumper : connecteur vertical entre deux structures, ne permet pas la connexion entre deux extrémités de pipeline.
- Manifold : structure sous-marine supportant vannes et connecteurs.
- LBL (*Long Base Line*) : il s'agit d'un réseau de balises acoustiques déployées sur le fond et permettant par mesures de distances (minimum 3) d'assurer le positionnement dans le réseau de tout objet disposant d'un interrogateur. Dans le cadre des métrologies, c'est une utilisation un peu détournée du principe, car si d'ordinaire les distances entre balises sont de l'ordre du km en métrologie on aura plutôt des distances

entre balises d'environ quelques dizaines de mètres.

- PLEM/PLET (*Pipeline End Manifold*) et (*Pipeline End Termination*) : structures sous-marines auxquelles viennent se connecter les pipelines, se connectent généralement entre elles avec des "jumper".
- Plongée en saturation : méthode de plongée autorisant la plongée profonde et de longue durée. Les plongeurs sont descendus à l'immersion de travail dans un caisson hyperbare où ils resteront pendant toute la durée des travaux. La remontée à la pression atmosphérique est longue et peut prendre plusieurs jours.
- ROV (*Remotely Operated Vehicle*) : robots reliés au navire porteur par un câble et commandé depuis la surface. Ils sont dotés de bras manipulateurs et servent de porteur pour divers capteurs notamment de positionnement.
- Spool : Connecteur horizontal entre deux structures ou extrémités de pipelines.
- Transpondeurs : émetteur récepteur d'ondes acoustiques utilisés pour mesurer des distances.

## Contact

Éric Guilloux  
Project Surveyor.  
eric.guilloux@saipem.com

## ABSTRACT

*Subsea metrology is amongst the most challenging tasks for surveyors engaged in marine construction. Metrology involves determining the distance and relative attitudes of objects on or close to the seafloor. Accuracies of a few centimetres are achieved with objects 15m to 80m apart. Several methods are used, each with its own advantages and disadvantages. Invariably, metrology is required at the critical stages of field development and the main goal for improvement is to reduce the time taken for acquiring data. The technique discussed offers significant improvements in terms of time and required equipment.*