

EUROSWAC

WP T2.3 - Rapport sur le modèle de calibration des conduites flexibles

Ce document est traduit de l'anglais

Dans la mesure du possible nous vous conseillons la lecture de la version originale.

Ce document a été préparé par et est la propriété d'EUROSWAC Partners et d'Interreg France (Manche Manche) Angleterre. il ne peut être reproduit ou communiqué à des tiers sans l'accord préalable et écrit d'EUROSWAC Partners et d'Interreg France (Manche Manche) Angleterre.

Tour.	Statut	Date	Auteur	Description	Vérificateur	Approbateur
00	SI JE	03/02/2023	Siane Lemoine	Émis pour information	Benjamin Rousse	Claire Pérez
01	SI JE	31/03/2023	Siane Lemoine Alexandre Cinello	Émis pour information	Benjamin Rousse	Claire Pérez Alexandre Cinello

IFI = Émis pour information

Table des matières

1. Introduction	4
1.1. Description du projet	4
1.1.1. Projet EuroSWAC	4
1.1.2. Contexte de T2.3 – Concept de conduite flexible	5
1.2. Objectif du document	5
1.3. Résumé	6
1.3.1. 1ère Campagne	6
1.3.2. 2ème Campagne	7
1.3.3. 3ème campagne	8
1.4. Les références	10
1.5. Acronymes	10
2. Première campagne	11
Echèle du modèle pour la campagne expérimentale	11
2.1. 11	
2.1.1. Conception du système de conduite flexibles	11
Figure 2 2 (droite) : Vue transversale du système de conduite flexible de 1ère campagne	
2.1.2. Procédures expérimentales et observations	15
2.2. Implémentation du modèle numérique	21
2.2.1. Description du modèle numérique	21
2.2.2. Coefficients hydrodynamiques	22
2.3. Axes la calibration du modèle numérique	23
2.3.1. Rigidité axiale	23
2.3.2. Rigidité en flexion	24
2.3.3. Forces d'extrémité axiales	24
2.3.4. Rigidité élevée de l'élingue d'ancrage	26
2.4. Etude comparative entre les données expérimentales et numériques	28
2.4.1. Comportement général de mouvement du tuyau flexible	28
2.4.2. Mouvements de tuyau	32
2.4.3. Tension de l'élingue	36
2.4.4. expérimentales des configurations restantes	39
2.5. Conclusions de la 1ère campagne	42
2.5.1. Points clés de la 1ère campagne	42
2.5.2. Vers la 2ème campagne	43
3. Deuxième campagne	44
3.1. Conception de systèmes de canalisations flexibles	44
3.2. Implémentation du modèle numérique	48

3.2.1.	Tuyau flexible, raccords d'extrémité et crépine	48
3.2.2.	Modules de flottabilité.....	49
3.2.3.	Élingues	49
3.2.4.	Configurations d'ancrage	50
3.3.	Axes la calibration du modèle numérique	51
3.3.1.	Rigidité axiale	51
3.3.2.	Rigidité en flexion	57
3.3.3.	Coefficients de frottement sur le fond marin des composants d'ancrage	62
3.4.	Etude comparative entre les données expérimentales et numériques.....	68
3.4.1.	Étude préliminaire	68
3.4.2.	Essais de stabilité des systèmes de canalisations flexibles.....	80
3.4.3.	Essais de flambement	84
3.5.	Conclusions de la 2ème campagne	86
3.5.1.	Points clés de la 2ème campagne	86
3.5.2.	Vers la 3ème campagne.....	87
4.	Troisième campagne	88
4.1.	Campagne expérimentale à l'échelle du modèle	88
4.1.1.	Conception de systèmes de canalisations flexibles	88
4.1.2.	Campagne expérimentale.....	88
4.2.	Implémentation du modèle numérique	93
4.2.1.	Tuyau flexible, connexion d'extrémité et crépine	93
4.2.2.	Composants restants du système de canalisations flexibles	94
4.3.	Axes la calibration du modèle numérique	95
4.3.1.	Calibration de la rigidité axiale.....	95
4.3.2.	Calibration de la rigidité en flexion.....	98
4.4.	Etude comparative entre les données expérimentales et numériques.....	100
4.4.1.	Introduction	100
4.4.2.	Comparatif Présentation.....	101
4.4.3.	Pipe B : Comparaison des résultats numériques et physiques.....	102
4.4.4.	Tuyau A posé sur une bosse : comparaison des résultats numériques et physiques.	106
4.4.5.	Conduite A en conditions d'endommagement : comparaison des résultats numériques et physiques	108
4.5.	Conclusions de la 3ème campagne	114
4.5.1.	Points clés de la 3ème campagne	114
4.5.2.	Voie à suivre : recommandation pour des enquêtes supplémentaires.....	116
5.	conclusion	118

1.Introduction

1.1. Description du projet

1.1.1. Projet EuroSWAC

Le projet EUROSAC est une solution innovante et très efficace de climatisation par eau de mer (SWAC) en eaux peu profondes pour l'espace Manche. Il vise à concevoir et valider une solution innovante, rentable et respectueuse de l'environnement pour la production de froid, utilisant l'eau de mer de la Manche comme fluide frigorigène, grâce à la différence entre la température de l'eau froide de l'océan et la température de l'air ambiant.

Alors que le besoin de refroidissement dans les grandes villes côtières augmente (en raison du changement climatique), le refroidissement est encore principalement produit par des refroidisseurs, une technologie utilisant de grandes quantités d'électricité générée en partie par des combustibles fossiles, ce qui ralentit la capacité à atteindre les objectifs énergie-climat de l'Espace Manche (AC). Le projet EUROSAC entend démontrer la capacité d'utiliser l'eau de mer de la Manche pour le free cooling, en adaptant à la faible profondeur d'eau et au climat tempéré de l'AC, une technologie utilisée dans les zones tropicales.

Basé sur l'expertise complémentaire de 11 partenaires français et britanniques, à la fois académiques et industriels, et sur l'analyse des caractéristiques uniques de la Manche, le projet EUROSAC vise à développer et tester un prototype SWAC au laboratoire de Brixham et à la National Lobster Hatchery au Royaume- Uni. Ce système SWAC basé en eau peu profonde sera le premier à être utilisé pour soutenir l'aquaculture alimentaire, ce qui représentera des avantages majeurs en termes d'émissions de CO₂, de durée de vie et de coûts par rapport aux solutions existantes.

Le projet comprendra trois tâches de R&D axées sur :

- Un système d'auto-enfouissement des canalisations d'eau froide SWAC,
- Un concept de conduite flexible pour les conduites d'eau froide SWAC,
- Enregistreur de potentiel de corrosion et de température.

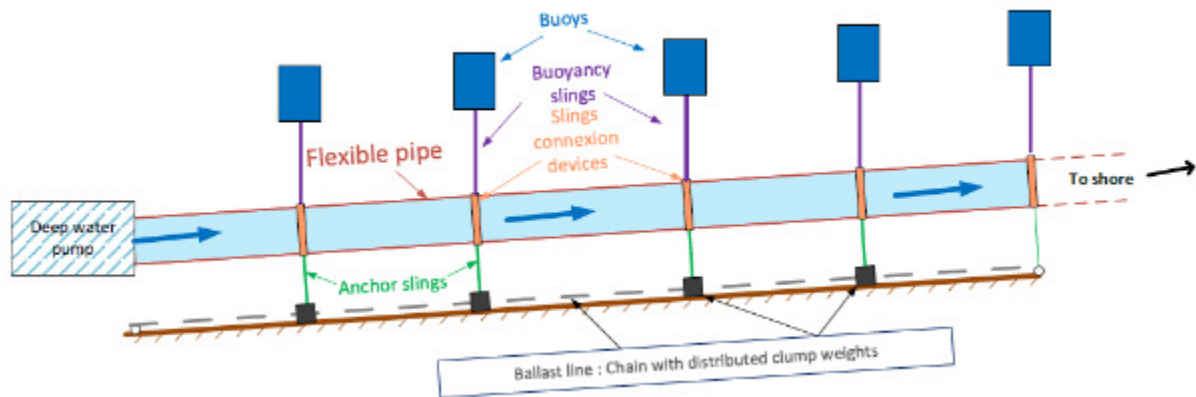
Ces trois tâches de R&D contribueront à la réduction du coût du système SWAC en réduisant le coût matériel et le coût d'installation. La validation des performances du laboratoire de Brixham et de l'écloserie nationale de homards SWAC ouvrira la voie de la commercialisation en CA et au-delà. EUROSAC stimulera la croissance des solutions SWAC en FR-UK en réduisant les risques de la technologie et en favorisant son déploiement en CA, avec des avantages environnementaux et économiques positifs au niveau local. La transférabilité de la solution est énorme dans les zones côtières avec des besoins de refroidissement élevés et un accès facile à l'eau de mer, car jusqu'à 10 % des besoins de refroidissement et 5 % des besoins de chauffage des bâtiments tertiaires CA pourraient être satisfaits par le SWAC en eau peu profonde d'ici 2030.

Le présent document porte sur la deuxième tâche de R&D, à savoir l'utilisation d'une conduite flexible pour la conduite d'admission SWAC.

1.1.2. Contexte de T2.3 – Concept de conduite flexible

DORIS Engineering utilise son expérience pour développer des systèmes de climatisation à eau de mer (SWAC) dans le monde entier. Plusieurs études ont été réalisées précédemment mettant en évidence l'importance majeure du coût du PEHD et des opérations marines dans les dépenses d'investissement (CAPEX) du système. Une solution prometteuse pour réduire le CAPEX d'un système SWAC consiste à utiliser une conduite flexible au lieu d'une conduite rigide. Premièrement, le tuyau flexible serait une alternative moins coûteuse au tuyau en PEHD. De plus, les coûts d'opérations marines pourraient être considérablement réduits car les tuyaux flexibles peuvent être stockés sur des bobines et installés en déroulant la bobine depuis un navire d'installation plus petit et donc moins cher.

La section de conduite flexible est destinée à transporter l'eau de mer des eaux profondes (~ 1000 m) jusqu'à la surface. Le schéma suivant donne un aperçu du système souhaité :



Le comportement hydrodynamique d'un tel système n'est pas encore connu et la modélisation numérique antérieure de cette conduite flexible sous charges environnementales a conduit à des incohérences entre deux logiciels reconnus utilisés par DORIS : Orcaflex (d'Orcina) et Deeplines (de Principia) .

En conséquence, DORIS et Océanide ont proposé de procéder à des essais en bassin pour valider le concept et fournir des données expérimentales pour le calibrage du modèle numérique.

Trois campagnes ont été réalisées en avril 2022 et en septembre 2022 avec la même conduite flexible. Le dispositif, les résultats et les principales observations de ces deux campagnes sont fournis dans la Réf. 2 et Réf. 5. Par ailleurs, une troisième campagne a été menée en janvier 2023, utilisant à la fois la conduite flexible initiale, et une seconde avec un comportement mécanique sous pression différent (Réf. 7).

1.2. Objectif du document

Ce document présente une étude qui vise à définir si le logiciel OrcaFlex est adapté à la modélisation numérique des conduites flexibles, et à identifier les potentielles limites du programme.

L'objectif ultime est de fournir une méthodologie pour calibrer de tels modèles numériques reproduisant un système de conduite flexible conçu pour des sections de conduites d'admission/refoulement SWAC. L'objectif sous-jacent est de mettre en lumière les tendances sensibles de ces conceptions, afin de fournir une base pour d'autres études SWAC/conduite flexible.

1.3. Résumé

1.3.1. 1ère Campagne

Pour la première campagne, le montage consiste en une conduite flexible fixée aux deux extrémités, ancrée au fond du bassin par des élingues d'ancrage, et soutenue par des bouées par des élingues de flottabilité. Les principaux objectifs de cette première campagne étaient d'abord d'étudier le comportement hydrodynamique de la conduite à l'aide d'un montage "simple" sous houle régulière, avec des critères de conception variables, et d'évaluer l'adéquation du logiciel Orcaflex pour reproduire les comportements observés expérimentalement.

Les principaux paramètres de conception étudiés de cette première campagne étaient :

- la forme des modules de flottabilité et leur répartition le long de la conduite flexible
- la pression d'écoulement à l'intérieur de la conduite flexible
- le débit à l'intérieur de la conduite flexible
- la rigidité axiale des élingues d'ancrage
- l'état de fixation de l'extrémité du tuyau (fixe/libre)

Il a été observé lors de la campagne expérimentale que :

- le tuyau flexible sélectionné se rétracte lorsqu'il est mis sous pression, ce qui conduit à une définition spécifique à la pression des rigidités axiales et en flexion du tuyau flexible.
- le système de conduite flexible conçu présente une hyperstaticité, qui est visible à travers la répartition inégale et imprévisible de la tension de l'élingue d'ancrage dans le bassin.
- les charges axiales d'extrémité du flexible sont très sensibles à la distance entre les deux points de fixation, lorsque les deux extrémités du flexible sont fixes (quelques millimètres génèrent une différence d'une dizaine de kN).

La calibration du modèle numérique a porté principalement sur :

- les rigidités axiale et en flexion en fonction de la pression interne
- les charges axiales d'extrémité aux deux extrémités fixes du tuyau
- le signal de tension de l'élingue d'ancrage lors d'événements de relâchement / détente (« slack ») en fonction de la rigidité axiale de l'élingue

On a constaté que le modèle numérique OrcaFlex du système de conduite flexible :

- Prédit le schéma général et l'amplitude des signaux temporels de mouvement dans les directions x et z
- Identifie les phénomènes de relâchement de l'élingue d'ancrage se produisant dans le bassin
- Surestime légèrement les pics de haute tension des signaux temporels de tension dans les élingues d'ancrage, à la suite de phénomène de relâchement / détente de la conduite

Plutôt que des limitations logicielles, l'calibration du modèle numérique du système de conduite flexible a été limité par l'hyperstaticité du système de conduite flexible conçu.

1.3.2. 2ème Campagne

S'appuyant sur les observations de la 1^{ère} campagne et dans le but de tester un système de conduite flexible plus réaliste, dans le cadre d'une conduite d'admission SWAC, un nouveau système de conduite flexible est envisagé dans cette 2^{ème} campagne.

Les paramètres de conception suivants ont été mis à jour :

- Ajout d'une crépine à une extrémité du flexible,
- Essai de 3 systèmes d'ancrage différents (poids ponctuels et/ou chaîne),
- Des dispositifs de connexion plus réalistes entre le tuyau flexible et les ancrs/modules de flottabilité à l'aide de colliers souples.

En libérant une extrémité de tuyau et en mettant en œuvre des composants d'ancrage, la conception de la deuxième campagne permet de s'affranchir de l'hyperstatisme observé lors de la première campagne.

La matrice de test de la 2^{ème} campagne comprenait :

- des essais sous-marins de caractérisation des raideurs axiales et en flexion de la conduite flexible,
- la caractérisation du frottement des éléments d'ancrage sur le fond du bassin,
- des essais de houle irrégulières pour étudier le comportement dynamique du système d'ancrage pour chaque configuration,
- des essais de houle régulière pour rechercher un éventuel "effet coup de fouet" à l'extrémité libre de la conduite équipée de la crépine (amplification de du mouvement de l'extrémité de la conduite),
- des essais de houle régulières et irrégulières avec un flambement initial de la conduite (c'est-à-dire une déformation locale) pour évaluer l'évolution du flambement dans des conditions de mer données.

Lors de la deuxième campagne expérimentale, il a été observé que :

- Lors d'essais en houle irrégulières transversales, le système de conduite flexible oscille autour de sa position initiale (c'est-à-dire une position de repos rectiligne).
- Lors des essais en houle régulière transversale, le système de conduite flexible adopte une forme d'arc de cercle et est ensuite décalé dans l'une ou l'autre direction transversale en fonction de la phase de la houle.
- Lors des essais de courant transversal, les poids ponctuels adoptent une position inclinée puis sont décalées.
- Aucun phénomène de résonance n'a été observé à l'extrémité libre de la conduite lors des essais de houle régulière en ligne.
- Il n'a pas été possible d'obtenir un flambement sans effondrement avec la conduite flexible, en raison de sa rigidité (c'est-à-dire se rétractant sous pression). De ce fait, ces tests n'ont pas pu être reproduits sur OrcaFlex, du fait de la déformation d'un solide.

Le calibrage des modèles numériques de la 2^{ème} campagne, principalement axé sur les raideurs axiales et en flexion sur la base des essais de caractérisation sous-marine actualisés, et les coefficients de frottement des composants d'ancrage. Dans l'ensemble, le modèle numérique reproduit fidèlement le comportement du système de conduite flexible observé expérimentalement.

Maintenant que le système de conduite flexible peut à se déplacer latéralement, un calibration des coefficients hydrodynamiques de la conduite pour chaque condition de mer est nécessaire pour prédire le véritable déplacement transversal de la conduite.

1.3.3. 3^{ème} campagne

Enfin, l'objectif de la troisième campagne est de compléter les deux précédentes en explorant :

- L'utilisation d'une nouvelle conduite flexible présentant une réponse mécanique différente aux variations de pression interne. Le tuyau testé précédemment a tendance à se raccourcir avec l'augmentation de la pression interne tandis que le nouveau tuyau s'allonge avec l'augmentation de la pression interne, permettant ainsi la formation de flambement sans effondrement.
- Conditions de dommages en tenant compte d'une élingue d'ancrage ou d'une élingue de flottabilité perdue à différents endroits le long du tuyau flexible.
- Les variations potentielles d'élévation du fond marin en modélisant une bosse. En effet, tous les tests de la première et de la deuxième campagne sont effectués sur un fond marin plat.

Les remarques suivantes ont été faite suite à cette campagne expérimentale:

- Un comportement d'hystérésis a été caractérisé pour le tuyau B lors de la caractérisation préliminaire de la rigidité axiale dans l'air.
- La caractéristique d'allongement sous pression de la conduite B a bien permis la formation de flambement non effondré.
- Le retrait de la bouée d'extrémité B, pour les configurations d'extrémité libre (c'est-à-dire présence de crépine), a été involontairement omis lors de cette troisième campagne.

Pour cette troisième et dernière campagne, une approche de validation de la calibration a été adoptée pour valider le modèle numérique par une comparaison systématique et directe des résultats. Cette comparaison systématique entre le modèle numérique et le modèle physique a montré que :

- Le modèle numérique fournit les mêmes tendances et les mêmes ordres de grandeur pour la plupart des cas.
- Le modèle numérique prédit les tensions maximales dans les élingues d'ancrage pour tous les cas.
- Le modèle numérique présente plus de divergences concernant les mouvements de la conduite flexible. Cependant, le modèle numérique et le modèle physique montrent de petits mouvements de la conduite aux fréquences des ondes, démontrant le comportement hydrodynamique cohérent de la conduite flexible modélisée. De plus, il est mis en évidence ici que les mouvements prédits pour la configuration d'ancrage 1, avec des poids ponctuels uniquement, se comparent mieux au modèle numérique que pour la configuration

d'ancrage 2, avec chaîne uniquement. On rappelle que la position initiale de la chaîne n'est pas similaire entre le modèle numérique et le modèle physique.

Enfin, la méthodologie de calibration développée à partir des résultats des deux premières campagnes a été appliquée aux cas investigués lors de la troisième campagne. L'analyse comparative entre le modèle numérique et le modèle physique tend à démontrer que le logiciel OrcaFlex peut être utilisé pour étudier le comportement hydrodynamique d'un système de conduite flexible et pour concevoir les principaux éléments d'un tel concept. De plus, la méthodologie de calibration développée à partir des résultats d'essais avec le tuyau A a été appliquée avec succès à un autre matériau de tuyau présentant une réponse différente à la variation de pression interne. En conclusion, l'outil numérique développé et la méthodologie de calibration associée peuvent être utilisés pour concevoir un véritable tuyau d'admission flexible pour les futurs systèmes SWAC.

1.4. Les références

N°	Nom	Description
Réf. 1	216-T2.3-DEN-002 - SWAC-R&D - Basin Test specification rev00	Spécification de la première campagne d'essais en bassin
Réf. 2	21.2.024.R.004 1st basin tests campaign - Basin Tests Report	Première campagne d'essais en bassin - Rapport d'essais en bassin
Réf. 3	216-T2.3-DEN-007 Master Thesis HydroFlexible	Rapport de mémoire de sur la première campagne de tests
Réf. 4	216-T2.3-DEN-004 - Flexible Pipe Concept - Second Basin Model Tests - Campaign Specification rev. 01C	Spécification de la deuxième campagne d'essais en bassin
Réf. 5	216-T2.3-OCD-002 – 2nd basin tests campaign - Basin Tests Report rev. 00A	Deuxième campagne d'essais en bassin - Rapport d'essais en bassin
Réf. 6	216-DEN-006 - SWAC-RD - Basin Test specification 3 - Rev01	Spécification de la troisième campagne d'essais en bassin
Réf. 7	216-T2.3-OCD-003 – 3 rd basin tests campaign Basin Tests Report – Rev02	Troisième campagne d'essais en bassin - Rapport d'essais en bassin
Réf. 8	C-DOC-VIA-1030_rev01 - Submaflex - Physical Model tests report	Développé par DORIS Engineering dans des projets antérieurs
Réf. 9	C-DOC-VIA-1021_rev01 - SubmaFlex - Hydrodynamic Behaviour	Développé par DORIS Engineering dans des projets antérieurs
Réf. 10	DNVGL-RP-C205 Environmental conditions and environmental loads	Standard professionnel fournissant les pratiques recommandées concernant les charges environnementales
Réf. 11	Hydrodynamique des Structures Offshore par Bernard Molin	Manuel d'hydrodynamique

1.5. Acronymes

- AS : Élingue d'ancrage (Anchor Sling)
- BS : Élingue de flottabilité (Buoyancy Sling)
- C A : Coefficient de masse ajouté (Added mass coefficient)
- C D : Coefficient de traînée (Drag coefficient)
- CW : Poids de l'agrégat (Clump Weight)
- EA : Rigidité axiale (Axial stiffness)
- EI : Rigidité à la flexion (Bending Stiffness)
- H : Hauteur des vagues (Wave height)
- PEHD : polyéthylène haute densité (High Density Polyethylene)
- ID : diamètre interne (Internal Diameter)
- OD : diamètre extérieur (Outer Diameter)

Pi : pression interne (Internal Pressure)

SWAC : Climatisation Eau de Mer (Sea Water Air Conditioning)

T : période de la vague (Wave period)

Tn : période de la vague naturelle (Natural wave period)

QT : cible de qualité (Qualysis Target)

VIV : Vibrations induites par le vortex (Vortex Induced
Vibrations)

WD : profondeur de l'eau Water Depth)

2. Première campagne

2.1. Echèle du modèle pour la campagne expérimentale

2.1.1. Conception du système de conduite flexibles

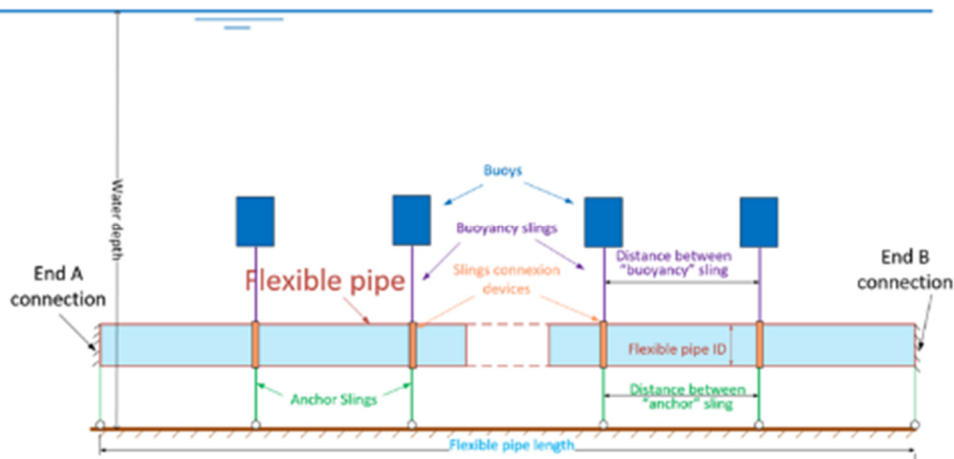


Figure 2-1: Vue longitudinale du système de conduite flexible de la 1ère campagne.

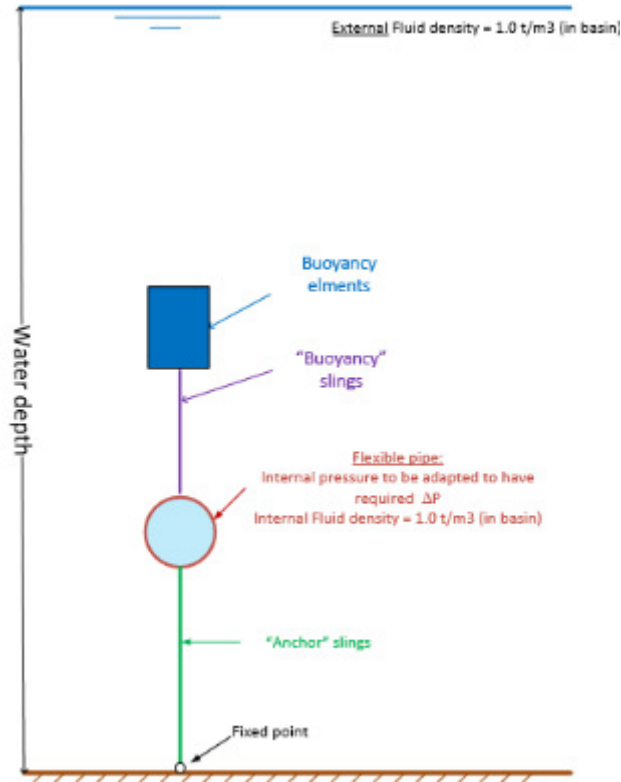


Figure 2-2: Vue transverse du système de conduite flexible de la 1^{ère} campagne

Comme détaillé dans la Section 5 de la Réf. 2, la conception du système de conduite flexible est composé des composants suivants :

- Tuyau flexible en polyuréthane tissé (fixé aux deux extrémités pour cette 1^{ère} campagne)
- Bouées : 3 types différents (Photo 2-1)
 1. Cylindre; B = 37,08kN
 2. Cylindre; B = 74,14 kN
 3. Anneau; B = 49.00kN
- Elingues de flottabilité reliant les bouées à la conduite flexible
- Elingues d'ancrage reliant la conduite flexible au fond marin (liaison fixe au fond marin pour cette 1^{ère} campagne)
- Dispositifs de serrage entourant la conduite flexible et permettant la connexion de l'élingue à la conduite (Photo 2-1)

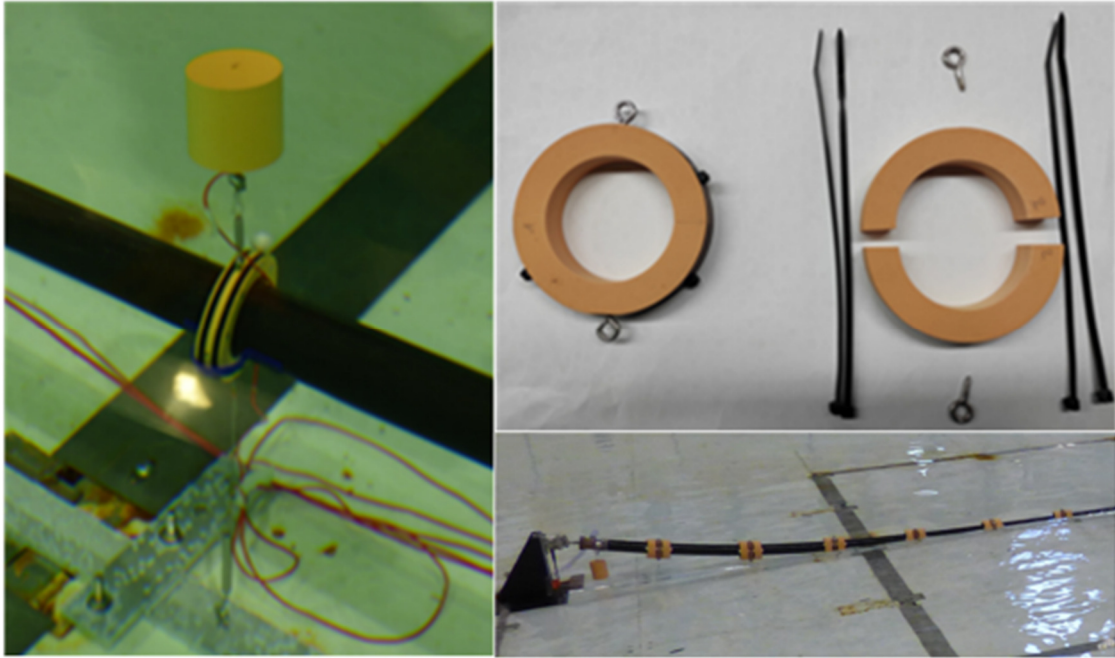


Photo 2-1: Gauche - Bouée cylindrique avec dispositif de serrage rigide entourant la conduite flexible, sur laquelle sont fixées les élingues. Les dispositifs de serrage sont maintenus en position grâce à la sangle thermocollée dans le sens axial du tuyau. Droite - Bouée en forme d'anneau avant et après avoir été assemblée autour de la conduite flexible.

Figure 23: Vue transversale du système de conduite flexible de 1ère campagne.

Comme expliqué dans la Réf. 3 Section 2.1.2. et 2.1.3., plusieurs échelles sont définies dans ce projet (Figure 2-4) :

- **Modèle** à l'échelle 1/20, utilisé dans le bassin d'essai lors de la campagne expérimentale (OD = 0,0702m). Cette échelle de modèle a été dictée à la fois par les conduites flexibles commercialisées en polyuréthane disponibles et par les conditions de mer extrêmes limitées par les dimensions de l'installation expérimentale.
- **Pleine échelle** de 1 (soit OD = 1,404m), obtenue avec la similitude de Froude (sauf pour les coefficients hydrodynamiques voir Section 2.2.2 de ce document pour plus de détails).
- **Échelle réelle** se référant aux dimensions standard du tuyau d'admission SWAC (c'est-à-dire OD = 0,5 m)

Ainsi, les échelles pleine et réelle ne sont pas identiques en raison des contraintes mentionnées précédemment. A noter que toutes les simulations numériques ont été réalisées à pleine échelle.

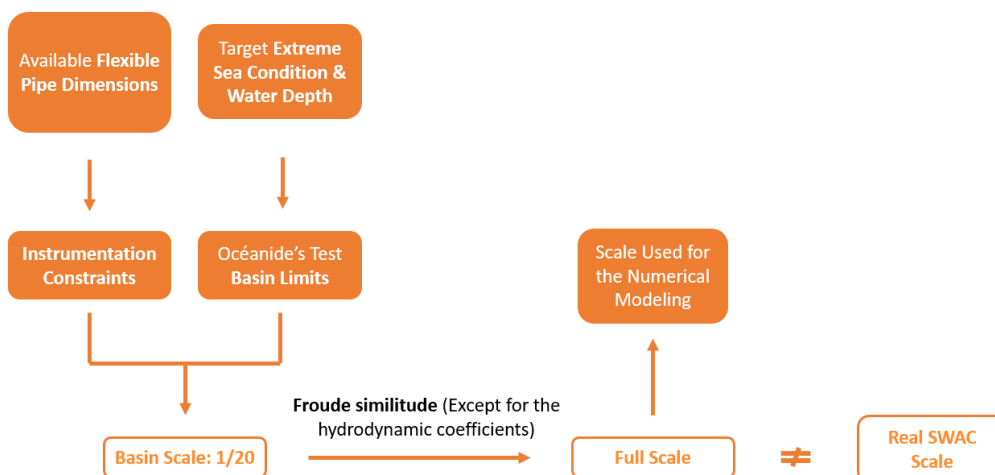


Figure 2-4: Définition schématique des 3 échelles différentes de systèmes de conduite flexible.

Le système de conduite flexible décrit a été défini par des calculs préliminaires avec le logiciel Orcaflex. Un cas dit « de base » a été déterminé après avoir mené plusieurs études de sensibilité sur le design. Tableau 2-1 résume les paramètres sélectionnés. Cette étude préliminaire a été réalisée avec un modèle Orcaflex simplifié qui ne considère pas l'effet de la pression interne sur la conduite flexible EA et EI. De plus amples détails sont fournis dans la réf. 3 Section 2.2.2.

Paramètre variable	Unité	Valeur testée
Type de bouée	-	1 ; 2 ; 3
Espacement des bouées	m	10 ; 20
AS rigidité axiale	kN	2000 ; 60000
Extrémité de tuyau fixe/libre	-	Fixe-Fixe ; Fixe-Libre
Pi	bar	0 ; dix ; 40
Débit interne	t/s	0 ; 0,36 ; 0,5

Tableau 2-1: Paramètres sélectionnés à tester lors de la 1^{ère} campagne expérimentale (rapportés en taille réelle).

En conséquence, plusieurs configurations de conduite flexible ont été testées. Alors que le cas de base présenté précédemment est appelé Configuration 1, les cinq configurations supplémentaires sont répertoriées dans Tableau 2-2.

	Unit	Config. 1	Config. 2	Config. 3	Config. 4	Config. 5	Config. 6
Distribution de bouées	m	10	10	20	20	10	10
Forme bouée	-	Cylindre	Cylindre	Cylindre	Cylindre	Anneau	Cylindre
Volume bouée	m ³	3.78	3.78	3.78	7.56	3.78	3.78
EA	kN	2000	60000	2000	2000	2000	2000
Extrémité B	-	fixé	fixé	fixé	fixé	fixé	libre

Tableau 2-2: Principales caractéristiques des six configurations de systèmes de conduite flexible testés lors de la 1^{ère} campagne expérimentale.

2.1.2. Procédures expérimentales et observations

2.1.2.1. Essais préliminaires de caractérisation des conduite flexible

La conduite flexible retenue pour cette 1^{ère} campagne est la « Techflex PU Extra DN65 » réalisée en polyuréthane tissé et produite par la société française Delannoy Frères. Les principales dimensions du tuyau sont fournies en détail dans la Réf. 3 Section 2.1.3., pour les 3 échelles. A noter que ce tuyau flexible est plat lorsqu'il est vide, et lorsqu'il est rempli d'air ou d'eau, il prend sa forme cylindrique et devient plus rigide, comme on peut le voir sur l' Photo 2-2.

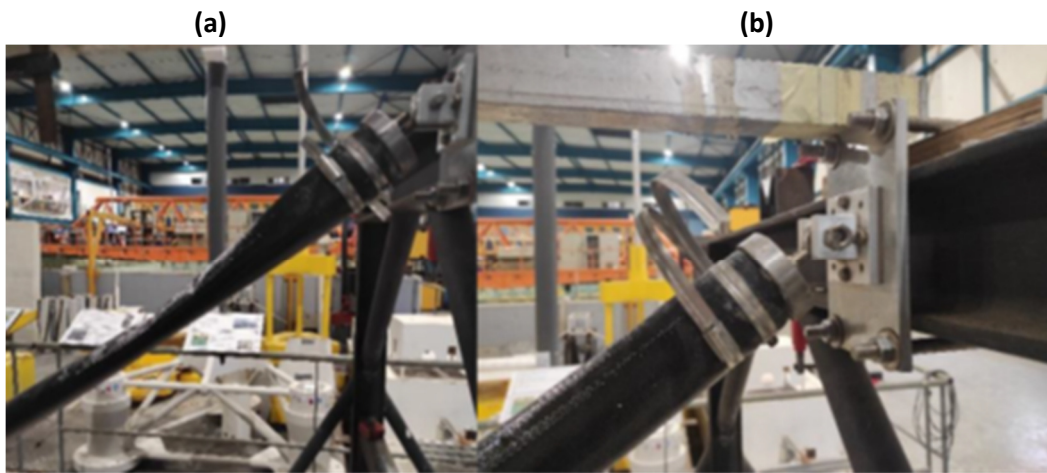


Photo 2-2: Tuyau flexible sans (a) et avec (b) pression interne induite par l'air.

En conséquence, la conduite a donc été caractérisée expérimentalement, préalablement à la campagne expérimentale, tant pour la raideur axiale que pour la raideur en flexion, avec un prototype de 6 mètres de long à l'échelle du modèle.

La conduite flexible axiale EA a été caractérisée par des essais d'allongement de la conduite flexible sous pression d'air. Le tuyau flexible a été suspendu au plafond et la pression interne ainsi que la tension axiale appliquée sur l'extrémité inférieure du tuyau ont été progressivement augmentées, en ajoutant respectivement plus d'air à l'intérieur du tuyau et en augmentant la masse de poids attachée (Figure 2-Figure 2-5. Les résultats sont rapportés à pleine échelle dans Figure 2-5b.

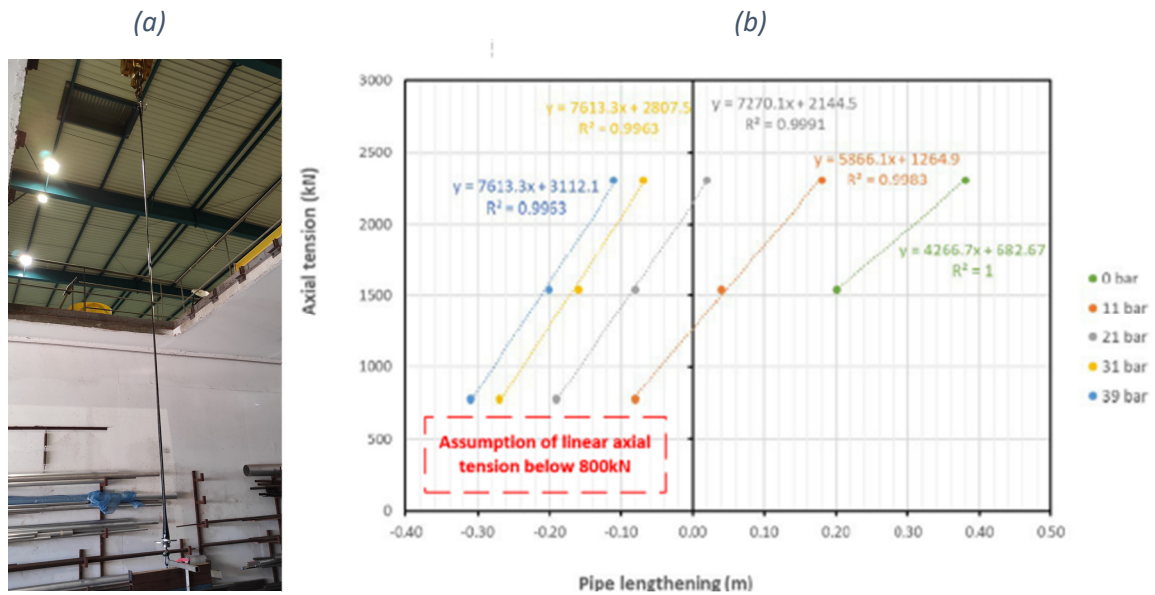


Figure 2-5: Expérimentation de l'allongement sous pression de la conduite flexible, et (b) allongement de la conduite flexible en fonction de la pression interne et de la tension axiale appliquée.

Plusieurs observations peuvent être faites à propos de Figure 2-5:

- plus la pression interne est élevée, plus la rigidité du tuyau est élevée
- à partir d'une pression interne d'environ 30bar, la raideur semble avoir atteint son maximum et stagne
- la conduite flexible étudiée se raccourcit sous la pression (comportement inattendu basé sur les comportements précédents de la conduite flexible rapportés dans les rapports DORIS SWAC précédents et les rapports ViaMarina → en fonction de l'angle d'incidence de l'arrangement des fibres constituantes)

Notons que 800 kN était la tension axiale minimale testée. On a donc émis l'hypothèse dans les sections suivantes que la conduite flexible EA évolue également linéairement en dessous de 800kN de tension appliquée.

La rigidité en flexion de la conduite flexible a également été testée. Cela a été fait en fixant les extrémités des tuyaux flexibles en position horizontale au-dessus du sol et en suspendant un poids de masse croissante. La distance entre le tuyau flexible et la ligne horizontale joignant les deux extrémités du tuyau a ensuite été enregistrée pour plusieurs sections fixes.

(a)



(b)

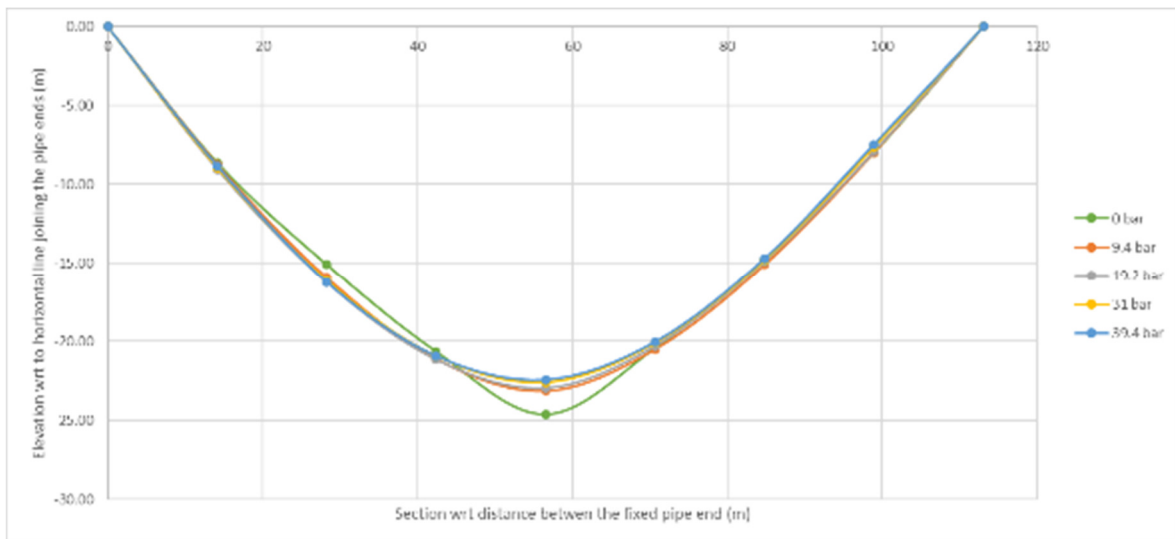


Figure 2-6: (a) Montage expérimental pour mesurer le profil vertical de la conduite flexible en fonction de la pression interne et de la tension appliquée à mi-longueur de la conduite et (b) profil d'élévation de la conduite flexible pour un poids de 34,6 tonnes fixé à la conduite à mi-longueur et augmentant les pressions internes.

De Figure 2-6, on peut déduire que plus la pression interne est élevée, plus la conduite flexible EI est élevée.

De plus amples détails sur la caractérisation EA et EI de la conduite flexible sont fournis dans la Réf. 3 Section 2.1.3. et dans Réf. 2 Sections 5.1.1 - 5.1.3.

2.1.2.2. Fonctionnalités principales de la campagne expérimentale

Cette section est destinée à présenter brièvement le dispositif expérimental et les conditions de mer sélectionnées testées dans le BGO First à Océanide à La Seyne-sur-Mer, et à signaler certains comportements inattendus du prototype à l'échelle lors de la campagne expérimentale. Une description plus détaillée est fournie dans la réf. 2 Sections 2.2. pour les conventions de référentiel, 5. pour la description du modèle, et 10.3. pour les principales observations relevées lors de cette campagne expérimentale.

2.1.2.2.1. Configuration expérimentale

Le montage expérimental testé diffère légèrement du modèle numérique simplifié construit pour les études de sensibilité réalisées précédemment. Les divergences sont les suivantes:

- Embouts de tuyauterie pesantes permettant un circuit d'eau en boucle fermée et un raccordement de l'installation au dispositif de mesure de poids ; le poids de ces embouts est rendu neutre grâce à des bouées dédiées (Photo 2-3)
- Dispositifs de serrage avec un diamètre intérieur plus grand que le diamètre extérieur du tuyau flexible et avec une sangle de fixation avec un ajustement lâche (Photo 2-4)
- Des tensiomètres ont été ajoutés à certaines élingues modifiant la masse globale et le diamètre (Photo 2-4)
- Petites boucles et boulons à œil permettant le montage du montage (Photo 2-4)

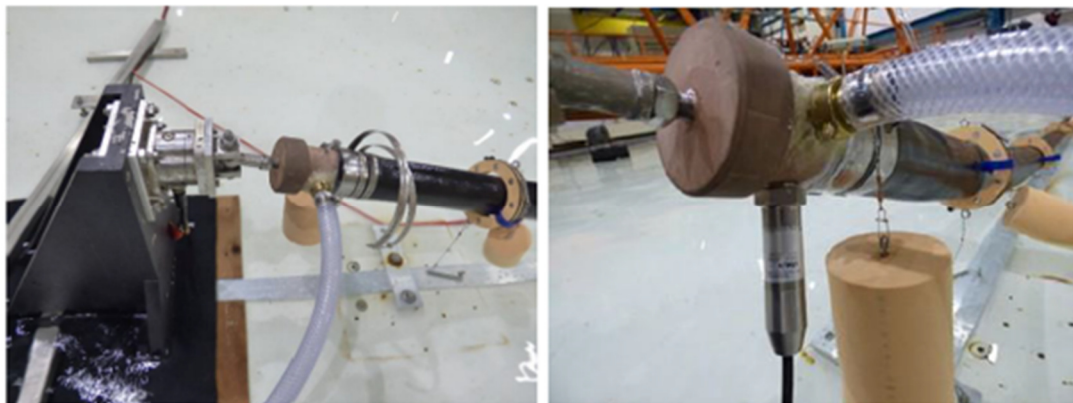


Photo 2-3: Embouts de conduites souples et leurs bouées d'embouts associées.

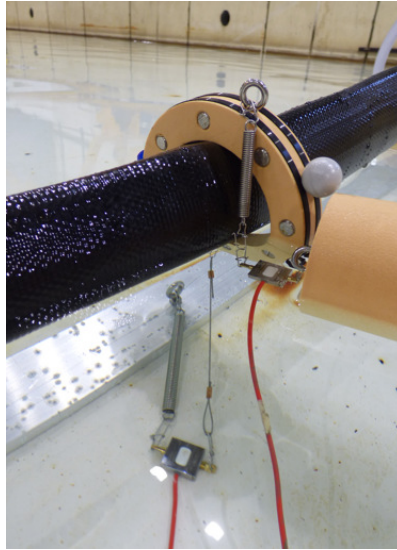


Photo 2-4: Dispositif de serrage en forme de collier permettant la connexion des élingues à la conduite flexible, avec un tensiomètre et des pièces d'assemblage apparentes.

2.1.2.2.2. Conditions de mer sélectionnées

Les conditions environnementales comprennent des tests de houle régulière seule, des tests de courant seul et des tests houle régulière réguliers et de courant.

Le courant a été fixé à 0,8 m/s. Trois houles régulières sont modélisées, basées sur la hauteur de vague (double amplitude) H ; et la période d'onde T :

- REG1 : H = 4 m ; T = 8,5 s
- REG2 : H = 8 m ; T = 11,0 s
- REG3 : H = 10 m ; T = 12,0 s

Trois incidences ont été considérées : 0°, 45° et 90°. Lorsqu'ils sont combinés, le courant et les vagues partagent la même incidence.

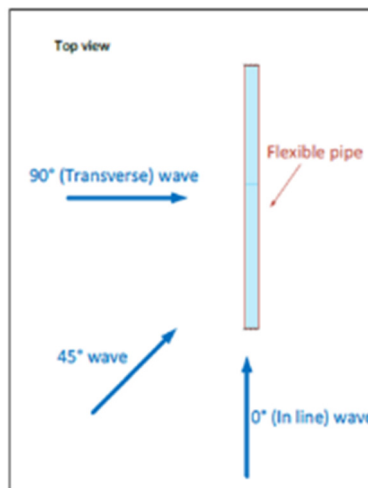


Figure 2-7: Représentation schématique de l'incidence des conditions de mer.

2.1.2.2.3. Observations expérimentales inattendues

Les principales caractéristiques inattendues observées au cours de la campagne expérimentale sont rapportées ci-après pour être prises en considération lors du processus de calibration décrit dans la section 2.2.

- Le système de tuyaux flexibles conçu s'est avéré hyperstatique. En fait, le tuyau flexible étant fixé au fond marin par chaque élinge d'ancrage, et que les extrémités du tuyau flexible sont contraintes dans toutes les directions, le tuyau étant flexible, il compense toute sorte d'irrégularité dans la configuration expérimentale (c'est-à-dire, imperfection du fond marin, petite variation de la longueur des élingues d'ancrage, déformation initiale du tuyau, ...). Par conséquent, en raison de cette compensation imprévisible, la charge n'est pas uniformément répartie entre les élingues d'ancrage comme c'est le cas dans un modèle numérique « parfait ».
- Lors des essais, une première déformation de la conduite flexible a été observée, notamment en bout de conduite, comme illustré sur Photo 2-5. Cette déformation initiale a conduit à des contraintes initiales mesurées aux connexions d'extrémité.

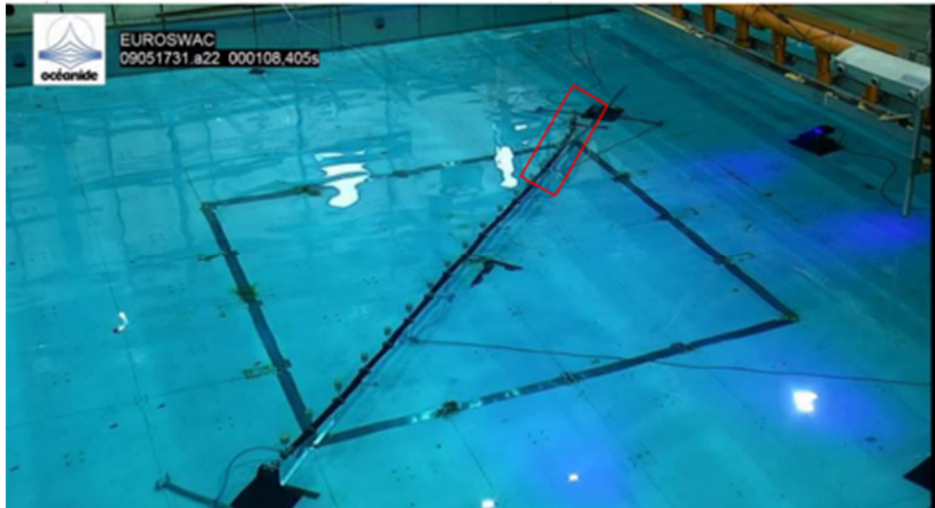


Photo 2-5: Montage expérimental du système de conduite flexible de la Configuration 6 (extrémités de conduite fixe / libre) avec une déformation initiale visible de la conduite à l'extrémité libre.

2.2. Implémentation du modèle numérique

2.2.1. Description du modèle numérique

2.2.1.1. Modèle numérique Orcaflex

Le modèle numérique a été construit sur le logiciel Orcaflex. Le système de conduite flexible a été décomposé avec les constituants suivants :

- Tuyaux flexibles et connexions d'extrémités de tuyaux → 1 ligne Orcaflex (divisée en 3 sections)
- Elingues d'ancrage → Lignes Orcaflex
- Elingues de flottabilité → Lignes Orcaflex
- Bouées → Bouées Orcaflex 3D
- Dispositifs de serrage → non inclus en tant qu'objet Orcaflex (puisque'il est à flottabilité neutre) mais pris en compte avec un décalage au niveau de la connexion

Pour plus de détails, se référer à Réf. 3. Rubriques 2.2.2. pour l'introduction de base du modèle numérique et 2.3.1. pour les dimensions précises de chaque composant.

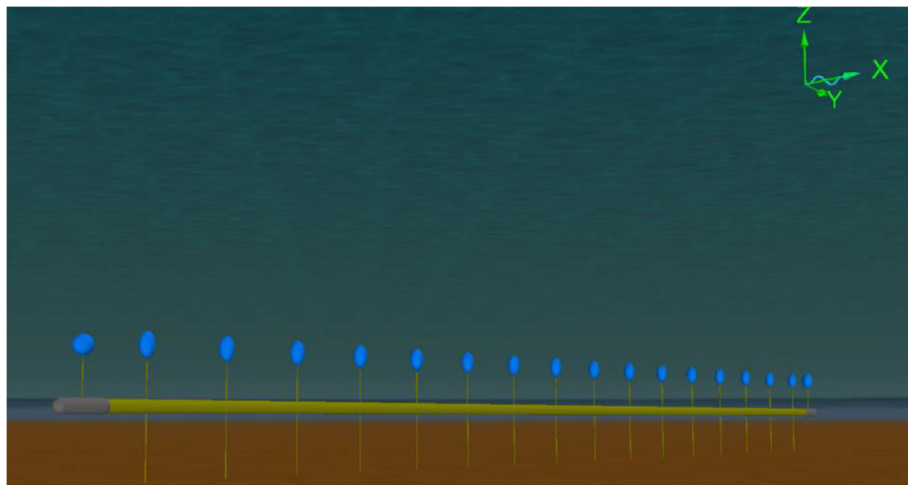


Figure 2-8: Vue longitudinale du modèle numérique du système de conduite flexible (Configuration 1).

2.2.1.2. Ajustements pour s'adapter à la configuration expérimentale

Comme introduit dans la section 2.1.2.2, quelques caractéristiques supplémentaires qui n'ont pas été prises en compte dans le modèle numérique Orcaflex préliminaire. Cette section fournit une explication succincte de la façon dont ils ont été inclus dans le modèle numérique. Dans Réf. 3. Section 2.4.2., une description détaillée de l'inclusion de la connexion d'extrémité de tuyau et de la modélisation de l'élingue est donnée.

- **Connexions d'extrémité de tuyau** : ces les formes complexes ont été simplifiées en deux cylindres creux de même ID que les flexibles ID et OD calculés de manière à obtenir les mêmes masses expérimentales dans l'eau.
- **Élingues** : Étant donné que la torsion n'était pas incluse dans le modèle, la connexion entre les lignes Orcaflex modélisant la conduite flexible et celles représentant les élingues ne pouvait se faire qu'au niveau de l'axe central longitudinal de la conduite. Il a été choisi

d'ajouter une longueur d'élingue supplémentaire comprenant l'épaisseur du tuyau et les surélévations supplémentaires ajoutées par le dispositif de serrage et par le boulon à œil. La rigidité axiale de l'élingue a été modifiée en conséquence.

- **Ressort et tensiomètres** : pour obtenir la raideur axiale d'élingue souhaitée, des ressorts spécifiques ont été ajoutés à la ligne agissant comme une élingue. De plus, des tensiomètres ont été placés dans l'axe de certaines des élingues. Pour tenir compte de ces éléments, les masses et les diamètres ont été calculés en faisant la moyenne des valeurs de chaque composant.

2.2.2. Coefficients hydrodynamiques

Cette section explique comment les coefficients hydrodynamiques de la conduite flexible, ainsi que ceux des élingues et des bouées ont été estimés pour le modèle numérique. Plutôt qu'une étude précise, le but était d'obtenir un ordre de grandeur de ces valeurs.

Les forces visqueuses à l'échelle du modèle caractérisées par le nombre de Reynolds ont permis l'estimation approximative du C_D pour la conduite flexible. Etant donné que la similitude de Froude a été utilisée pour la transition d'échelle, il a été choisi de conserver la gamme C_D obtenue à l'échelle du modèle pour la pleine échelle, afin de conserver le même régime visqueux observé dans le bassin à l'échelle du modèle.

Le tuyau flexible C_A a été fixé à 1 suivant les graphes référentiels de Sarpkaya rapportés dans la Réf. 3.

A noter que le même C_D défini pour la conduite flexible a été utilisé pour les élingues et pour les bouées. Le coefficient de masse ajoutée a cependant été fixé à 1 pour les élingues et 0,62 pour les bouées, selon la pratique préconisée de DNVGL-RP-C205 Réf. 10. à l'annexe D.

Les valeurs pour le C_D et le C_A des composants principaux du système de conduite flexible sont reportées dans le tableau suivant, et la procédure de définition complète des coefficients hydrodynamiques est fournie dans la Réf. 3. Section 2.1.2.2.

	Tuyau souple	Élingues	Bouées
C_D	1.2	1.2	1.2
C_A	1	1	0,62

Tableau 2-3: Coefficients hydrodynamiques estimés pour la conduite flexible, les élingues et les bouées pour le modèle numérique de la 1^{ère} campagne.

2.3. Axes de calibration du modèle numérique

Cette section présente les principaux sujets qui ont été traités dans le but d'obtenir un modèle numérique plus réaliste. Ces axes dits de calibration permettent d'intégrer les essais expérimentaux (de la raideur axiale et de la raideur en flexion en fonction de la pression interne) et de tenir compte des phénomènes non anticipés observés lors de la campagne d'essais (charges axiales en bout et comportement des élingues d'ancrage avec un EA élevé).

2.3.1. Rigidité axiale

La méthodologie de calibration de la raideur axiale de la conduite flexible est décrite en détail dans la Réf. 3. Rubriques 2.4.1.1. et 3.1.1. Un résumé succinct étape par étape est fourni dans cette section.

- Le comportement de rigidité axiale peut être spécifiquement défini par une fonction de déformation/tension de paroi dans Orcaflex. Il a été choisi pour définir la raideur axiale spécifique à la pression pour une déformation associée à une tension appliquée extérieurement de 0N (excluant la déformation due à la pression interne), et pour une déformation de 100 %. Étant donné que les tests expérimentaux caractérisaient des tendances linéaires, deux points ont été supposés suffisants.
- Ensuite, la tension effective T_e a été calculée à partir de laquelle la tension de paroi T_w a pu être dérivée. La raideur axiale a été dérivée de la pente des courbes caractéristiques de traction/d'allongement de la conduite multipliée par la longueur initiale de la conduite.

$$T_e = EA \cdot \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$T_w = T_e + (p_i a_i - p_o a_o)$$

- Le deuxième point de caractérisation de la rigidité axiale a été calculé pour une déformation de 100 %.

$$T_{w_{\varepsilon=100\%}} = EA \cdot \frac{\Delta l}{l_{0_{\varepsilon=100\%}}} + T_{w_{T_e=0}} \text{ où } \frac{\Delta l}{l_{0_{\varepsilon=100\%}}} = 1 - \frac{\Delta l}{l_{0_{T_e=0}}}$$

- La raideur axiale obtenue a ensuite été testée pour chaque pression interne. L'évolution de la longueur du tuyau a été vérifiée pour être égale à 10 % de la longueur initiale avec un EA de 10 %.
- Les pressions internes qui n'ont pas été directement caractérisées lors de l'essai de rigidité axiale ont été interpolées linéairement à partir des données disponibles.
- Cependant, étant donné que les essais de caractérisation ont été effectués dans l'air et que la campagne expérimentale du système de conduite flexible a été menée dans le bassin, l'effet de la pression hydrostatique a dû être pris en compte. Ceci a été réalisé en considérant le différentiel de pression ΔP , au lieu de la pression interne.

Le Tableau 2-4 présente les courbes de déformation et de tension pour les trois pressions expérimentales enregistrées.

Pi	Pe	ΔP	$\varepsilon_{Te=0}$	T_w for $\varepsilon_{Te=0}$	$\varepsilon_{100\%}$	T_w for $\varepsilon_{100\%}$
[bar]	[bar]	[bar]	[%]	[kN]	[%]	[kN]
13.2	4.19	9.01	-0,019	1089	100	675220
25.4	4.19	21.2	-0,092	2708	100	878672
39,6	4.19	35.4	-0,167	4593	100	919810

Tableau 2-4: Courbes de déformation axiale/tension interpolées utilisées comme données d'entrée Orcaflex de rigidité axiale en fonction des pressions expérimentales.

2.3.2. Rigidité en flexion

De plus amples détails sur l'calibration de la rigidité en flexion sont donnés dans la Réf. 3. Rubriques 2.4.1.2. et 3.1.2.

- La calibration de l'EI était plus simple, car l'EI était conservé comme donnée d'entrée constante dans le modèle Orcaflex, pour un Pi spécifié.
- Pour un Pi donné, l'EI a été déterminée en vérifiant itérativement si les décalages verticaux obtenus par rapport à la ligne horizontale joignant les 2 extrémités fixes étaient identiques à ceux enregistrés lors du test de caractérisation expérimentale (Figure 2-65).
- De même, les EI pour les Pi non caractérisés expérimentalement ont été calculés par interpolation linéaire.

Le Tableau 2-5 Tableau 2-4fournit les valeurs EI obtenues pour trois Pi expérimentaux enregistrés.

Pi	Pe	ΔP	IE
[bar]	[bar]	[bar]	[kN.m ²]
13.2	4.19	9.01	95115
25.4	4.19	21.2	203697
39,6	4.19	35.4	340668

Tableau 2-5: Valeurs EI interpolées utilisées Données d'entrée Orcaflex basées sur les pressions expérimentales.

2.3.3. Forces d'extrémité axiales

Les efforts axiaux mesurés avec les transducteurs de charge 3D au niveau des raccords d'extrémité de conduite, ont montré des tendances inattendues, lors des essais de la configuration 1 pour des conditions de mer incidentes à 90° :

- tension axiale asymétrique aux extrémités des tuyaux, malgré la symétrie de la configuration expérimentale
- variabilité importante pour une même Pi (fin A : -360kN à -510kN, fin B : -540kN à -650kN)
- les efforts aux extrémités ont enregistré des valeurs négatives → compression au niveau du capteur 3D → la conduite s'allonge (le contraire de ce qui a été caractérisé)

La validité de ces charges axiales aux extrémités des conduites a donc été remise en question. Pour étudier la fiabilité des charges d'extrémité expérimentales, un test de calibration enregistrant les

charges d'extrémité axiales aux balances en immersion, pour une pression interne de 1000 kPa, a été réalisé (Figure 2-9).

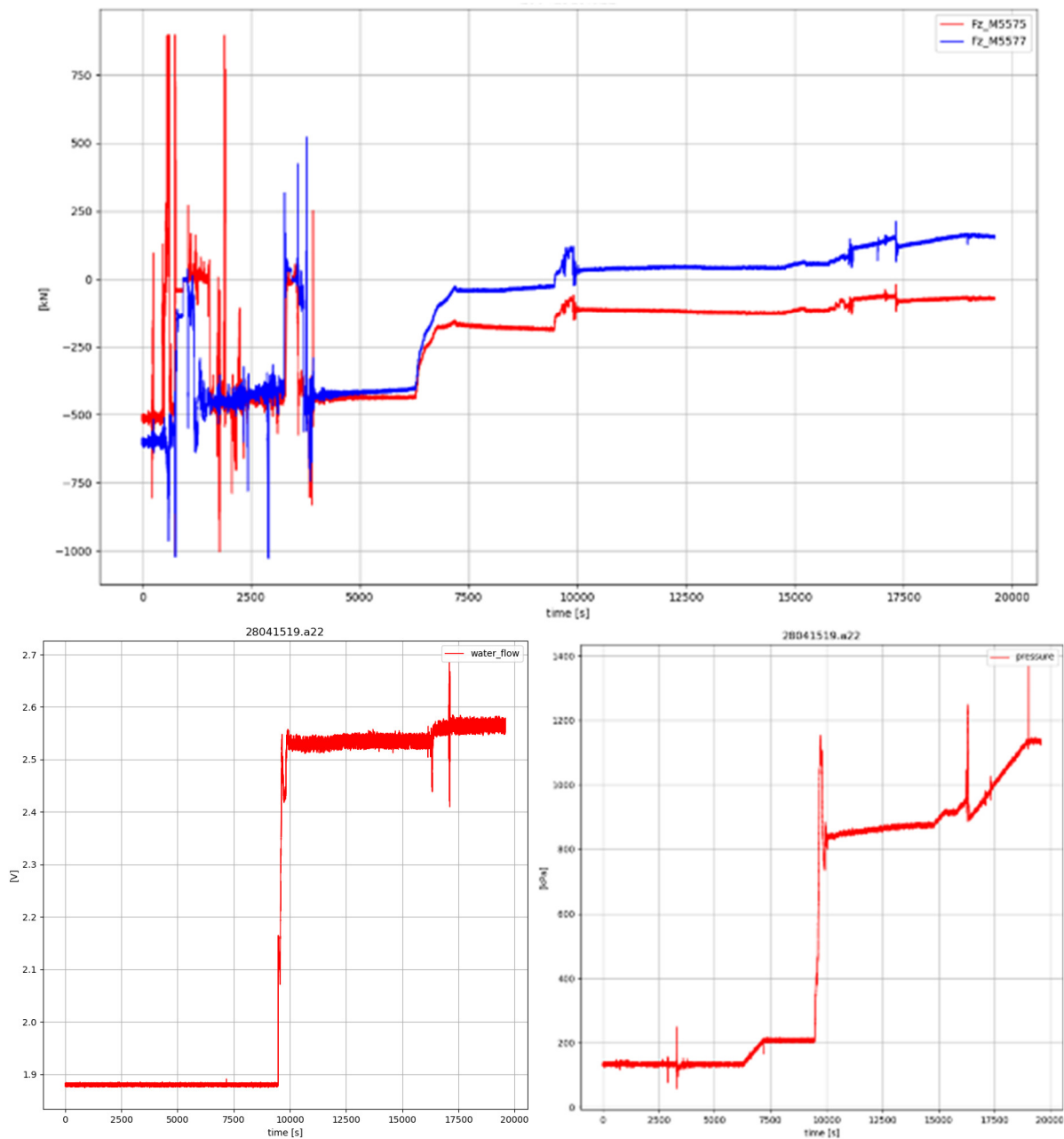


Figure 2-9: Charge axiale aux extrémités de la conduite, débit d'eau et signaux temporels de pression interne lors de l'essai de calibration. A noter que le référentiel bassin du bassin différait de celui utilisé tout au long de cette étude et qu'en conséquence, les Fz tracés sont bien les efforts normaux et que Fz_5575 doit être corrigé d'un facteur -1.

Cet exercice a révélé que dans Figure 2-9:

- la descente du fond marin commence à 6500s (augmentation progressive de la pression hydrostatique)
- juste avant 10000s, le débit d'eau est augmenté, et à son tour la pression et les charges axiales
- à 16500s, les colliers ont été réajustés pour assurer une position non inclinée (expliquer les pics)

- on voit que la charge axiale aval du Fz_M5577 a tendance à s'éloigner pendant les intervalles de temps stabilisés des charges axiales (contrairement à la charge axiale amont du Fz-M5575 qui est restée constante)
- la charge d'extrémité axiale finale en amont (+70kN) a donc été considérée comme la valeur de référence pour obtenir la distance entre les points de fixation des tuyaux pour le modèle numérique
- cette distance entre les points de fixation des tuyaux a été maintenue pour les essais avec différents Pi

Avec ce processus de calibration, le tuyau se rétracte maintenant tel que caractérisé lors des essais de tension axiale. Il faut cependant mentionner que :

- les charges axiales du système de conduite flexible sont hypersensibles à la distance entre les 2 points de fixation d'extrémité de conduite (c'est-à-dire qu'à pleine échelle une réduction de quelques mm entre les points de fixation donne un gain de quelques dizaines de kN en termes de charges axiales aux extrémités)
- la plage des courbes d'entrée Figure 2-5.

Dans Réf. 3. Rubriques 2.4.3. et 3.1.4., des informations supplémentaires peuvent être trouvées pour compléter la procédure de correction donnée appliquée sur le modèle numérique.

2.3.4. Rigidité élevée de l'élingue d'ancrage

Un résumé de Réf. 3. Rubriques 2.4.3.2. et 3.1.3. est fourni ci-après.

Comme les élingues d'ancrage avec un EA élevé (60000kN) devaient provoquer des événements de relâchement / détente (« slack ») dans le flexible, et que l'un des objectifs de cette étude était de déterminer la capacité du logiciel Orcaflex à les identifier et à les gérer avec précision, un soin particulier a été apporté à la calibration de Configuration 2, présentant cet élingue d'ancrage avec un EA augmenté, notamment lorsqu'il est soumis à l'onde régulière REG3 la plus élevée (**test 21**). Une première comparaison entre les données expérimentales et les résultats obtenus avec le modèle numérique affiné, a montré que :

- les événements de relâchement / détente (« slack ») sont identifiés par le modèle numérique et le modèle de signal de tension principal est bien prédit
- mais lors d'événements de relâchement / détente (« slack ») , les pics de haute tension sont surestimés par le modèle

Après investigation, il a été constaté que l'EA de l'élingue spécifiée de 60 000 kN n'était probablement pas correctement implanté dans le bassin. La Figure 2-10 montre une explication visuelle des commentaires ci-dessus. En diminuant progressivement l'AS EA de 60000kN à 12000kN, les pics de tension se rapprochent du signal expérimental.

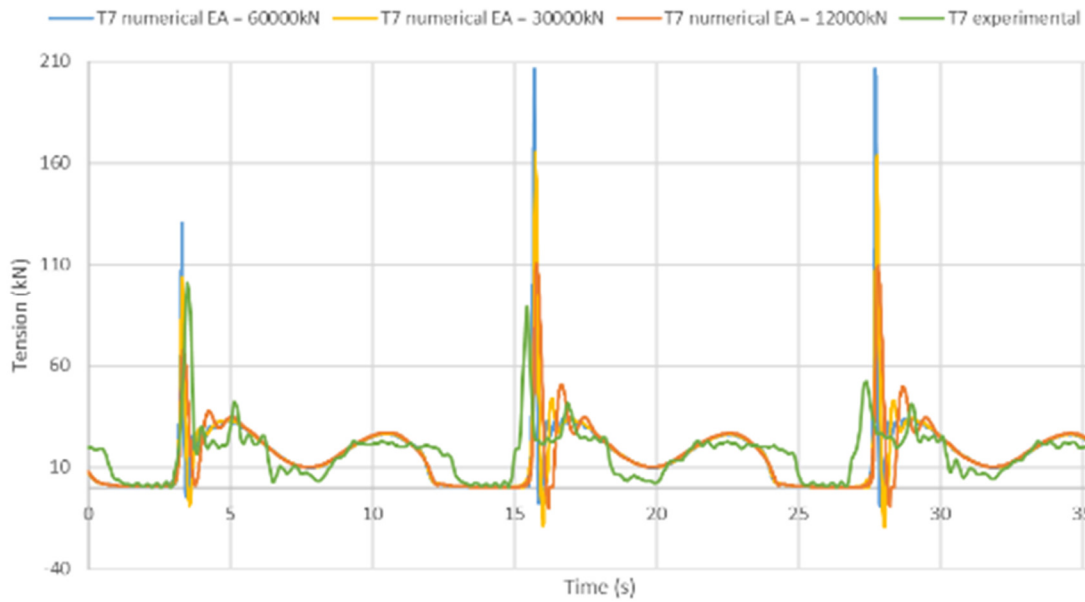


Figure 2-10: Comparaison du signal temporel de tension de l'AS15 pour la Configuration 2 sous un incident à 90° REG3, entre le signal expérimental et différents modèles numériques utilisant l'AS EA décroissant.

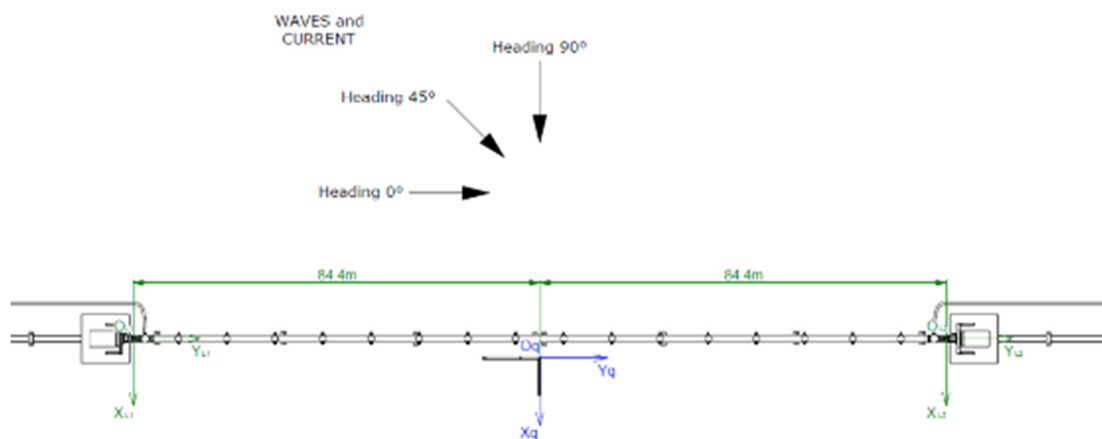
On a supposé que les boucles et les attaches incluses dans la configuration expérimentale pour connecter les différents composants de l'élingue rendaient l'élingue expérimentale plus flexible que souhaité. De plus, si l'on considère la fiche technique du ressort utilisé lors de la campagne expérimentale (Réf. 3. Annexe 6), le comportement en raideur pour une charge inférieure à 72 kN est non linéaire. Comme cette condition est remplie lors d'événements de relâchement / détente (« slack »), cela pourrait également être l'origine de la divergence des tensions maximales pour ce test.

2.4. Etude comparative entre les données expérimentales et numériques

La comparaison entre les données expérimentales enregistrées et le modèle numérique calibré de cette première campagne est fournie dans cette section. Pour compléter cette étude comparative, des informations complémentaires sont disponibles dans la Réf. 3 Section 3.2 pour mouvements du tuyau et Section 3.3 pour les tensions de l'élingue.

Notez que cette étude comparative est limitée à la configuration nominale (c'est-à-dire la configuration 1) pour des conditions de mer incidentes à 90° en raison des contraintes de temps. Quelques remarques générales sur le comportement expérimental des configurations restantes sont cependant tirées dans la section 2.4.4.

Dans le bassin, la conduite flexible a été placée le long de l'axe y du référentiel. L'axe des x est défini comme positif vers l'absorbeur de oule, et l'axe des z est vertical et pointant vers le haut (Croquis 2-1). Les mouvements de tuyau flexible d'intérêt sont donc dans les directions x et z.



Croquis 2-1: Référentiel utilisé dans la campagne expérimentale et dans Orcaflex .

2.4.1. Comportement général de mouvement du tuyau flexible

Pour évaluer la capacité prédictive du modèle numérique à reproduire le comportement de mouvement général du système de conduite flexible dans la configuration 1, les déplacements maximaux de la conduite flexible par rapport à sa position de repos sont étudiés. En traçant ces déplacements maximaux, à la fois dans les directions x et z, à différentes longueurs d'arc de tuyau, la position du tuyau flexible sous les 3 ondes régulières est visible. Figure 2-11 et Figure 2-12 représentent respectivement les extremums transversaux et verticaux de la conduite pour le Pi nominal de 10 bar, soumis successivement à REG1, REG2 et REG3, avec une incidence de 90° (essais 8, 9, 10).

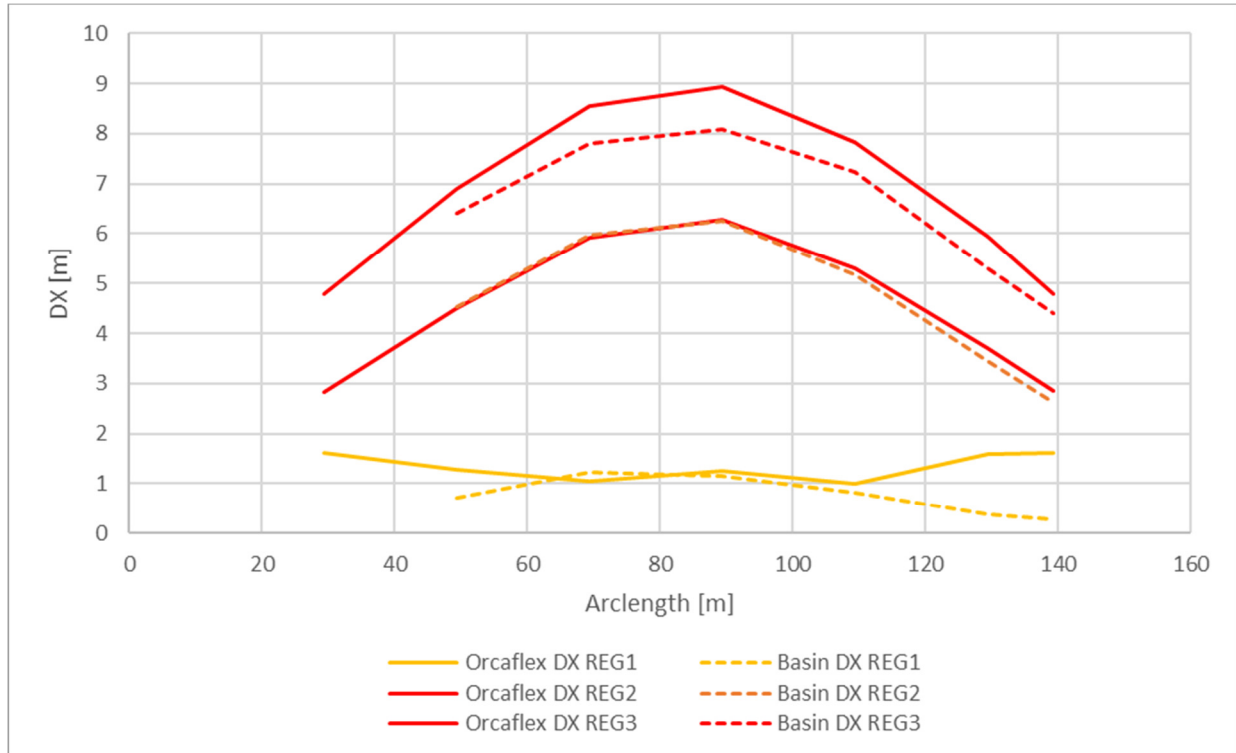


Figure 2-11: Position X extrême de la conduite flexible (Configuration 1) pour $P_i = 10$ bar, sous 90° incident RE1, REG2, et REG3.

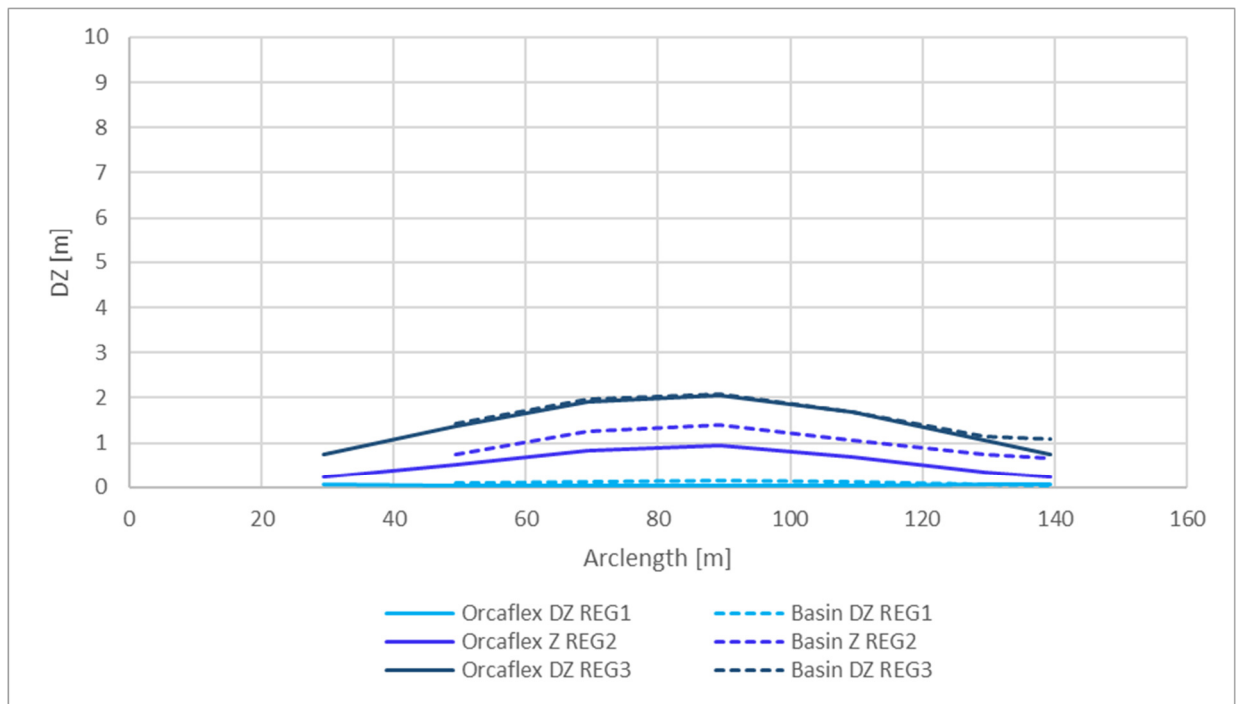


Figure 2-12: Position Z extrême de la conduite flexible (Configuration 1) pour $P_i = 10$ bar, sous 90° incident RE1, REG2, et REG3.

- Fixé aux deux extrémités, le tuyau flexible adopte une forme d'arc de cercle dans les directions x et z.

- Plus la hauteur de vague régulière est élevée, plus les décalages par rapport à la position initiale sont importants.
- Les décalages dans la direction x sont plus grands que dans la direction z, étant donné que le système de conduite flexible est contraint par des points de fixation de l'élingue d'ancrage dans la direction z. Par exemple, à REG3, le décalage x maximal atteint 9 m à mi-longueur du tuyau, pour seulement 2 m dans la direction z.
- Globalement, les décalages du modèle numérique, représentés en trait plein, sont bien prédits par rapport aux données expérimentales représentées en pointillés.
- Les x-offsets sous REG3 sont cependant légèrement surestimés par le modèle numérique.

Pour tester davantage la prévisibilité du modèle numérique, une comparaison similaire entre les décalages maximaux expérimentaux et numériques du tuyau est effectuée dans la Figure 2-13 (direction x) et Figure 2-14 (direction z), en prenant la pression interne comme variable. Les déports des flexibles sont tracés pour un REG2 incident à 90° pour un P_i de 10bar, 25bar et 40bar (essais 9, 15, 16). De plus, le 1er mode dans la direction x pour le montage expérimental (essais 75 et 77) et la reproduction numérique sont fournis dans Tableau 2-6, car la pression interne a un impact direct sur la rigidité en flexion de la conduite flexible et donc son mode propre. Le Tableau 2-6 contient également les charges axiales d'extrémité mesurées expérimentalement à la balance amont et son analogue numérique.

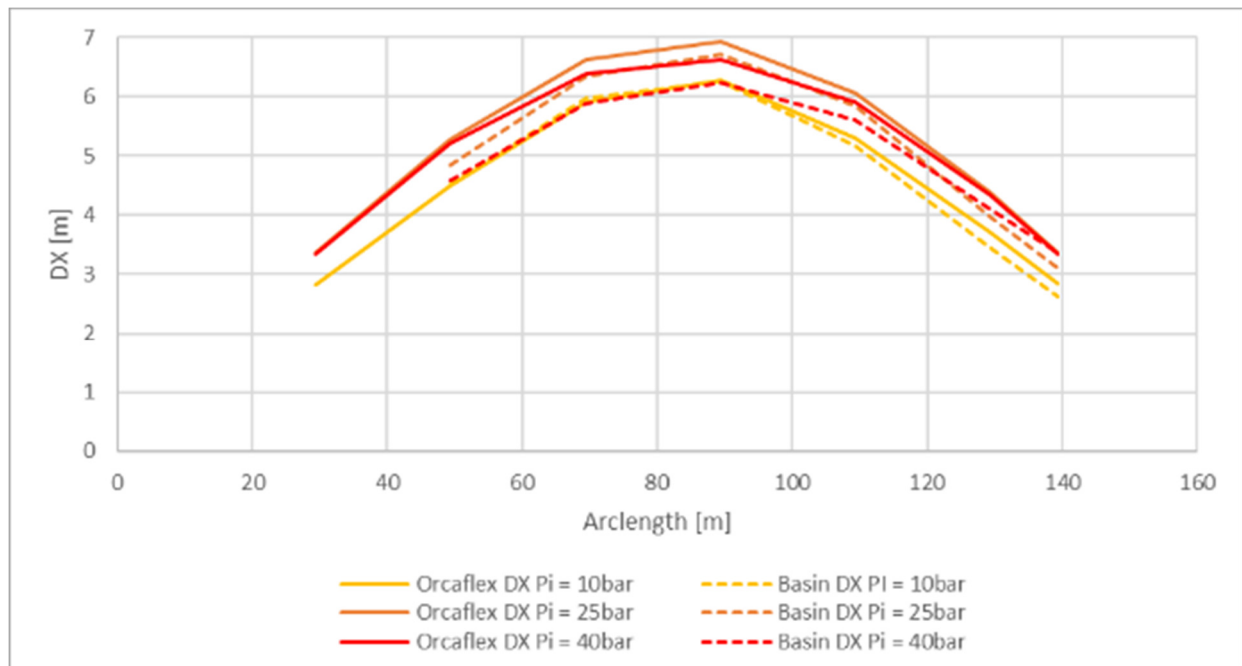


Figure 2-13: Position X extrême de la conduite flexible (Configuration 1) sous une incidente à 90° REG2, pour $P_i = 10\text{bar}$, $P_i = 25\text{ bar}$, et $P_i = 40\text{bar}$.

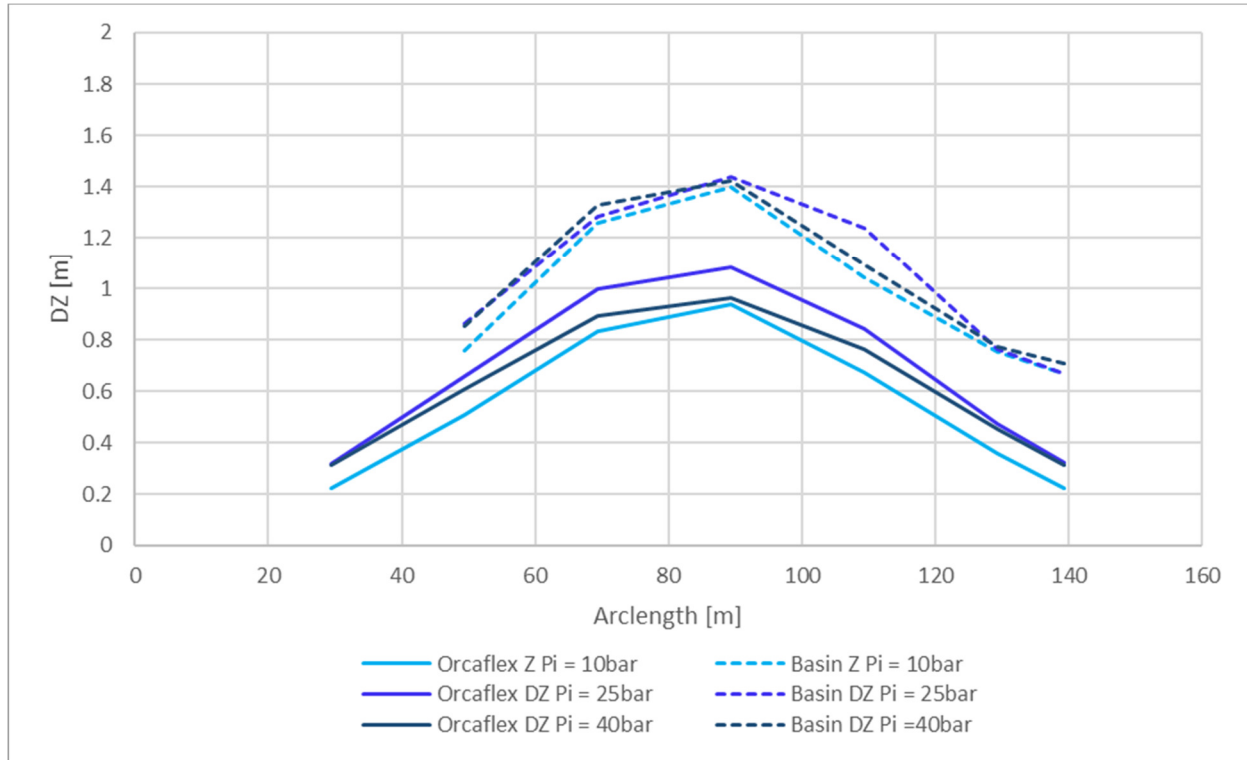


Figure 2-14: Position Z extrême de la conduite flexible (Configuration 1) sous une incidence à 90° REG2, pour Pi = 10bar, Pi = 25 bar, et Pi = 40bar.

- Contre-intuitivement, les déplacements dans les directions x et z sont plus grands pour Pi = 25bar, plutôt que Pi = 10bar qui est théoriquement censé produire les déplacements les plus grands, étant donné que plus la Pi est élevée, plus la rigidité en flexion est élevée ; et que la conduite flexible se rétracte sous pression.
- Cependant, le modèle numérique prédit la même tendance que celle observée dans le bassin : les déplacements x et z sont les plus grands pour Pi = 25bar, puis pour Pi=40bar, et enfin Pi=10bar a les déplacements les plus faibles pour le même état de la mer.
- Alors que les déplacements en x sont légèrement surestimés par le modèle numérique, l'inverse est visible pour les déplacements en z.

	Bassin Tn X	Orcaflex Tn X	Bassin Fy_M5575	Orcaflex Fy_M5575 (fin A)
	[s]	[s]	[kN]	[kN]
Pi = 10 bars	20	21	+79 ⁽²⁾	+79 ⁽¹⁾
Pi = 25 bars	- *	16	+400 ⁽²⁾	+747 ⁽¹⁾
Pi = 40 bars	15	13	+1300 ⁽²⁾	+1469 ⁽¹⁾

Tableau 2-6: Modes propres de la conduite flexible dans la direction x selon les essais en bassin et le modèle numérique Orcaflex.

Remarque * : Aucun test de d'extinction n'a été effectué à Pi = 25 bar.

Note 1 : Les charges axiales d'extrémité Figure 2-9). Etant donné que pour $P_i = 10$ bar, la charge axiale statique mesurée était de -420kN , un facteur de correction de 500kN a été défini pour atteindre la valeur de référence $+80\text{kN}$, pour les tests P_i supérieurs.

Note 2 : Les charges d'extrémité axiales expérimentales statiques reportées ne sont pas celles que l'on retrouve dans les données fournies par Océanide. Le facteur de correction de 500kN a été ajouté aux charges d'extrémité statiques brutes ($P_i = 25\text{bar} \rightarrow F_{y_5575} = -100\text{kN}$; et $P_i = 40\text{ bar} \rightarrow F_{y_5575} = 800\text{kN}$).

A partir Tableau 2-6, les remarques suivantes peuvent être faites :

- Plus la pression interne est élevée, plus la période propre de la conduite flexible est faible, ce qui était prévisible étant donné que plus le P_i est élevé, plus la conduite flexible est rigide.
- Les 1ers modes propres numériques dans la direction x, sont légèrement différents des modes propres expérimentaux (différence de 2s au maximum).
- Malgré l'étape de calibration des charges axiales aux extrémités, les valeurs numériques présentent toujours un décalage avec les valeurs expérimentales (maximum de 347kN pour $P_i = 25\text{bar}$).
- Les divergences entre les modes naturels expérimentaux et numériques et les charges axiales aux extrémités sont très probablement dues à :
 - La précision approximative du facteur de correction appliqué sur les données des charges axiales d'extrémité en raison d'un manque de contrôle expérimental sur la dérive de mesure des échelles d'extrémité, et son évolution en fonction de la pression interne
 - Une pression interne moyenne décroissante, surtout pour $P_i = 40\text{ bar}$ (Figure 2-15)

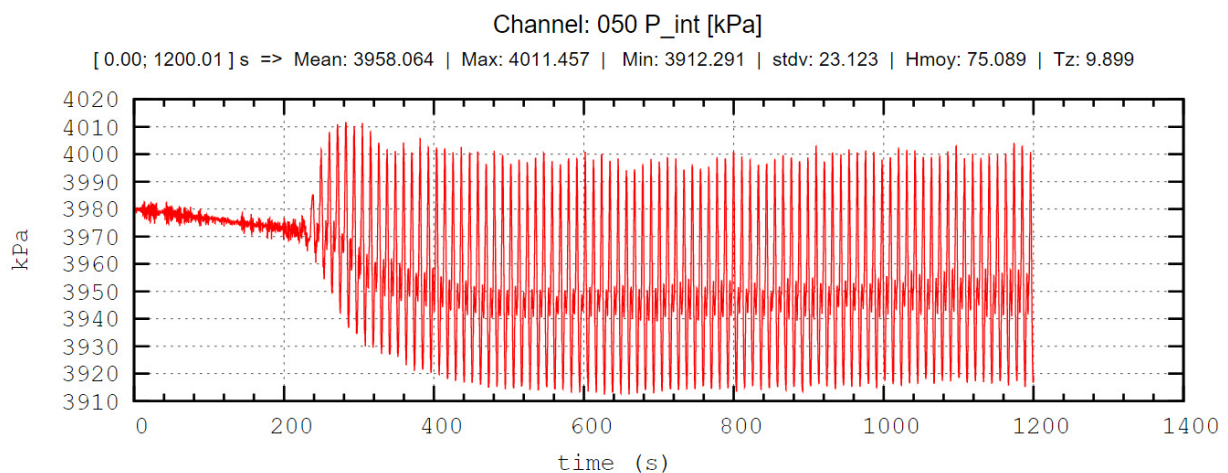


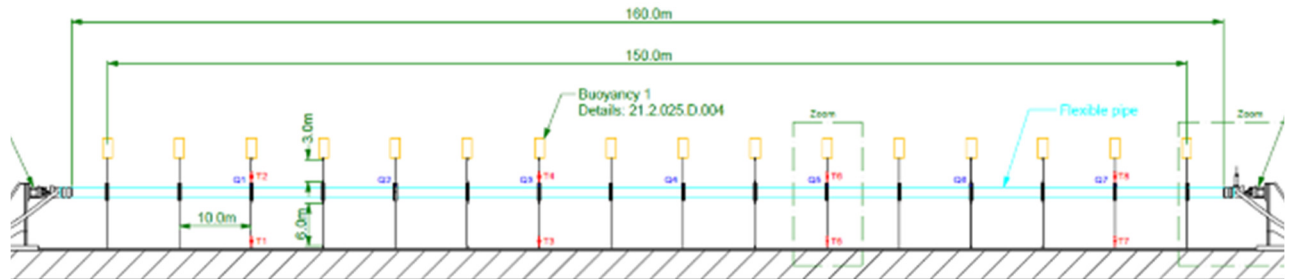
Figure 2-15: Evolution temporelle de la pression interne pour l'essai 16 spécifié à $P_i = 40\text{ bar}$.

2.4.2. Mouvements du tuyau

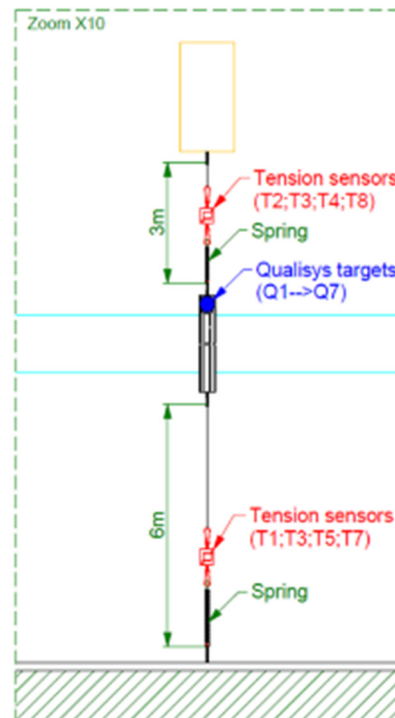
Une étude plus détaillée du mouvement du tuyau est fournie dans cette section. L'évolution temporelle des mouvements de la conduite flexible dans les directions x et z est présentée ci-après à deux endroits différents sur la longueur de la conduite :

- Au niveau de Q3 qui se situe approximativement à mi-longueur du tuyau
- Au Q7 qui est situé à l'extrémité droite du tuyau

Le Croquis 2-2 fournit la localisation de chacun des appareils de mesure utilisés lors de cette première campagne pour la configuration 1 du système de conduite flexible dans des conditions de mer à 90°. Les cibles d'analyse (Q#) pour les cibles de mouvement et les tensièmètres sont signalés (T#). Un croquis en gros plan est également fourni dans Croquis 2-3.



Croquis 2-2: Emplacements des appareils de mesure sur le système de conduite flexible : Q – Cible d'analyse pour le mouvement de la conduite, et T – Tensièmètres pour la tension de l'élingue.



Croquis 2-3: Emplacements détaillés des appareils de mesure.

- Signal temporel de mouvement sous différentes ondes régulières
 - X : REG1, REG2, REG3 pour Q3 et Q7
 - Z : REG1, REG2, REG3 pour Q3 et Q7

La Figure 2-16 illustre l'évolution temporelle des mouvements de la conduite dans la direction x à Q3 (tuyau à mi-longueur) et la Figure 2-17 à Q7 (près de l'extrémité droite/aval de la conduite).

La Figure 2-18 illustre l'évolution temporelle des mouvements du tuyau dans la direction z à Q3 (tuyau à mi-longueur) et la Figure 2-19 à Q7 (près de l'extrémité droite/aval du tuyau).

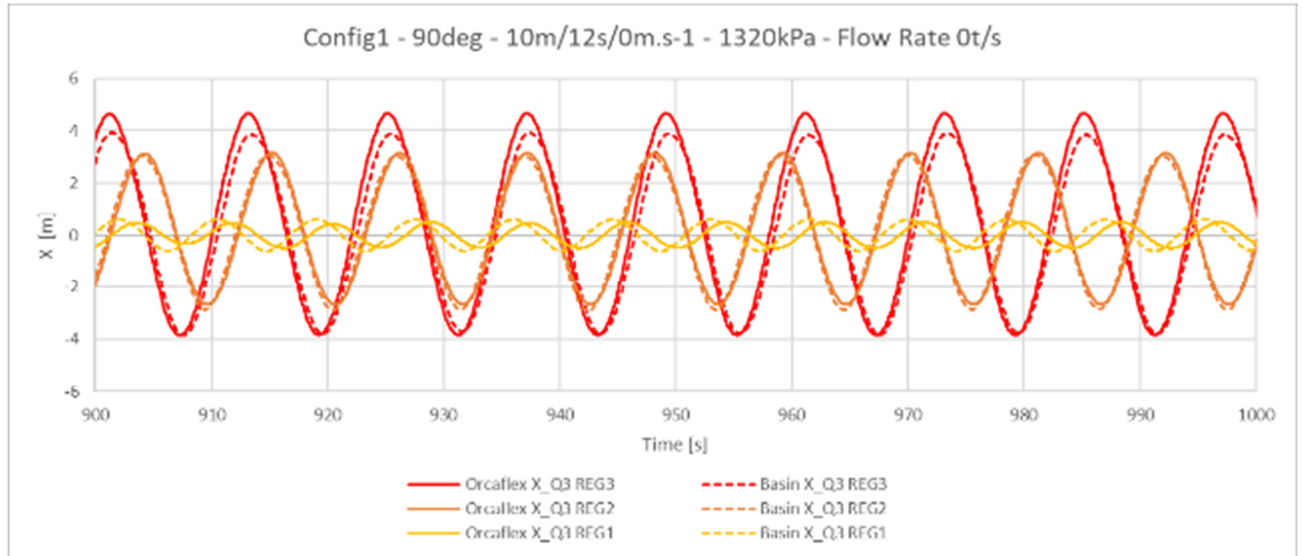


Figure 2-16: Évolution temporelle du mouvement de la conduite flexible dans la direction x à Q3 (approximativement à mi-longueur de la conduite) pour $P_i = 10$ bar, sous REG1, REG2 et REG3.

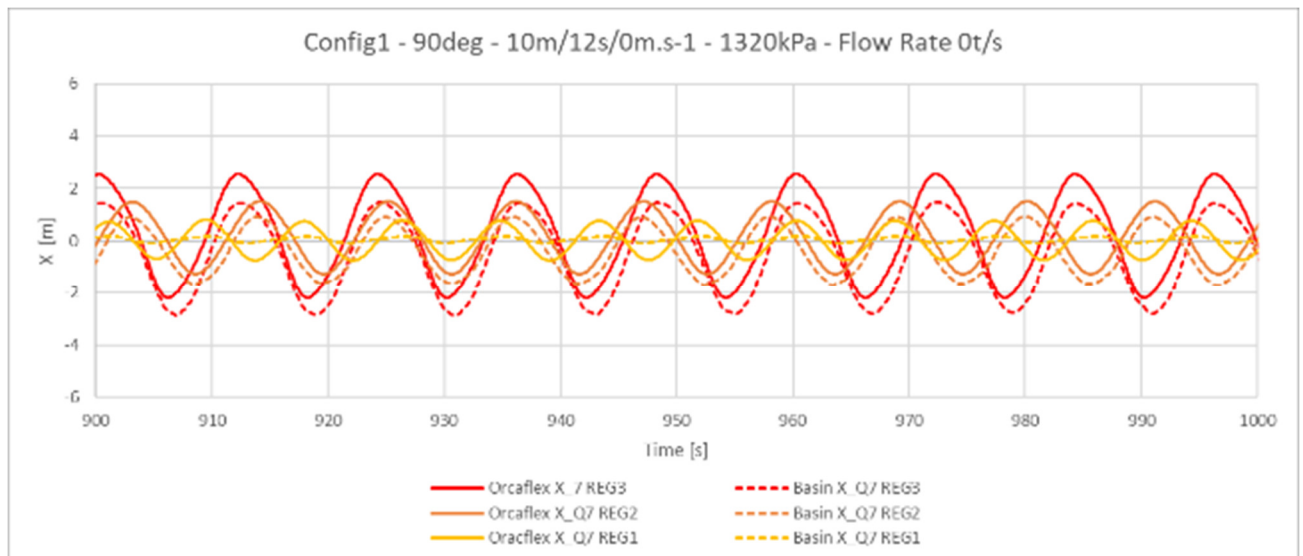


Figure 2-17: Evolution temporelle du mouvement de la conduite flexible dans la direction x en Q7 (approximativement à l'extrémité droite de la conduite) pour $P_i = 10$ bar, sous REG1, REG2 et REG3.

- Les signaux temporels de mouvement en x de la conduite flexible suivent la forme sinusoïdale de l'élévation de l'eau de mer induite par les vagues régulières.
- Encore une fois, plus la hauteur de vague régulière est élevée, plus l'amplitude du mouvement est grande.
- Étant plus proche du point de fixation de l'extrémité du tuyau, Q7 a enregistré des amplitudes de mouvement x inférieures à celles de Q3.
- Le modèle numérique donne des mouvements de tuyau très similaires dans la direction x, aux résultats expérimentaux. Une légère surestimation est cependant visible, notamment à l'extrémité de la conduite (Q7).

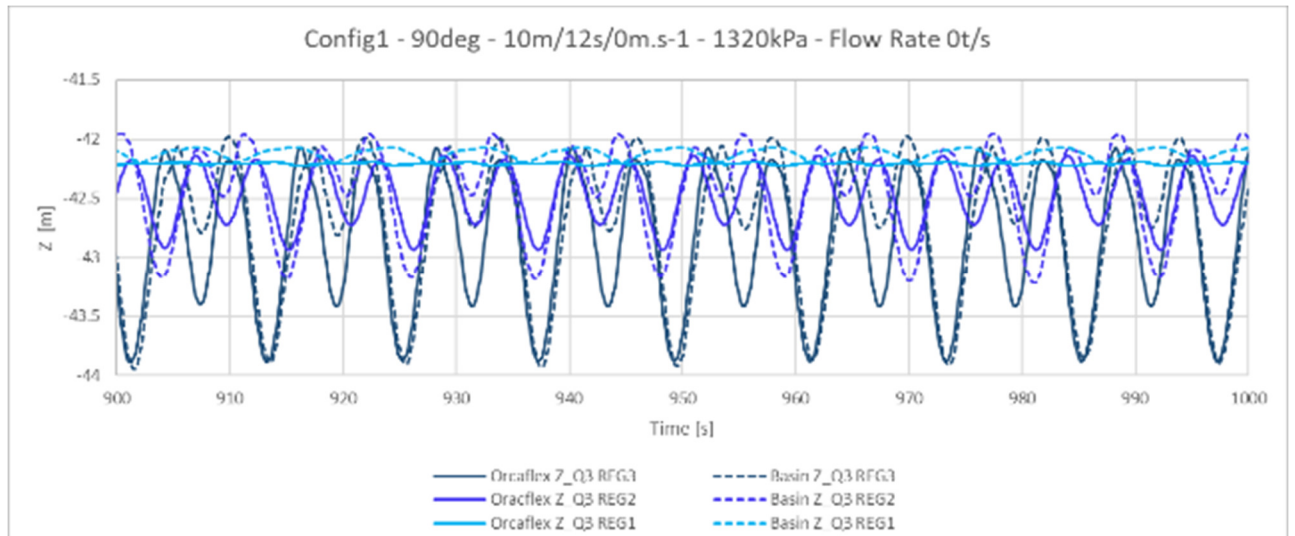


Figure 2-18: Évolution temporelle du mouvement de la conduite flexible dans la direction z à Q3 (approximativement à mi-longueur de la conduite) pour $P_i = 10$ bar, sous REG1, REG2 et REG3.

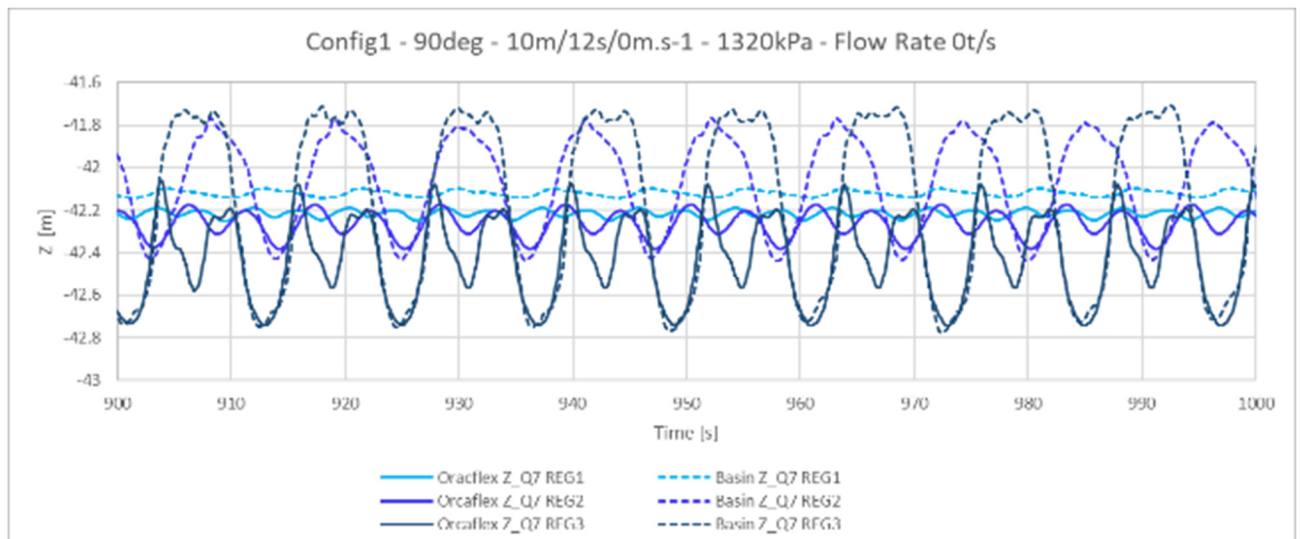


Figure 2-19: Évolution temporelle du mouvement de la conduite flexible dans la direction z à Q7 (approximativement à l'extrémité droite de la conduite) pour $P_i = 10$ bar, sous REG1, REG2 et REG3.

- Encore une fois, les amplitudes de mouvements enregistrés à Q7 sont plus petites qu'à Q3.
- À Q3, à partir de REG2, les signaux temporels de mouvement en z sont à double crête et ne sont plus sinusoïdaux.
- À Q7, cependant, ce modèle de double pic n'est visible qu'à REG3, et il est moins prononcé.
- Les mouvements en z des tuyaux du modèle numérique ont tendance à afficher un motif à double pic plus prononcé que les signaux expérimentaux.

2.4.3. Tensions dans les élingues

Les tensions dans les élingues sont évaluées dans cette section. Les signaux de tension expérimentaux sont comparés à leurs analogues numériques, notamment en termes de valeurs statiques, d'amplitude et de motif du signal. Les tensions des élingues d'ancrage sont d'abord étudiées dans la section 2.4.3.1 (avec T1, T3, T5 et T7), puis les tensions de l'élingue de flottabilité dans la section 2.4.3.2 (avec T2, T4, T6 et T8). Pour rappel, les Croquis 2-2 et Croquis 2-3 localisent les appareils de mesure sur le système de conduite flexible.

2.4.3.1. Élingue d'ancrage

La Figure 2-20 montre l'évolution temporelle de la tension dans quatre élingues d'ancrage lorsque le flexible est soumis à un courant incident à 90° de 0,8 m/s.

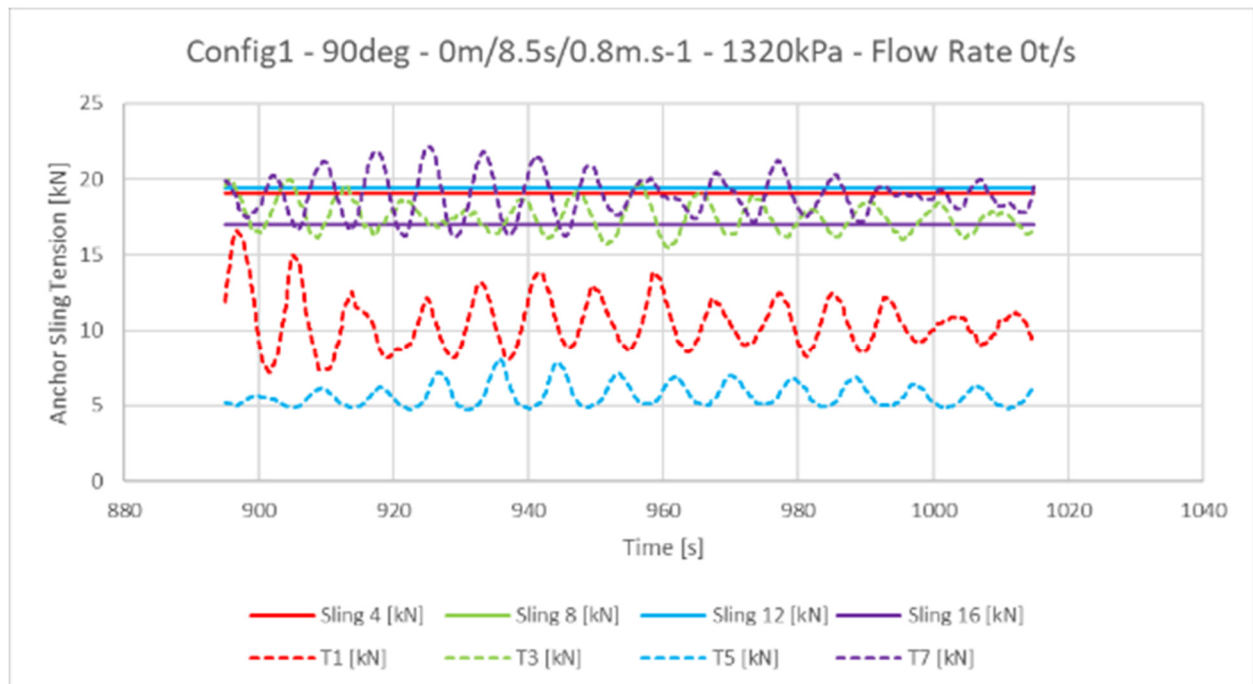


Figure 2-20: Evolution temporelle des tensions des élingues d'ancrage le long du système de conduite flexible, sous un courant incident à 90° de 0,8 m/s.

- Les signaux de tension expérimentaux oscillent en raison du VIV, tandis que les signaux de tension numériques sont complètement constants, étant donné que le VIV n'a pas été implémenté dans le modèle numérique.
- Les tensions expérimentales ne partagent pas la même valeur statique :
 - T1 → 10kN, T3 → 17kN, T5 → 6kN et T7 → 19kN.
 - Il s'agit d'une preuve visuelle de l'état hyperstatique du système de conduite flexible (introduit dans la section 2.1.2.2.3).
 - Notons que pendant la campagne expérimentale, certains AS ont été ajustés en longueur pour tenter de compenser la répartition inégale de la tension AS.
- Les tensions numériques sont toutes égales à la tension de conception théorique d'environ 19kN, à l'exception de T7 qui a enregistré une tension légèrement inférieure (17kN) qui est très probablement due à l'implémentation de la pondération des extrémités de conduite dans le modèle numérique.

Pour évaluer la capacité prédictive du modèle numérique à identifier et reproduire les événements de relâchement / détente (« slack ») dans l'AS, une étude spécifique sur T3 (défini comme l'emplacement le plus sujet aux événements de relâchement / détente (« slack »)) est menée en comparant les signaux de tension de l'AS pour les trois houles régulières incidentes à 90° (Figure 2-21).

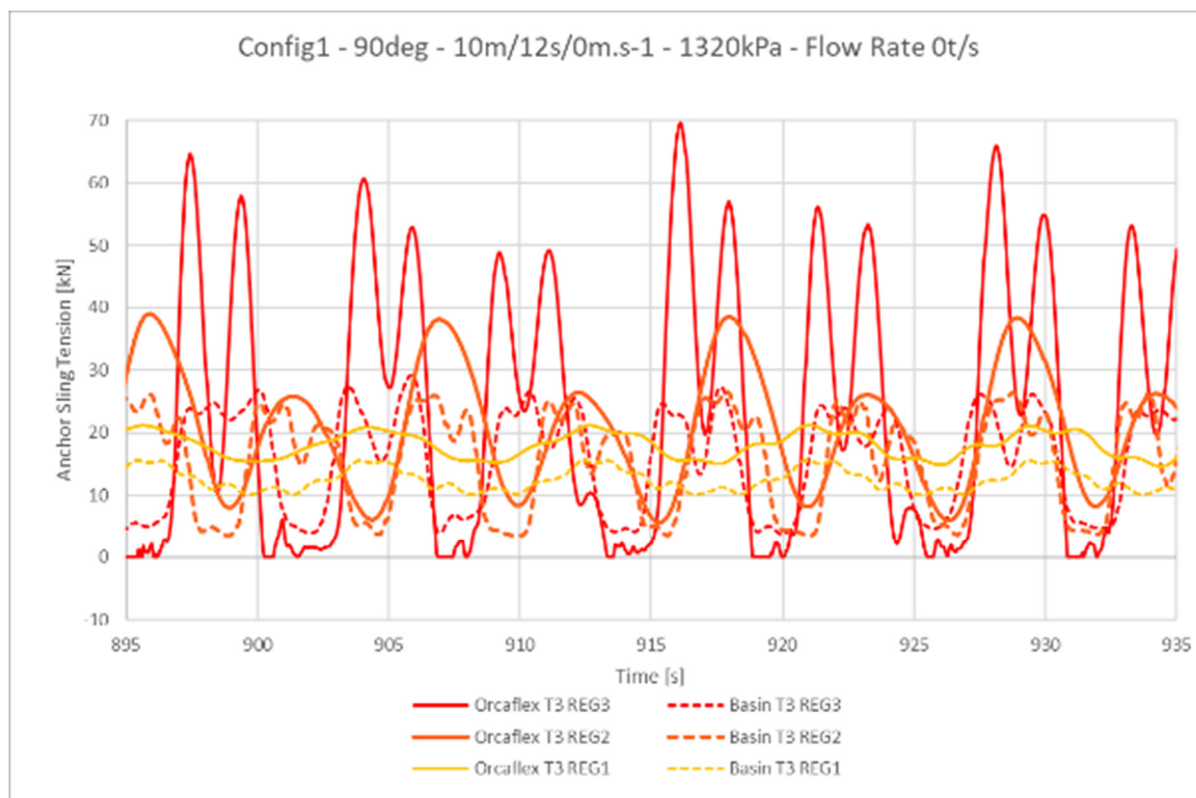


Figure 2-21: Évolution dans le temps de la tension de l'élingue d'ancrage T3 (approximativement à mi-longueur du tuyau), sous un environnement 'incidence de 90° REG1, REG2 et REG3.

- Des événements de relâchement / détente (« slack ») se produisent pour les tests REG2 et REG3 et sont identifiés par le modèle numérique, qui est visible à travers les intervalles de très basse tension immédiatement suivis d'un pic de haute tension.
- Les amplitudes des signaux expérimentaux de tension AS sont estimées comme suit :
 - REG1 : 2,5 kN
 - REG2 : 10kN
 - REG3 : 12,5 kN
- Globalement, les signaux expérimentaux sont bien reproduits par le modèle numérique. Cependant, on remarque que :
 - Les signaux expérimentaux contiennent des composants haute fréquence supplémentaires qui ne sont pas visibles et les signaux de tension AS numériques lisses.

Pour REG2 et REG3, les tensions AS sont surestimées par le modèle numérique. Cette tendance est particulièrement observée pour REG3, pendant la phase de pic de haute tension des événements d'étalement. A titre d'exemple, la tension expérimentale AS maximale enregistrée au cours de cet intervalle de temps tracé atteint presque 30 kN, tandis que son analogue numérique atteint 70 kN.

2.4.3.2. Elingue de flottabilité

Les signaux temporels de tension BS sont comparés à T4, qui est approximativement à mi-longueur de la conduite flexible, pour les trois houles régulières incidentes à 90° de la Figure 2-22.

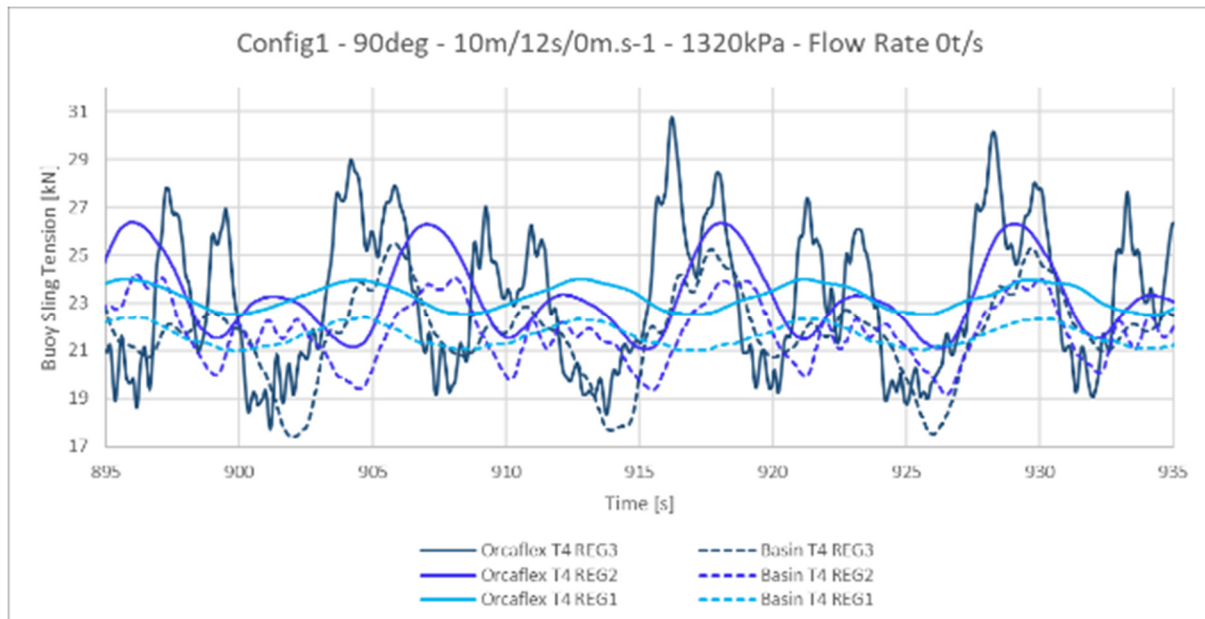


Figure 2-22: Évolution temporelle de la tension de l'élingue de flottabilité T4 (approximativement à mi-longueur du tube), sous un environnement incident à 90° REG1, REG2, et REG3.

- Globalement, le signal de tension BS est bien reproduit par le modèle numérique à la fois en termes d'amplitude et de valeur statique.
- L'amplitude des signaux de tension BS (4kN pour REG3) est plus petite que les amplitudes de tension AS.
- En ce qui concerne la forme spécifique du signal des signaux de tension BS, on peut dire que :
 - À REG1, le signal de tension BS expérimental et numérique est sinusoïdal.
 - À REG2, le signal est à double crête sur une période, mais le signal expérimental contient de faibles composantes haute fréquence supplémentaires, qui ne sont pas visibles sur le signal de tension numérique BS.
 - À REG3, le signal est également à double crête. Le signal numérique contient maintenant également des composants élevés supplémentaires. Les maxima de tension du signal sont cependant légèrement surestimés.

2.4.4. Observations expérimentales des configurations restantes

Le but de cette dernière section est de fournir un résumé succinct du comportement global des configurations restantes du système de conduite flexible. Réf. 3. Article 3.4. fournit une description détaillée tandis que ce document énumère brièvement la principale différence constatée par rapport à la configuration nominale.

Ainsi, les configurations qui n'ont pas été abordées dans les études comparatives précédentes aux résultats des modèles numériques, sont introduites dans cette section, mais uniquement sur la base des données expérimentales, étant donné que le calibrage des modèles numériques pour ces configurations n'a pas pu être fait en raison de contraintes de temps. Ces observations expérimentales pourraient être utilisées comme points de contrôle de l' calibration, si le modèle numérique devait être développé davantage.

Les différents paramètres des différentes configurations de conduite flexible sont présentés dans Tableau 2-2, et rappelés ci-après :

- Configuration 3 - Espacement de 20m avec bouées cylindriques de volume nominal
- Configuration 4 - Ecartement de 20m avec bouées cylindriques de volume doublé
- Configuration 5 – bouées en forme d'anneau de volume nominal
- Configuration 6 - une extrémité de tuyau libre

2.4.4.1. Paramétrage 3

La configuration 3 compte deux fois moins de bouées que la configuration 1. Le système de conduite flexible devrait par conséquent être moins stable lorsqu'il est excité puisque moins de bouées le supportent. De plus, la tension dans le système a donc moins d'options de distribution, étant donné que les points de fixation sont également divisés par deux.

Si l'on considère la Configuration 3 soumise au REG3 (**essai 23**), on constate aisément que les tensions des élingues d'ancrage sont plus de deux fois supérieures à celles enregistrées pour la Configuration 1 (Figure 2-23). Les pics de tension peuvent atteindre jusqu'à 250kN. La perte générale de flottabilité de la configuration 3 semble la rendre plus vulnérable aux événements de relâchement / détente (« slack »).

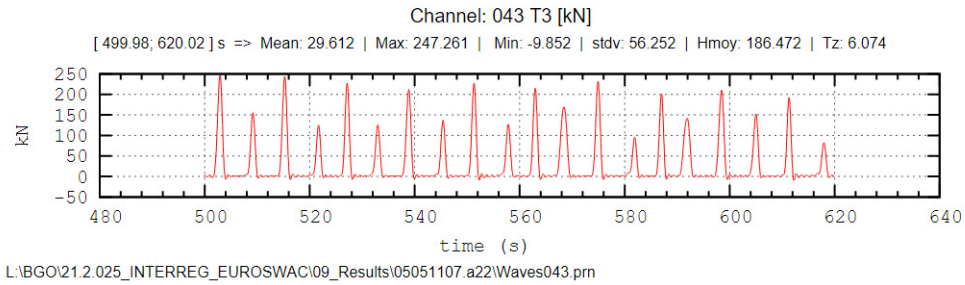
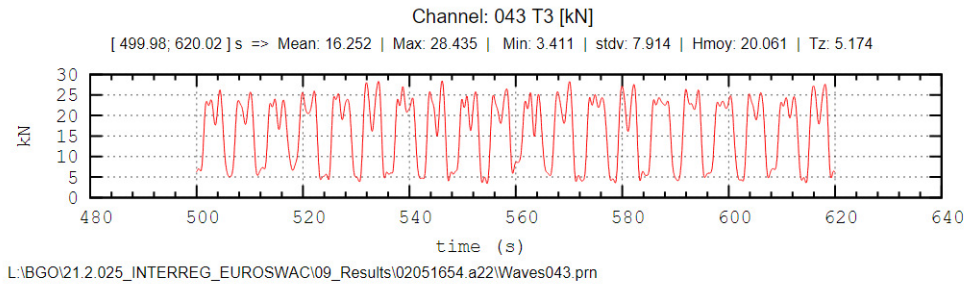
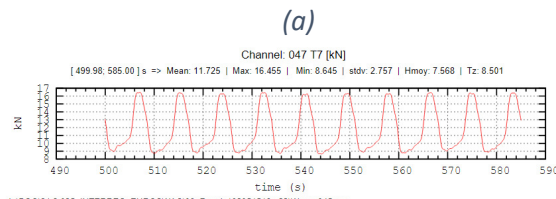


Figure 2-23la tension de l'élingue d'ancrage à T3 sous un incident à 90° REG3 pour (en haut) la Configuration 1 et (en bas) la Configuration 3.

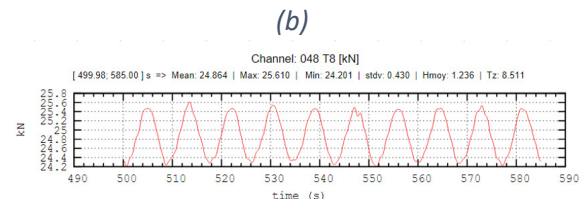
2.4.4.2. Configuration 4

La configuration 4 a également été conçue avec un espacement de 20 m entre chaque bouée, mais avec deux fois plus de flotteurs. De ce fait, les tensions mesurées aux tensiomètres sont censées être multipliées par deux.

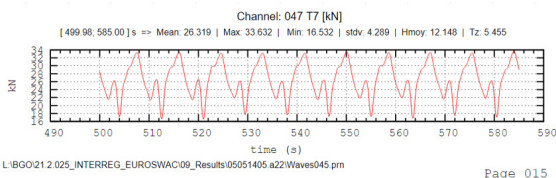
REG1 a été considéré pour assurer un enregistrement sans phénomène de relâchement / détente (« slack »). La comparaison entre la Configuration 1 et la Configuration 4, respectivement **les essais 8 et 25**, révèle en effet une tension globale environ deux fois supérieure pour la Configuration 4. Ce constat vaut aussi bien pour la flottabilité que pour les tensions des élingues d'ancrage (Figure 2-24). Par conséquent, l'impact sur les mouvements de la conduite flexible est tel que les déplacements en x ont des amplitudes plus faibles.



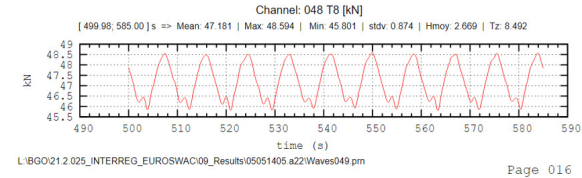
Page 015



Page 016



Page 015



Page 016

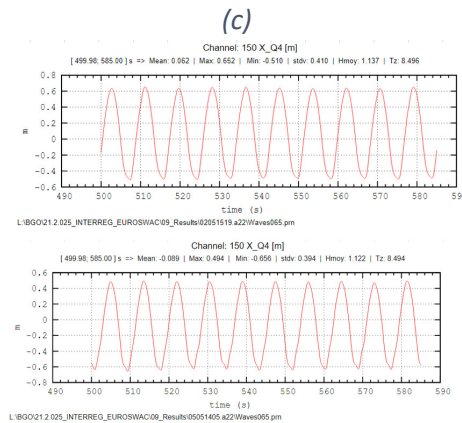


Figure 2-24: Signal temporel de (a) la tension de l'élingue d'ancrage à T7, (b) la tension de l'élingue de flottabilité à T8, et (c) mouvement de la conduite flexible à Q4, sous un incident à 90° REG1.

2.4.4.3. Configuration 5

Les données expérimentales de la configuration 5 composées des bouées en forme d'anneau ont démontré le renforcement de l'hyperstatisme du système de conduite flexible. Les signaux des élingues d'ancre à REG1 ont montré une répartition inégale plus prononcée de la tension. La comparaison de REG3 a démontré que la configuration 5 est plus sujette aux événements de relâchement / détente (« slack ») et aux pics de haute tension.

2.4.4.4. Configuration 6

Enfin, la comparaison de la Configuration 6 avec la configuration nominale confirme les résultats attendus : le mouvement à l'extrémité libérée de la conduite est plus important car libre de son mouvement. De plus, la charge d'extrémité de tuyau à l'extrémité du tuyau toujours fixe est soumise à une charge d'extrémité axiale moindre. Il a également été noté que lorsqu'il est exposé à de hautes vagues comme REG3, le système génère des pics de tension d'élingue d'ancrage plus élevés.

2.5. Conclusions de la 1ère campagne

Les principaux objectifs de la première campagne étaient de fournir des données permettant à la fois de mener une étude hydrodynamique du système de conduite flexible et de permettre la calibration du modèle numérique Orcaflex associé dans ses limites. L'état d'avancement du projet de recherche sera d'abord abordé dans la section 2.5.1, et une ouverture vers la 2ème campagne expérimentale du projet EUROSAC est faite dans la section 2.5.2.

2.5.1. Points clés de la 1ère campagne

- Une configuration nominale du système de conduite flexible avec ses deux extrémités fixes et soutenues par des modules flottants répartis avec un espacement de 10 m a été définie. Dans cette configuration, les bouées sont reliées à la conduite flexible par des élingues de flottabilité, elles-mêmes montées sur un dispositif de liaison en forme de collier disposé autour de la conduite. La conduite flexible est ensuite fixée au sol par l'intermédiaire d'élingues d'ancrage, également reliées au collier.
- Cinq autres configurations de ce système nominal de conduite flexible ont également été définies en faisant varier certains paramètres de conception, tels que le volume, la forme ou l'espacement des bouées, ou la rigidité axiale de l'élingue d'ancrage.
- Lors de la campagne expérimentale, menée à Océanide dans le BGO FIRST, les constats suivants ont été faits :
 - Le tuyau flexible sélectionné en polyuréthane tissé, a été caractérisé pour se rétracter sous pression.
 - Le système de conduite flexible présente une hyperstaticité visible à travers la répartition inégale et imprévisible de la tension AS dans le bassin.
 - Les charges axiales aux extrémités des conduites flexibles sont très sensibles à la distance entre les points de fixation des extrémités des conduites.
 - A la configuration 6 (une extrémité de tuyau libre), la déformation initiale à l'extrémité du tuyau est clairement visible.
 - l'espace libre entre la section transversale du dispositif de serrage interne et le tuyau, a créé des inclinaisons de l'élingue, et à son tour un désalignement du tuyau et donc des contraintes supplémentaires qui n'ont pas été prises en compte dans le modèle numérique
- Le montage expérimental a ensuite été reproduit numériquement sur le logiciel Orcaflex, au plus proche de la réalité et calibré selon 4 thématiques spécifiques :
 - Rigidité axiale du tuyau flexible variant en fonction de la pression interne
 - Rigidité en flexion du tuyau flexible variant en fonction de la pression interne
 - Forces axiales d'extrémité de tuyau flexible obtenues grâce à une distance calibrée des points de fixation du tuyau
 - Tension de l'élingue d'ancrage à la configuration 2 (haute AS EA)

- La Configuration nominale pour les essais de vagues régulières incidentes à 90° et de courant, a ensuite été reproduite avec le modèle numérique calibré, pour mener une étude comparative entre les données expérimentales enregistrées par Océanide et les résultats numériques obtenus avec le modèle Orcaflex.
 - Dans l'ensemble, le schéma général des signaux temporels de mouvement x et z de la conduite flexible a été bien prédit par le modèle numérique. Sous l'action des ondes régulières, les mouvements en x étaient sinusoïdaux et le mouvement en z à double pic. Les amplitudes des mouvements en x étaient plus grandes que les amplitudes des mouvements en z.
 - Les signaux de tension ont également été bien captés par le modèle numérique. Le modèle a même pu identifier les événements d'étalement, lorsqu'ils se produisaient dans le bassin. Les pics de haute tension des événements de relâchement / détente (« slack ») ont cependant été légèrement surestimés par le modèle numérique. La tension de l'élingue de flottabilité était inférieure à la tension de l'élingue d'ancrage, comme prévu, étant donné que moins d'éléments flottants sont placés au-dessus de l'élingue de flottabilité que les élingues d'ancrage.
- Plutôt que des limitations logicielles, la calibration du modèle numérique du système de conduite flexible a été principalement limitée par l'hyperstaticité du système.
- Une conclusion générale sur la capacité du logiciel Orcaflex à modéliser un système de conduite flexible tel que celui du projet EuroSWAC serait que plus l'effort de précision dans les données d'entrée est élevé, plus les résultats numériques seront proches des résultats expérimentaux. Les divergences signalées entre les résultats numériques et les données expérimentales sont principalement dues au niveau de précision des données d'entrée dans le logiciel numérique.

2.5.2. Vers la 2ème campagne

- La 2ème campagne présentera 3 systèmes d'ancrage différents constitués de masselottes et/ou d'une chaîne qui ont le double objectif de se rapprocher d'un système d'ancrage plus réaliste et d'amortir les irrégularités des conduites flexibles dues aux points d'ancrage fixes (hyperstaticité)
- Avec le même double objectif que cité précédemment, le nouveau système de conduite flexible sera conçu avec une extrémité libre équipée d'une crépine (pour s'affranchir des incertitudes liées à la tension et se rapprocher de la conception réelle)
- La nouvelle conception du tuyau flexible comprendra également un nouveau mécanisme de connexion élingue-tuyau pour éviter que l'espace libre entre le tuyau et le dispositif de serrage et la position inclinée des dispositifs de serrage aient un impact sur l'inclinaison des élingues.
- Améliorer la méthodologie de caractérisation des conduites flexibles : test de la rigidité axiale sous l'eau avec la conduite remplie d'eau ET pour des tensions plus faibles (inférieures à 800kN, où l'évolution linéaire était supposée lors de la 1ère campagne) pour les mêmes pressions internes.

3. Deuxième campagne

3.1. Conception du système de conduites flexibles

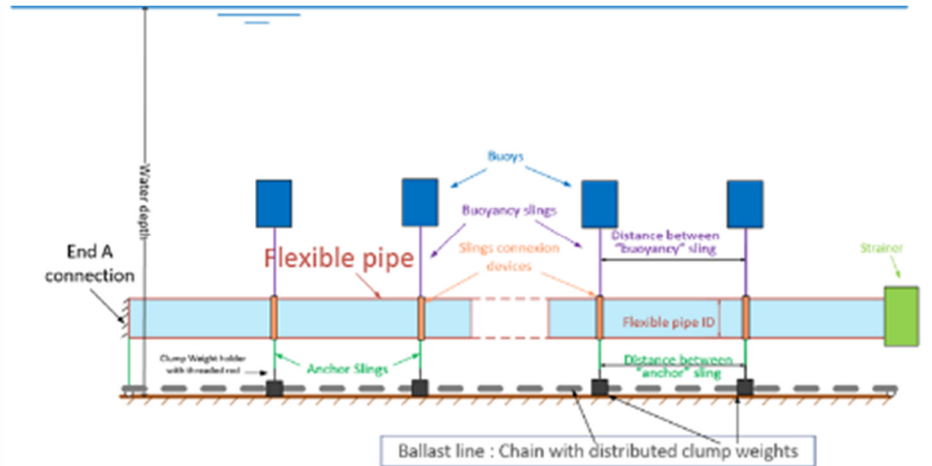


Figure 3-1: Vue de côté du système de conduite flexible testé lors de la 2^{ème} campagne expérimentale.

Comme détaillé dans la Réf. 6, la 2^{ème} campagne vise une conception plus réaliste du système de conduite flexible. Les principaux changements, par rapport au prototype de la 1^{ère} campagne, sont rappelés comme suit :

- Une des extrémités de tuyau est laissée libre et une crépine est montée sur cette même extrémité de tuyau (filtrage nécessaire à l'entrée du tuyau d'admission)
- Trois systèmes d'ancrage différents d'une même masse humide linéaire sont considérés :
 - Poids agglomérés à chaque extrémité de l'élingue d'ancrage (*Configuration 1*)
 - Une chaîne (*Configuration 2*)
 - Une combinaison des deux (*Configuration 3*)
- Ajout de supports CW rigides, conçus comme une base plate circulaire sur laquelle une tige filetée est fixée pour permettre un empilement modulable des poids (Photo 3-1).
- Nouveau dispositif de serrage en sangle souple pour supprimer l'espace libre entre le tuyau et la paroi intérieure du dispositif de serrage (ce qui permettait une position inclinée des dispositifs de serrage précédents, et à son tour, une élingue inclinée) (Photo 3-2).

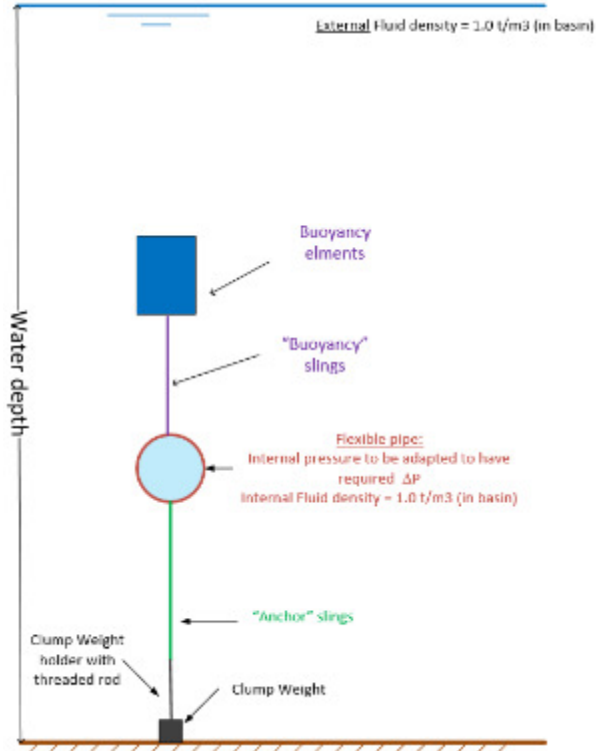


Figure 3-2: Vue transversale du système de conduite flexible.

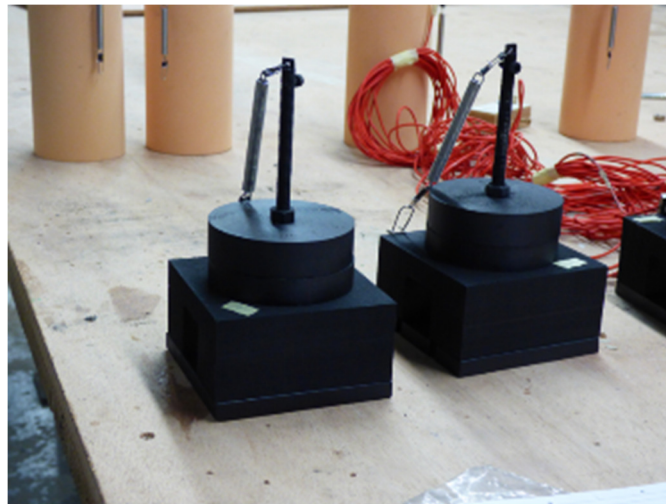
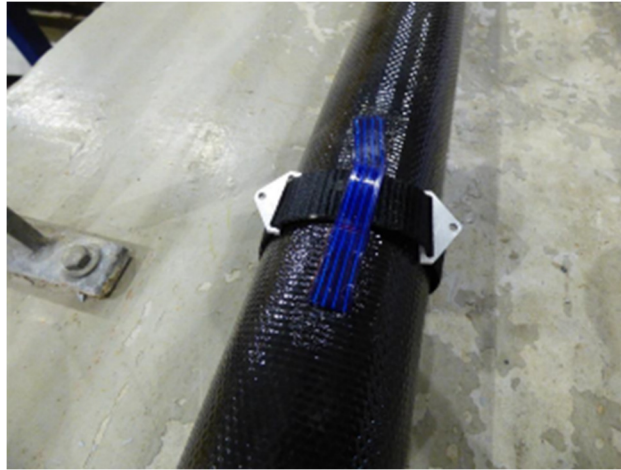


Photo 3-1: Porte-poids rigides.

(a)



(b)

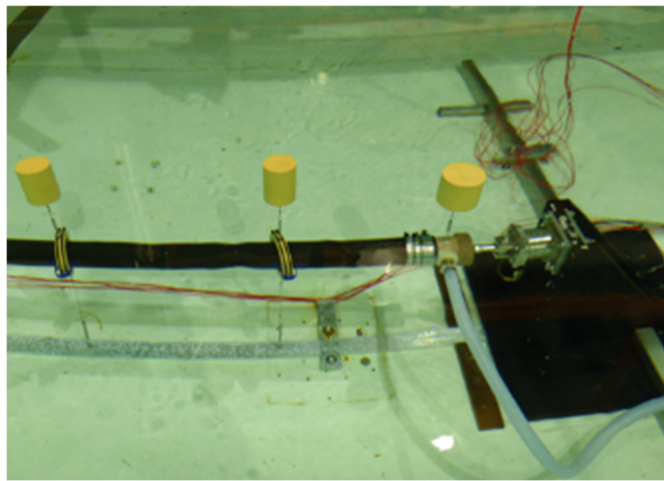


Photo 3-2 : (a) Dispositif de serrage en sangle souple de la deuxième campagne empêchant la position oblique et (b) dispositif de serrage solide précédent utilisé lors de la 1ère campagne avec position oblique visible du dispositif de serrage sur le deuxième axe de l'élingue à partir de la gauche.

A noter que cette nouvelle conception permet également de s'affranchir des problèmes liés à l'hyperstatisme du système de conduite flexible de la 1^{ère} campagne. En effet, lors de la première campagne, les problèmes suivants ont été constatés :

- 1- Les deux extrémités du tuyau étaient rigidement fixées, entraînant une variation incontrôlée de la tension axiale du tuyau avec la pression interne. De plus, la mesure de la charge axiale n'a pas fonctionné correctement, ce qui a entraîné des incertitudes sur la tension axiale de la conduite.
- 2- Les élingues d'ancrage étaient fixées au fond du bassin, entraînant une répartition verticale incontrôlée des charges, principalement due à la déformation permanente des canalisations (mémoire de forme).

3.2. Implémentation du modèle numérique

Cette section contient toutes les données d'entrée et informations nécessaires à la reproduction du modèle numérique Orcaflex établi pour cette deuxième campagne. La plupart des résultats seront détaillés dans la section 3.3, consacrée à la calibration du modèle numérique associé.

3.2.1. Tuyau flexible, raccords d'extrémité et crépine

	Longueur	OD	IDENTIFIANT	Masse par unité (air)	Masse (eau)	IE	EA
-	[m]	[m]	[m]	[t/m]	[kg]	[kN.m2]	[KN]
TechFlex PU Extra 1404mm	160	1.404	1.3	0,257	7862.8	Note 1	Note 1
Fin A	4.392	1.037	0	1.837	4363	8.58E+07	9.07E07
Fin B	2.4	1.199	0	1.861	-3041 ⁽³⁾	8.58E+07	9.07E07
Crépine	5.008	2.9	0	5.2		8.58E+07	9.07E07

Tableau 3-1: Données d'entrée Orcaflex concernant le flexible « TechFlex PU extra », les deux embouts et la crépine.

Note 1 : Ce résultat dépend de la pression interne spécifiée. Les sections 3.3.1& 3.3.2 décrivent respectivement l'évolution des rigidités axiale et en flexion en fonction de la pression interne.

Note 2 : Par souci de simplicité, il a été choisi de n'implémenter que les bonnes masses (dans l'air et dans l'eau) dans le modèle numérique, lorsque l'objet à modéliser avait une forme complexe.

Note 3 : Puisque l'extrémité B et la crépine étaient encastrées ensemble, et que la masse expérimentale dans l'eau a été vérifiée en combinant les deux éléments par Océanide, la masse dans l'eau est fournie pour les deux éléments combinés.

Les coefficients de traînée normale et de masse ajoutée ont été dérivés à la fois de l'étude détaillée menée au cours de la 1^{ère} campagne et rapportée à la section 2.2.2; et détaillé dans la Réf. 3. Section 2.1.2.2. Étant donné que les diamètres extérieurs du modèle numérique de la crépine et des deux extrémités de conduite ont été révisés en fonction de la masse humide et non des diamètres extérieurs réels, les coefficients suivants ont été ajustés en conséquence.

	Coefficients de traînée normaux	Coefficients de masse ajoutés normaux
-	[-]	[-]
TechFlex PU Extra 1404mm	1.2	1
Crépine	1.2	0,645
Fin A	1.6	1,83
Fin B	1.4	1.37

Tableau 3-2: Coefficients hydrodynamiques utilisés dans le modèle numérique du système de conduite flexible de la 2^{ème} campagne.

3.2.2. Modules de flottabilité

La conception des conduite flexible de la 1^{ère} campagne a recyclé les modules de flottabilité de « Flottabilité type 2 » de la 1^{ère} campagne (Section 2.1.1). De même, la bouée utilisée pour annuler la masse humide de la connexion d'extrémité est restée inchangée. Notez que les connexions d'extrémité ont été interverties en raison de l'emplacement du capteur de pression perturbant le montage de la crépine à l'extrémité libre. Ainsi, les bouées d'extrémité ont également été interverties : dans la 2^{ème} campagne, l'ancienne extrémité A a été utilisée comme extrémité B, et inversement.

3.2.3. Élingues

A l'instar de la 1^{ère} campagne, une longueur supplémentaire couvrant le rayon de la canalisation et la hauteur du dispositif de liaison entre la sangle souple et l'élingue (0,707+0,3) ; a été ajoutée à la longueur expérimentale de la fronde numérique (Figure 3-3). Ceci est fait pour éviter l'inclusion de torsion dans le modèle tout en respectant la hauteur de chaque composant dans le système de conduite flexible. Là encore, les DO ont été calculées pour respecter les masses humides fournies. Aucune différenciation n'a été faite pour les élingues qui comprenaient un tensiomètre lors de la 2^{ème} campagne.

A noter que pour cette campagne des supports CW d'une hauteur de 3.6m ont été utilisés pour faciliter le changement de CW entre chaque Configuration et pour permettre la mesure du déplacement CW avec le système de tracking Qualisys. Cet objet est inclus comme décalage de connexion entre les élingues et le CW. Cela explique la longueur plus courte de l'AS, par rapport à la première campagne (Figure 3-3).

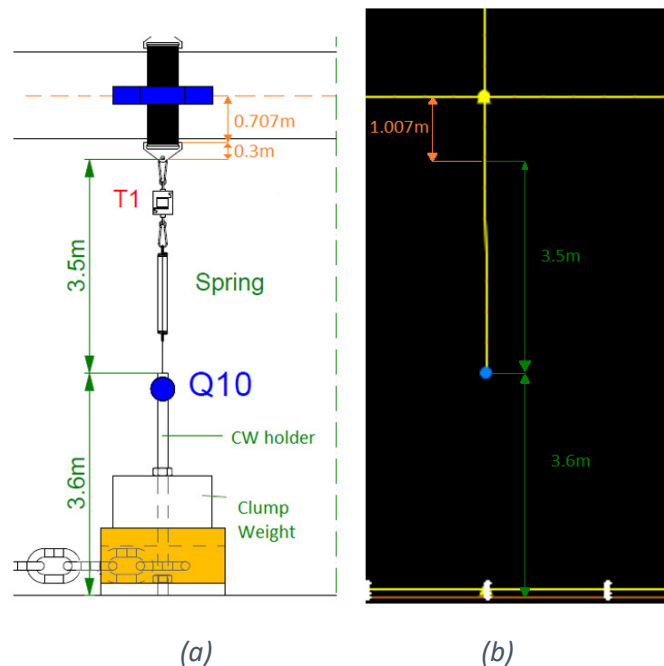


Figure 3-3: (a) Montage expérimental Sling (avec Tensiomètre T1 et cible Qualisys Q10) et (b) Modélisation numérique Sling du montage expérimental.

	Longueur	OD	Masse	Masse humide	Masse par unité	EA	IE
-	[m]	[m]	[kg]	[kg]	[t/m]	[kN.m2]	[KN]
AS réel	3.5	0,123	93,3	81.4	0,0267	1148	0
AS numérique	4.5	0,123	93,3	81.4	0,0207	1478	0
BS réel	3	0,0896	49.3	43	0,0164	2040	0
BS numérique	4	0,0896	49.3	43	0,0123	2725	0

Tableau 3-3: Données d'entrée de la sangle Orcaflex

	Coefficients de traînée normaux	Coefficients de masse ajoutés normaux
-	[-]	[-]
Réel AS	1.2	1
AS numérique	1.2	1
Vrai BS	1.2	1
BS numérique	1.2	1

Tableau 3-4: Coefficients hydrodynamiques Orcaflex pour les élingues.

3.2.4. Configurations d'ancrage

Les CW ont été modélisés comme des objets 3D Buoy Orcaflex. L'objectif est de modéliser uniquement les translations CW puisque les rotations CW ne sont pas mesurées dans le bassin (une seule cible de mouvement est posée sur le CW).

Comme pour les composants précédents, le volume des CW et les diamètres des chaînes ont été ajustés pour s'adapter à la masse fournie dans l'eau.

		Masse	Masse par unité	Volume	OD	Frottement du fond marin ⁽¹⁾	
		[t]	[t/m]	[m3]	[m]	Axiale [-]	Latéral [-]
Configuration 1	MC 1-7	10.828	-	1.388	-	0,57	0,57
	CW 8	18.353	-	2.353	-	0,44	0,44
Configuration 2	Chaîne	-	0,542	-	0,306	0,48	0,38
	CW 8	12.939	-	1.659	-	0,44	0,44
Configuration 3	Chaîne	-	0,3126	-	0,2274	0,49	0,44
	MC 1-7	4.588	-	0,588	-	0,57	0,57
	CW 8	15.233	-	1.953	-	0,44	0,44

Tableau 3-5: Principales données d'entrée Orcaflex pour les composants des trois différentes configurations d'ancrage.

Remarque 1 : Les valeurs des coefficients de frottement sont détaillées dans la section 3.3.3, dédiée à leur calibration.

Les coefficients de traînée de la chaîne ont été obtenus à partir de l'assistant de ligne Orcaflex. Les coefficients de masse et de traînée ajoutés pour les CW ont été grossièrement estimés à partir de la

Réf.10. Aucun autre calibration n'a été effectué sur ces valeurs car cela ne présente pas d'intérêt dans cette étude.

3.3. Axes de calibration du modèle numérique

Cette section fournit une description des sujets identifiés à affiner dans le modèle numérique. Ce processus d'affinage est principalement divisé en 3 axes de calibrage pour cette 2^{ème} campagne :

- Calibration de la rigidité axiale avec une nouvelle procédure de caractérisation expérimentale (immergée)
- Calibration de la rigidité en flexion avec une nouvelle procédure de caractérisation expérimentale (immergée)
- Coefficients de frottement des différents composants d'ancrage

3.3.1. Rigidité axiale

La rigidité axiale du tuyau flexible sélectionné dépend de la pression. Orcaflex permet de modéliser une raideur axiale non linéaire avec une courbe déformation/tension de paroi uniquement. Pour chaque pression interne de conduite, une courbe déformation/tension de paroi (Figure 3-4) est ainsi définie dans le modèle calibré.

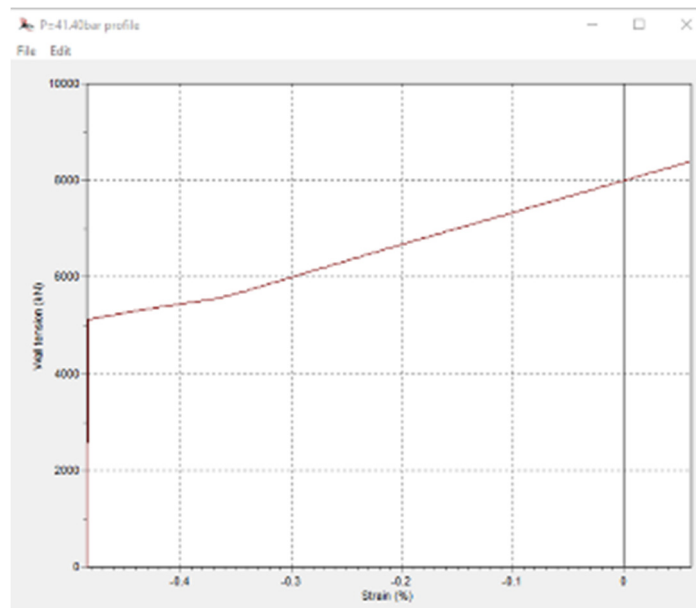


Figure 3-4: Courbe de caractérisation personnalisée déformation/tension de paroi utilisée comme donnée Orcaflex d'entrée pour la spécification de la raideur axiale de l'essai 72 avec $P_i = 41.40 \text{ bar}$.

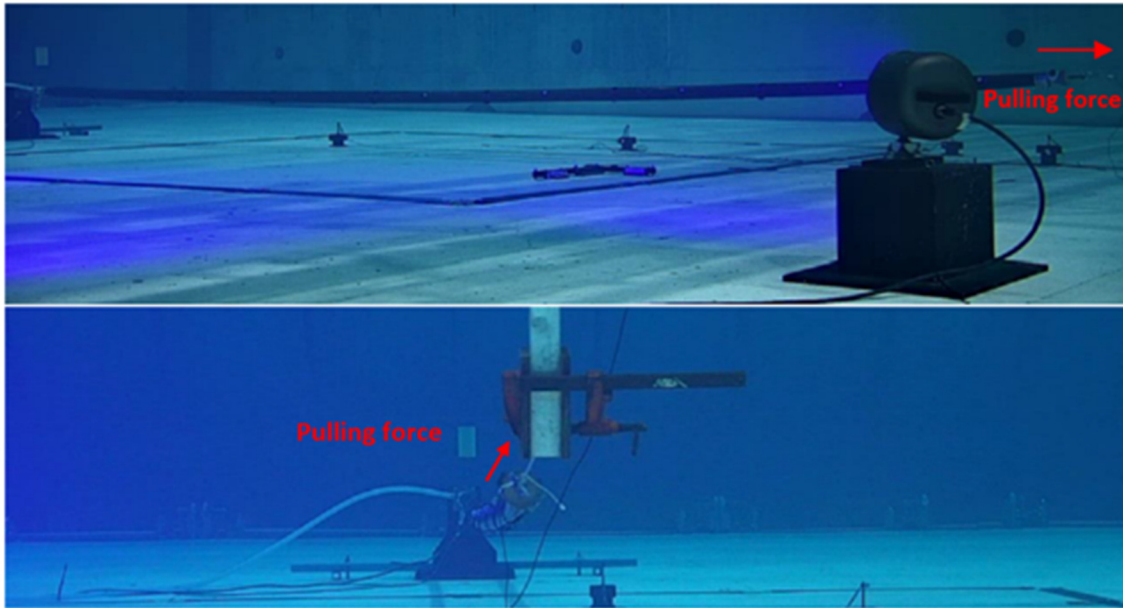


Photo 3-3: Montage expérimental de l'essai 116 ($P_i = 4.2$ bar et force de traction = 110kN) avec le système de traction poulie (a) vue transversale, et (b) vue longitudinale.

Les essais 116-119 étudient la rigidité axiale de la conduite flexible sous l'effet de la pression interne. Pour ce faire, la conduite flexible a été placée sous l'eau et fixée à une extrémité, puis reliée horizontalement à un treuil par une élingue supplémentaire et soumise à une tension et une pression interne croissantes (Photo 3-3). A noter que la plage de tension supposée associée à un comportement EA linéaire lors de la première campagne (les tensions axiales inférieures à 800kN n'ont pas été testées sur la Figure 2-5), est couverte lors de ces essais immergés (env. 200kN -1200kN : Figure 3-5).

Afin d'évaluer la validité de la calibration préliminaire EA réalisée en milieu aérien lors de la première campagne, une comparaison des profils d'élévation obtenus lors de ces essais et une reproduction numérique a été réalisée. Cependant, les profils d'élévation ne se chevauchaient pas, en particulier pour les forces de traction inférieures à 800 kN. La tendance montre que la conduite flexible dans le modèle est trop rigide, en particulier pour les faibles tensions (valeurs Z plus élevées obtenues à partir du modèle).

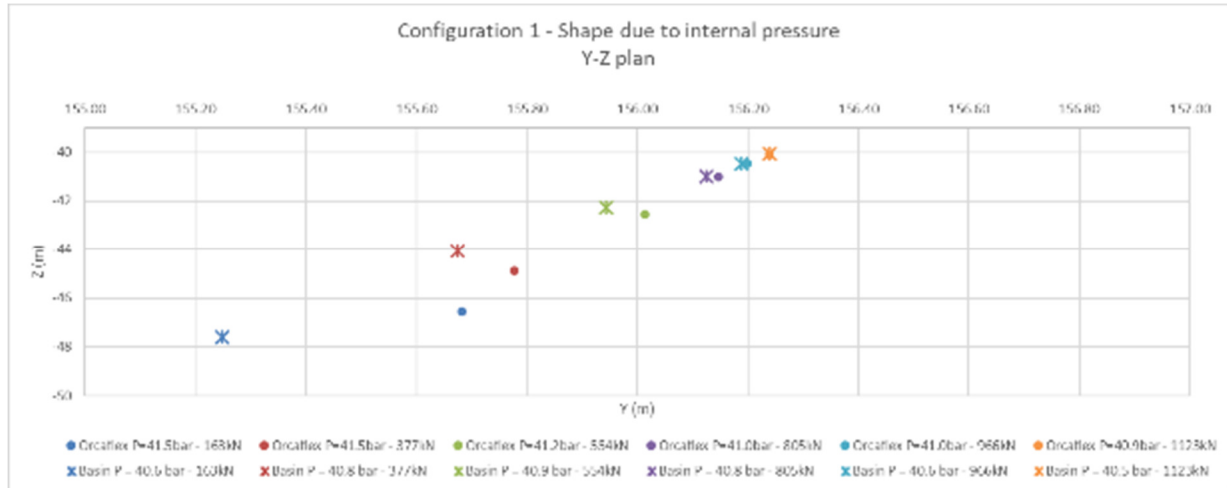


Figure 3-5: Elévation de conduite flexible mesurée avec Q3 obtenue avec la calibration conduite EA de la 1^{ère} campagne. Q3 est la cible Qualysis située la plus proche de l'extrémité B (à la longueur de l'arc du tuyau = 159,392 m). Notez que le tuyau flexible est positionné le long de l'axe y et que la direction Z fait référence à l'axe vertical.

Il a été émis l'hypothèse que cette divergence n'était pas seulement due à l'hypothèse linéaire EA pour les forces de traction inférieures à 800kN, mais également liée au fait que la forme caténaire dictée par la gravité jouait également dans le profil d'élévation, en particulier pour les faibles forces de traction, et faible P_i (Photo 3-3). Pour chaque pression interne, la courbe de faible tension axiale non linéaire est ainsi ajustée itérativement, pour s'adapter aux profils d'élévation obtenus dans le bassin. Cette calibration fournit la courbe de rigidité axiale non linéaire pour chaque pression (Figure 3-8) où la longueur de tuyau initiale $L_0(P_i)$ est obtenue à partir du test 1 (Image 3-4). L'essai 1 a enregistré l'évolution de la tension axiale aux extrémités fixes de la conduite avec un P_i croissant de manière discontinue.

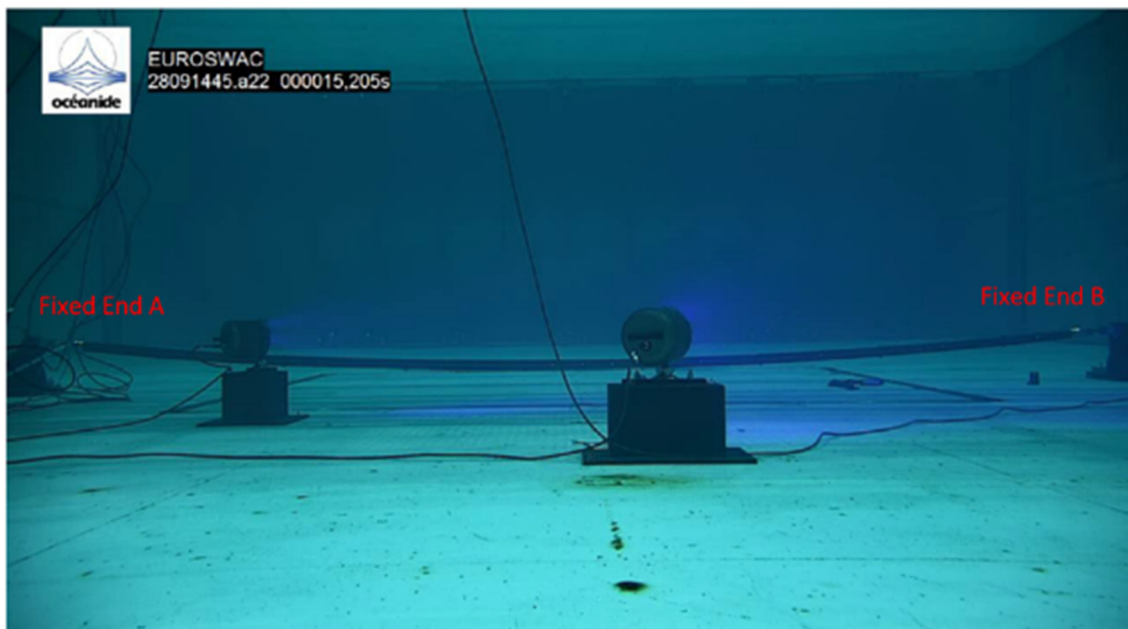


Image 3-4: Test 1 – Caractérisation de la tension axiale pour $P_i = 4.24\text{bar}$ et tension = 310.7kN.

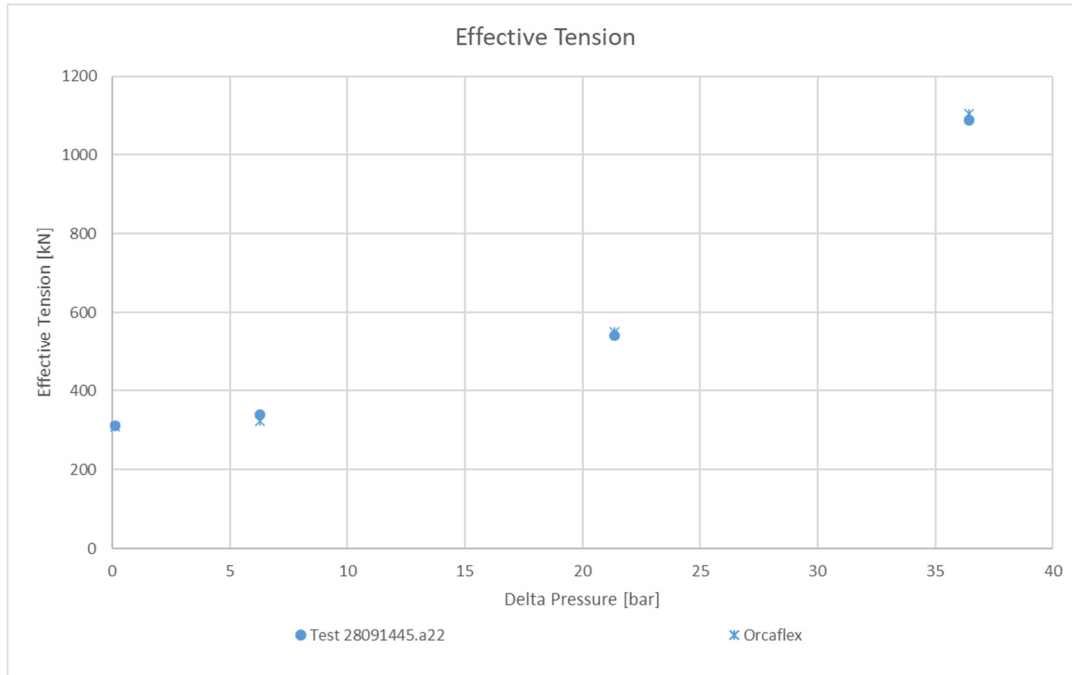


Figure 3-6: Évolution calibrée de la tension effective de la conduite flexible pour la caractérisation en traction axiale (essai 1), en fonction de la pression interne.

Les résultats finaux calibrés montrant les profils d'élévation qui se chevauchent pour le test 1 sont présentés à la Figure 3-7.

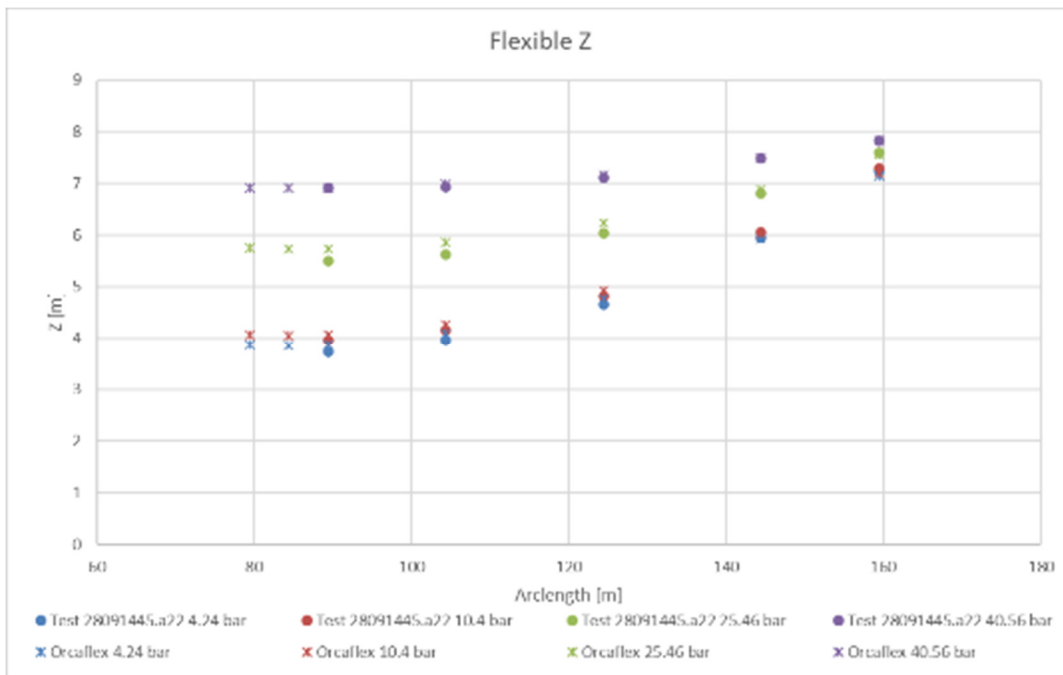


Figure 3-7: Évolution calibrée du profil d'élévation de la conduite flexible pour l'essai de caractérisation en traction axiale (essai 1), en fonction de la pression interne.

La masse par unité de longueur de la conduite flexible a été modifiée pour obtenir le profil d'élévation Z pour les deux Pi inférieurs (4bar et 10bar) au point avec les données expérimentales. En fait, lors de l'utilisation de la masse de tuyau fournie par unité de longueur, seuls les profils d'élévation pour les 25 bars et 40 bars ont été superposés avec les données expérimentales. Etant donné que dans les

essais les Pi inférieurs sont plus sensibles aux forces d'inertie, que les Pi élevés qui rigidifient la conduite flexible, la masse linéique est passée de 0,270 t/m à 0,257 t/m (réduction de 4,81 %). Cette hypothèse a été considérée compte tenu du fait que la masse du tuyau flexible dans l'air est bien définie, mais ce n'est pas précisément le cas de la masse dans l'eau, compte tenu du fait que l'épaisseur du tuyau est mesurée pour être égale à 2,6 mm (échelle du bassin), la tolérance de cette valeur mesurée rend ce changement de masse de 4,81 % acceptable.

Les courbes EA suivantes sont les courbes finales obtenues après les axes de calibration mentionnés ci-dessus. Ils ont été utilisés pour construire une feuille MathCad permettant une estimation de la courbe EA en fonction du Pi, par interpolation linéaire. Le premier Tw a été spécifié à 0kN, pour éviter une rétraction excessive car Orcaflex interpole linéairement en dehors de la plage spécifiée.

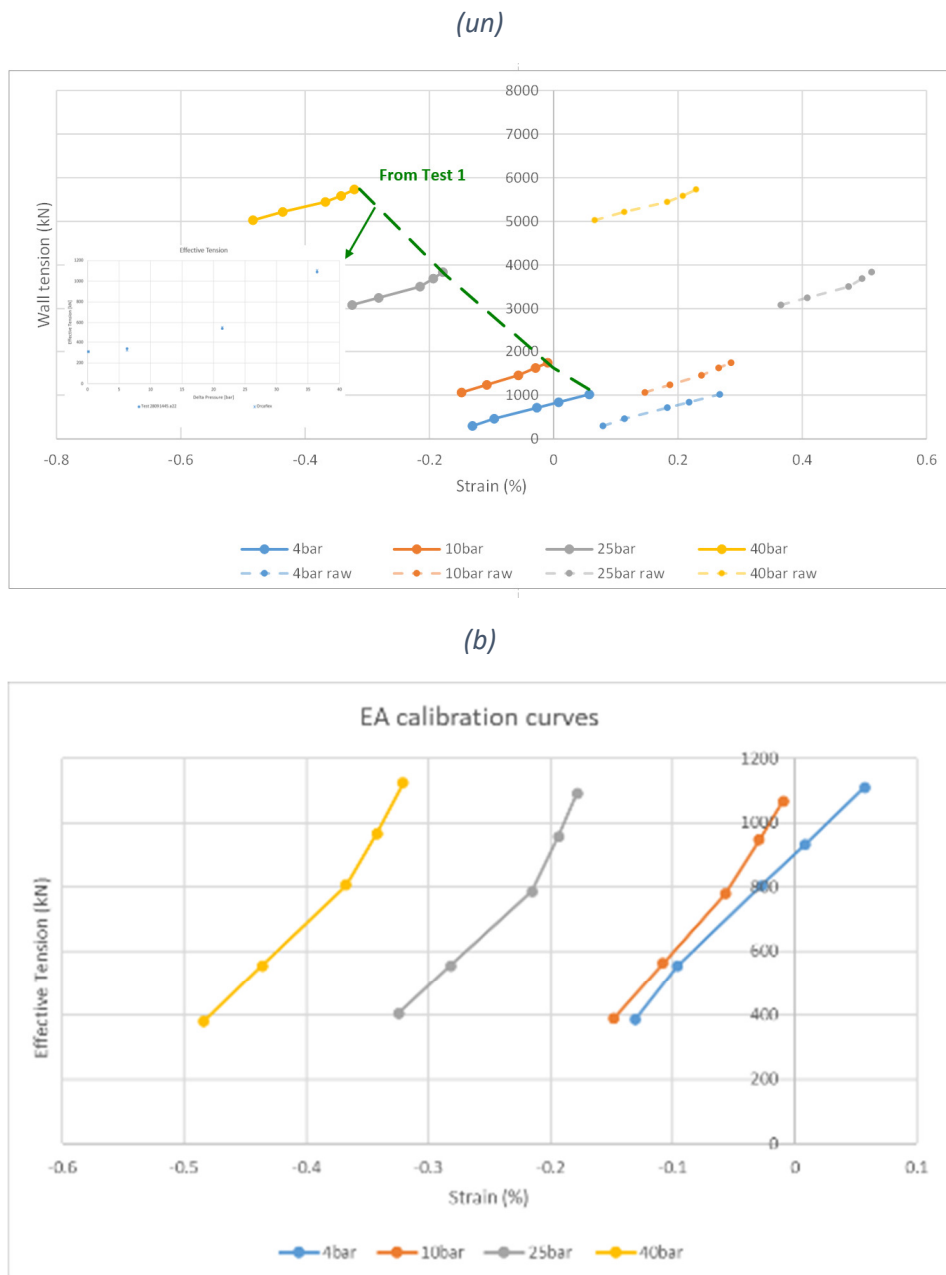


Figure 3-8 (a) tension en fonction de la déformation (%), et (b) tension effective en fonction de la déformation (%) .

Pour étudier plus avant la validité des courbes EA obtenues, le **test 1B** a été reproduit numériquement et les profils d'élévation de la conduite flexible ont été comparés. Le test 1B est le même que le test 1, à l'exception qu'une bouée a été ajoutée à mi-longueur du tuyau flexible, pour tester les tensions axiales inférieures (Image 3-5).

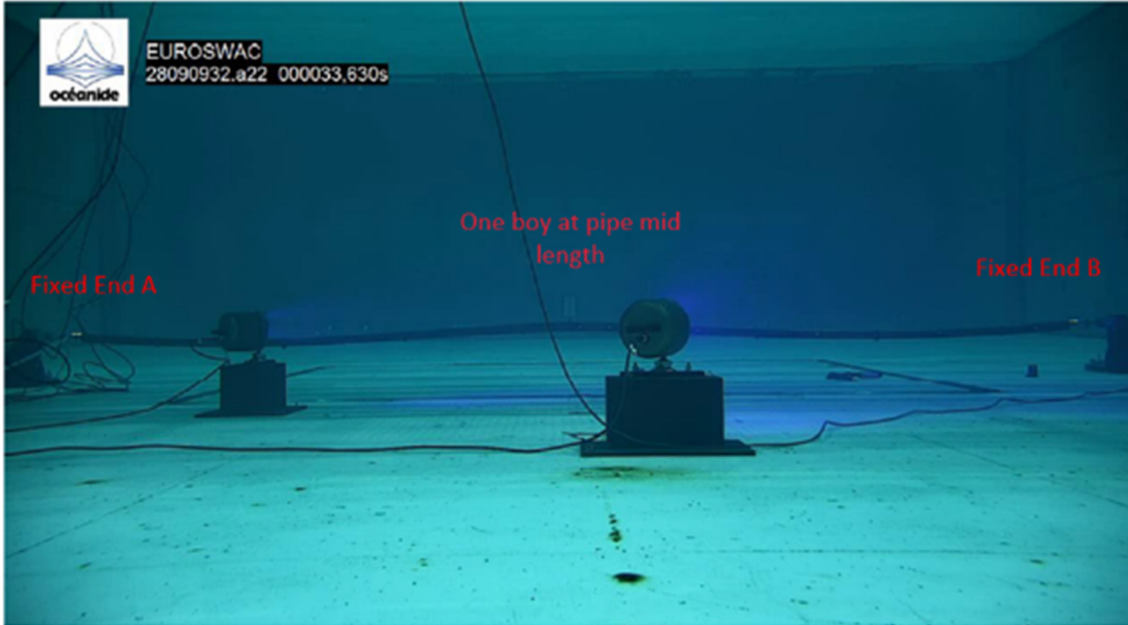


Image 3-5: Test 1B – Caractérisation de la tension axiale pour $P_i = 4.23\text{bar}$ et tension = 103.2kN.

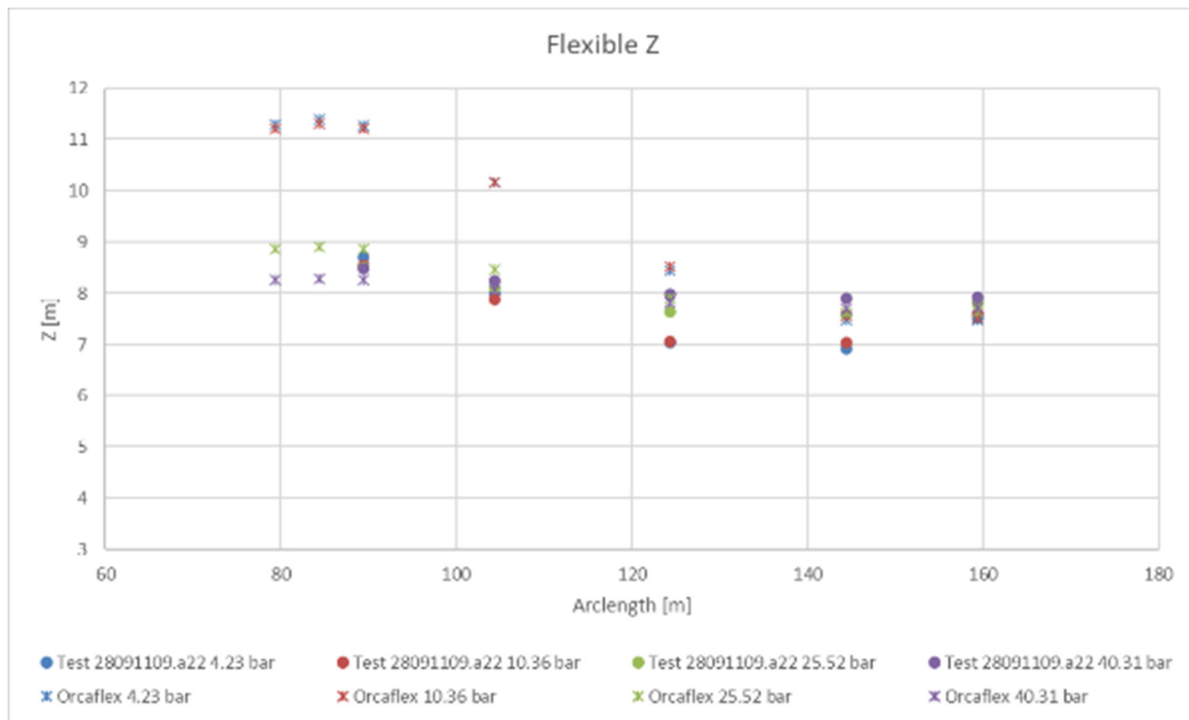


Figure 3-9: Modèle numérique avec une masse linéique de conduite flexible de 0,257 t/m.

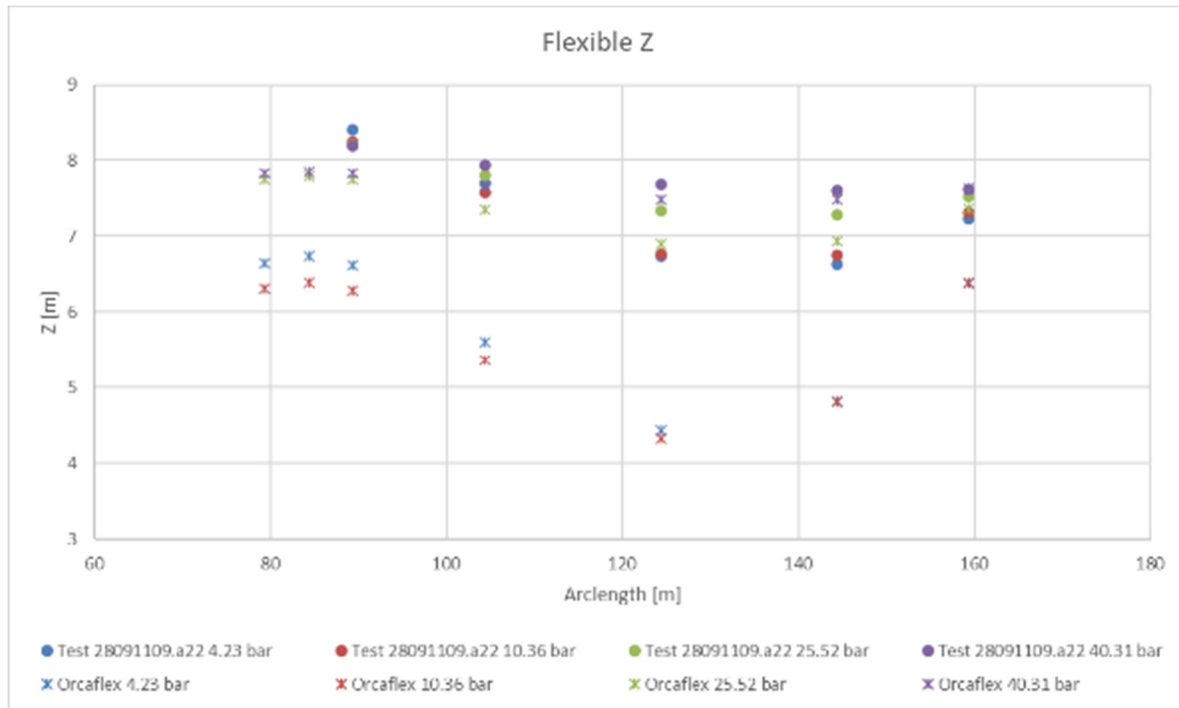


Figure 3-10: Modèle numérique avec une masse linéique de conduite flexible de 0,270 t/m.

En regardant les profils d'élévation du modèle numérique avec une masse unitaire plus légère pour les deux Pi les plus bas (Figure 3-9), les points d'élévation Z du modèle numérique sont surestimés, alors qu'ils étaient sous-estimés par le modèle numérique avec la masse initiale par unité de longueur de 0,270 t/m (Figure 3-10).

Ceci conduit à penser que le processus itératif de calibration de l'EA devrait également inclure l'EI et pas uniquement la masse de la conduite flexible. Cette hypothèse n'a pas été vérifiée par manque de temps.

Notez que les valeurs EI utilisées pour la calibration EA sont celles présentées à la section 3.3.2, telles que dérivées des profils d'élévation des tests 14-16 (première option).

3.3.2. Rigidité en flexion

Afin de calibrer le comportement EI de la conduite flexible en fonction du Pi, deux méthodes de calibration ont été testées.

Option 1 : Calibration itératif de l'EI basé sur l'élévation du profil des **tests 14, 15 et 16** .

La première méthode reposait sur les tests 14, 15 et 16 qui **ont** enregistré l'équilibre statique des trois configurations de conduite flexible testées lors de la 2^{ème} campagne. Etant donné que l'extrémité de la conduite à laquelle est raccordée la crépine n'est pas fixe, la conduite flexible est libre de fléchir sous l'action du Pi, selon l'EI associé (Figure 3-11).

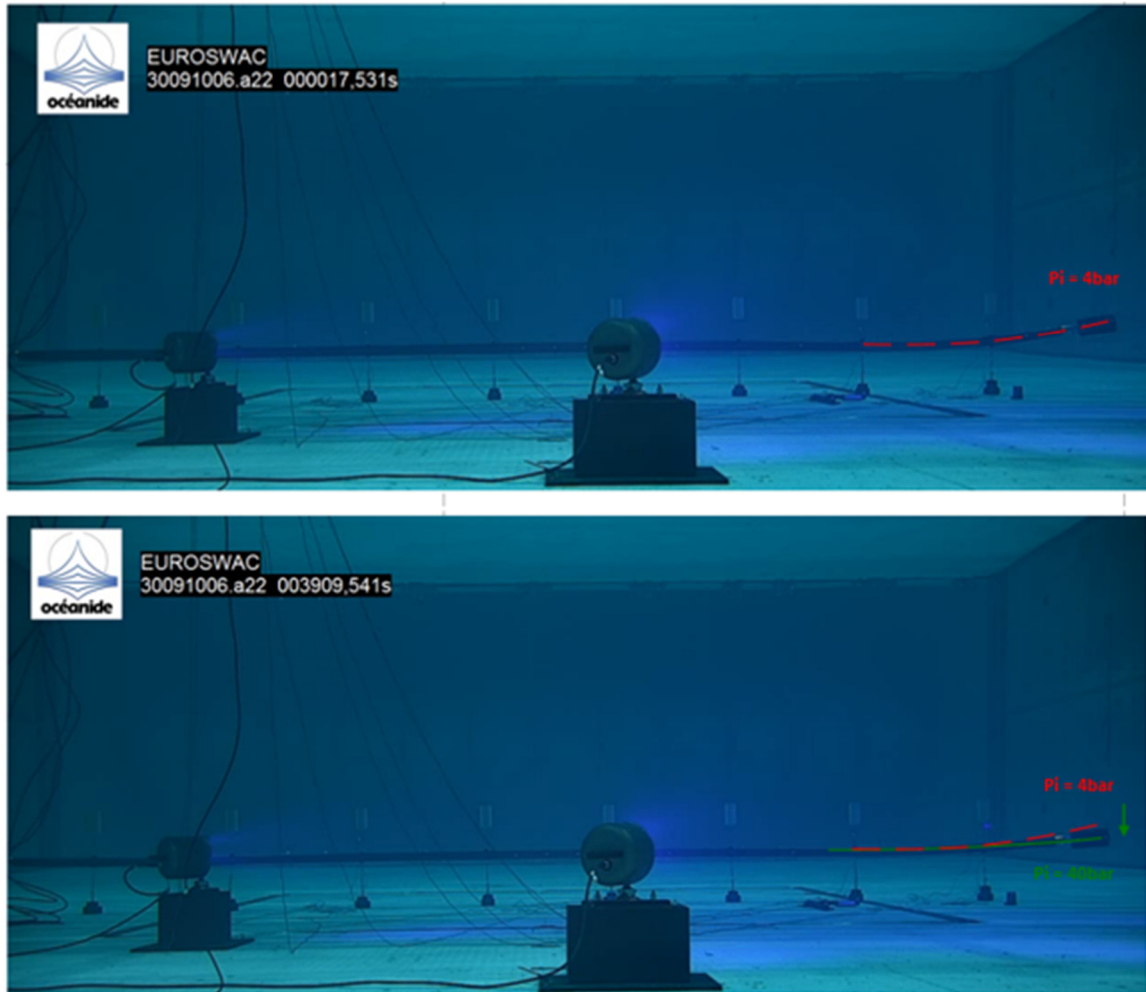


Figure 3-11: Montage expérimental du test 14 – Test de rigidité en flexion sur la Configuration 1 à $P_i = 4\text{bar}$ et $P_i = 40\text{bar}$.

Les profils altimétriques expérimentaux du test 14 (Configuration 1) ont servi de référence pour calibrer l'EI en fonction de la P_i .

P_i	IE
[kPa]	[kN.m ²]
447	31000
1030	36000
2454	52000
4081	85000

Tableau 3-6: Valeurs de EI obtenues à partir de la méthode du profil d'élévation, en fonction de la pression interne.

Les profils d'élévation suivants ont été obtenus pour la configuration 2 (test 15) et la configuration 3 (test 16) à l'aide de l'EI calibré indiqué dans Tableau 3-6.

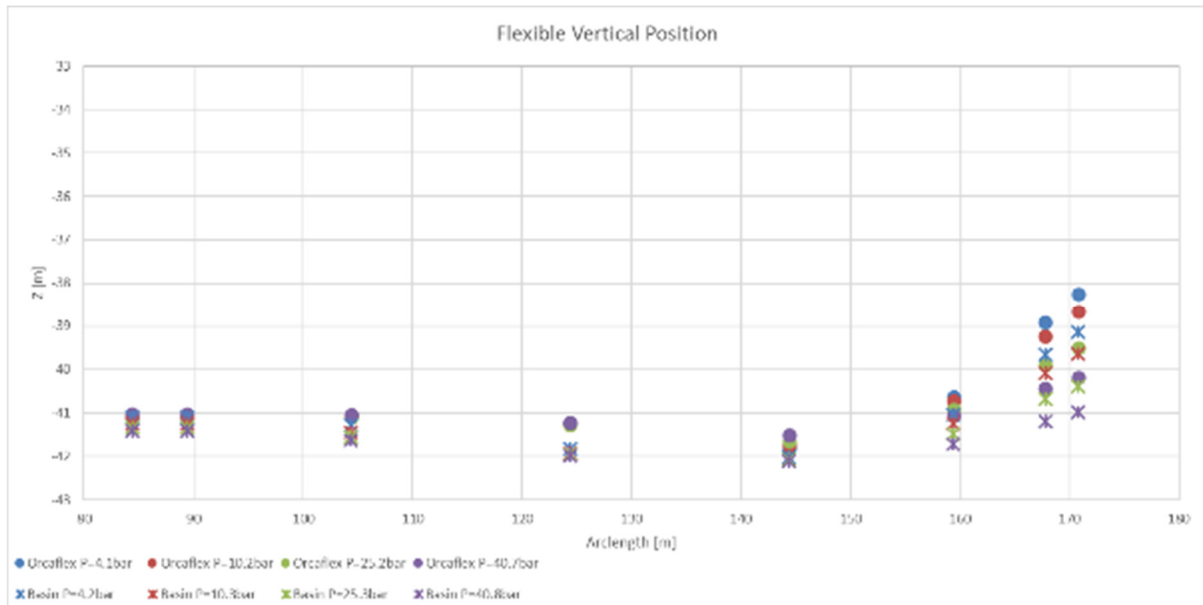


Figure 3-12: Profil d'élévation du test 15 (Configuration 2).

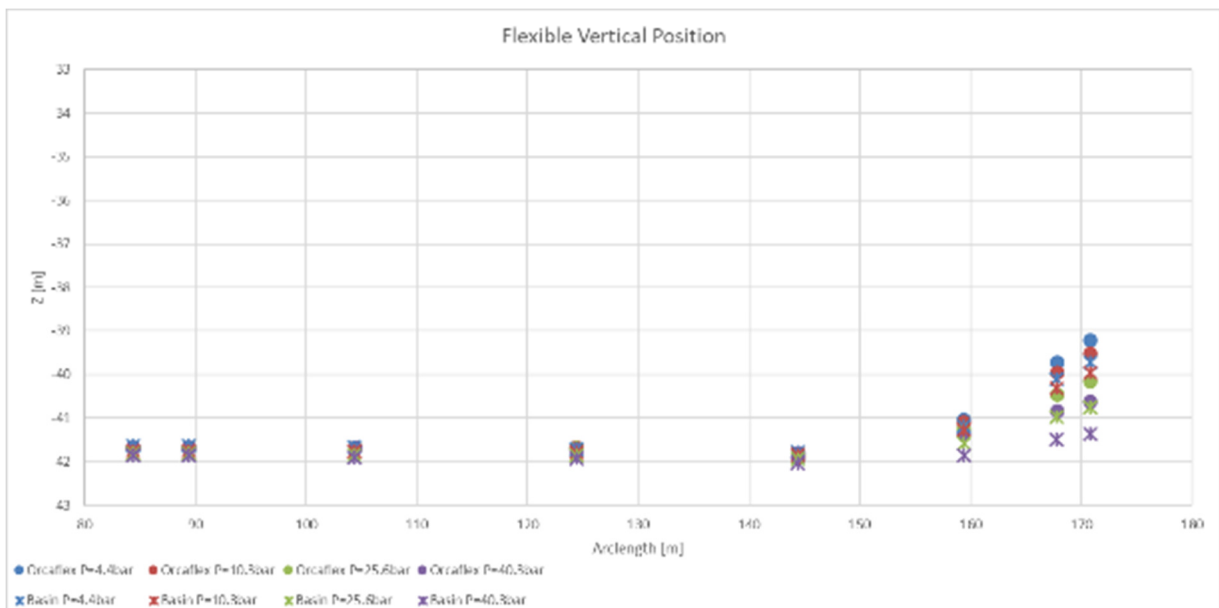


Figure 3-13: Profil d'élévation du test 16 (Configuration 3).

Les profils d'élévation des configurations 2 et 3, représentés sur Figure 3-12 et Figure 3-13 ne se chevauchent pas complètement, en particulier au niveau de la partie d'extrémité libre qui est sensible à la valeur EI. Après enquête, il a été observé que l'extrémité libre du tube d'extrémité de l'essai 14 (Configuration 1), sur laquelle la calibration a été effectuée, était particulièrement courbée transversalement (Photo 3-6). On a émis l'hypothèse que les décalages dans les Configurations 2 et 3 étaient dus à ce décalage transversal de la Configuration 1 dans le test 14.

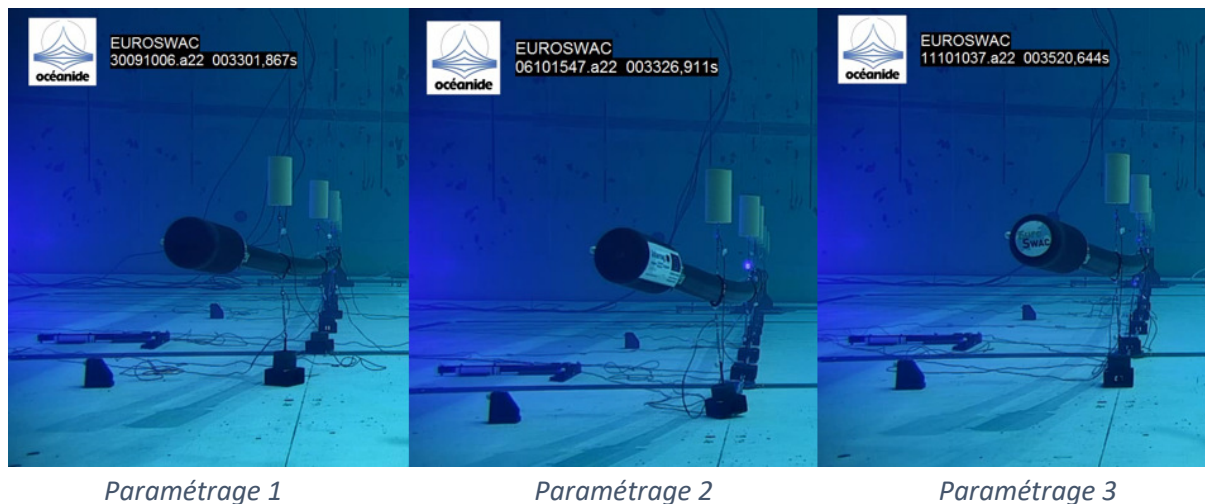


Photo 3-6: Décalage transversal initial à l'extrémité libre du tuyau, lors des essais de rigidité en flexion (14-16).

En regardant la vue de profil de chaque configuration d'ancrage lors des tests EI, la troisième configuration a la position la plus rectiligne. Cependant, les EI n'ont pas été calibrés sur le test de profil d'élévation de la configuration 3 parce que les configurations avec l'ancrage composé de chaîne étaient censées être problématiques dans le sens où l'Orcaflex n'a pas «l'historique» des mouvements de la chaîne en raison de l'immersion du fond marin (frottement axial inconnu).

De plus, il a été noté que le profil d'élévation de la Configuration 2 obtenu à partir du modèle numérique présente un décalage allant de 0,37 m à 0,61 m le long de la conduite flexible entre les longueurs d'arc de 80 m à 150 m (Figure 3-12). Les enregistrements vidéo montrent en effet un soulèvement des TC dans l'essai du bassin, ainsi qu'une légère inclinaison qui conduisent à des élingues légèrement inclinées. De même, le modèle numérique reproduit le soulèvement et la position inclinée mais surestime le soulèvement. Il a été revérifié que le modèle numérique avec la masse initiale par unité de longueur de 0,270 t/m ne produisait pas le même profil d'élévation que le test 15. Cependant, le changement de valeur n'a pas été jugé suffisamment sensible pour couvrir la divergence du profil d'élévation. L'hypothèse la plus plausible serait liée au commentaire précédent. Compte tenu de la position de départ exacte de la chaîne inconnue lors de ce test spécifique par le logiciel Orcaflex; la valeur du levage et de l'inclinaison du CW, et à son tour celles des élingues, pourraient différer principalement en raison de l'estimation du frottement axial, et donc, provoquer cette divergence.

- Option 2 : Calibration itératif de l'IE basé sur les **tests d'extinction 6, 7, 8 et 9**.

Les tests 6, 7, 8 et 9 sont les tests d'extinction réalisés sur la Configuration 1 aux pressions respectives suivantes : 5, 10, 25 et 40 bar. Malgré l'excitation supposée verticale du système de conduite flexible pendant les tests d'extinction, il a été constaté que les excitations de faible amplitude étaient également générées dans la direction x (Figure 3-14). De plus, lorsque l'on regarde la réponse en fréquence de ces tests d'extinction, un signal à double crête est visible. Les oscillations dans la direction x sont responsables de ce deuxième pic de fréquence. De plus, il est évident que la contribution énergétique de la réponse en fréquence est significativement plus grande dans la direction x.

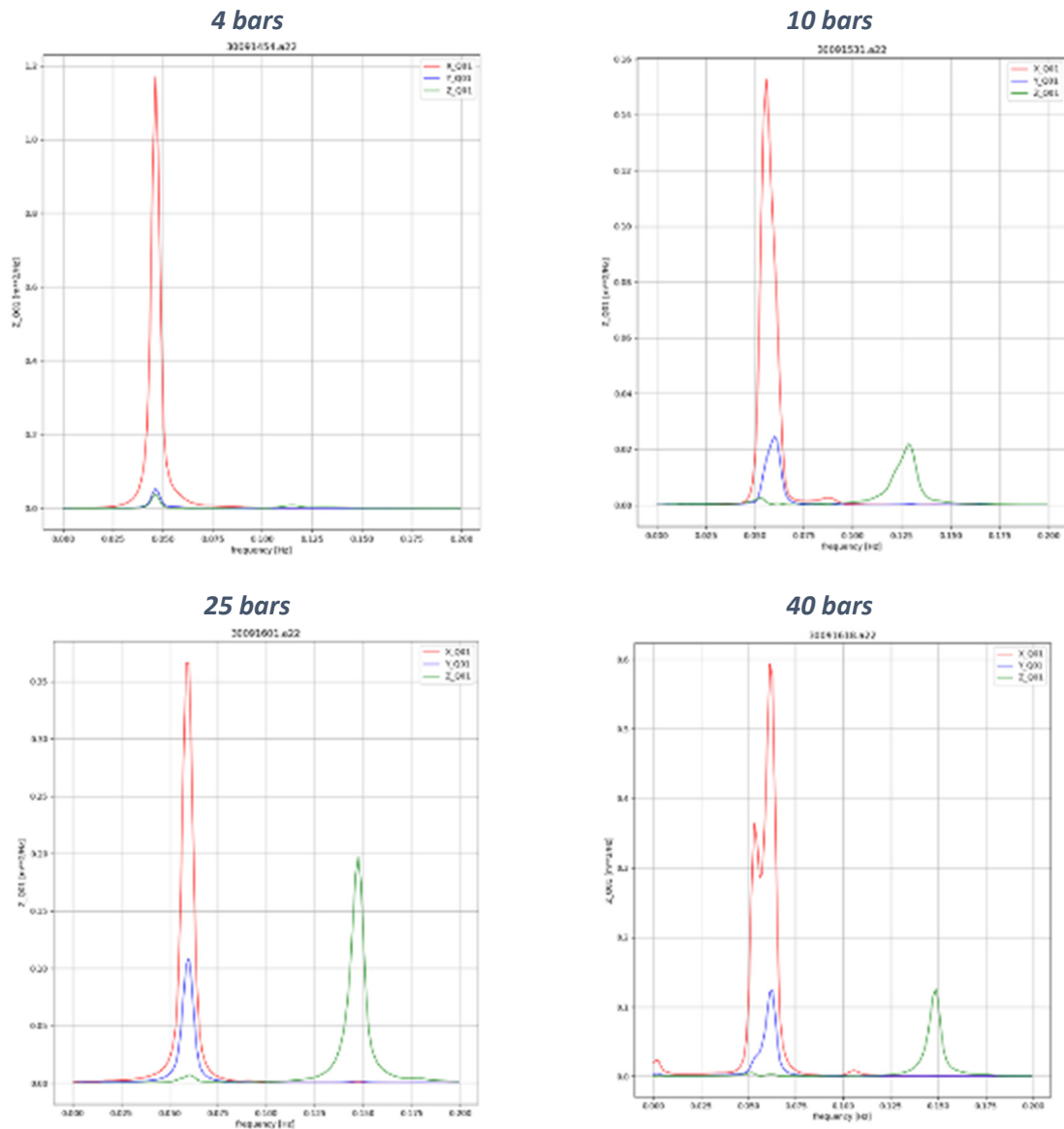


Figure 3-14: Réponses en fréquence dans les directions x, y et z du test d'extinction du système de conduite flexible, pour les quatre P_i considérés.

Il a été supposé que le test d'extinction dans la direction z ne pouvait pas être effectué correctement compte tenu de la présence des élingues empêchant un retour libre à la position d'équilibre.

La seconde méthode de calage EI était donc basée sur les modes propres dans la direction x. L'idée est que la période propre T_n est directement dictée par la conduite flexible EI dans la direction x. Cette deuxième méthode de calibration de l'EI a également été testée pour valider l'EI précédemment calibré. Le Tableau 3-7 rapporte les $T_n X$ qui ont été rapportés dans le bassin lors du test d'extinction de la Configuration 1, et les EI obtenus en calibrant le modèle numérique pour obtenir le même $T_n X$ pour les quatre différents P_i testés.

Test d'extinction du bassin		Tests d'extinction numérique (6-9)		Test d'IE numérique (14)	
Pi	Tn X exp	Tn X num	AE (Tn X)	Pi	EI (Z)
[kPa]	[s]	[s]	[kN.m2]	[kPa]	[kN.m2]
422	21.73	21.728	31100	447	31000
960	17.88	17.88	47060	1030	36000
2443	17.06	17.06	51900	2454	52000
3921	16.27	16.27	57380	4080	87000

Tableau 3-7: Comparaison de l'EI calibré à partir de la méthode du profil d'élévation à l'EI obtenu à partir des X-modes naturels.

En comparant les valeurs EI obtenues à partir des deux méthodes de calibration pour approximativement le même Pi, on constate que si les EI pour les Pi de 4 et 25 bar sont quasiment identiques, ce n'est pas le cas pour le test réalisé pour les deux autres Pi . Cela pourrait s'expliquer par la réponse à double pic dans la direction x pour les deux tests problématiques (Pi de 10 et 40 bar). En effet, malgré la très faible amplitude, on peut voir sur la Figure 3-14 qu'un deuxième mode dans la direction x est présent autour respectivement de 0,085 Hz (10 bar) et 0,11 Hz (40 bar).

3.3.3. Coefficients de frottement sur le fond marin des composants d'ancrage

Des essais de caractérisation du frottement du fond marin ont été menés pour déterminer les coefficients de frottement entre le fond marin et les différents éléments d'ancrage.

Les essais 17 et 17b ont consisté à tirer un CW1-7 de Configuration 1 avec un système de poulies, horizontalement par rapport au fond marin (Image 3-7a). La tension de traction a été enregistrée, ce qui a permis de déterminer le coefficient de frottement d'un CW 1-7 en considérant la tension maximale pour chaque événement de traction « stop-and-go ».

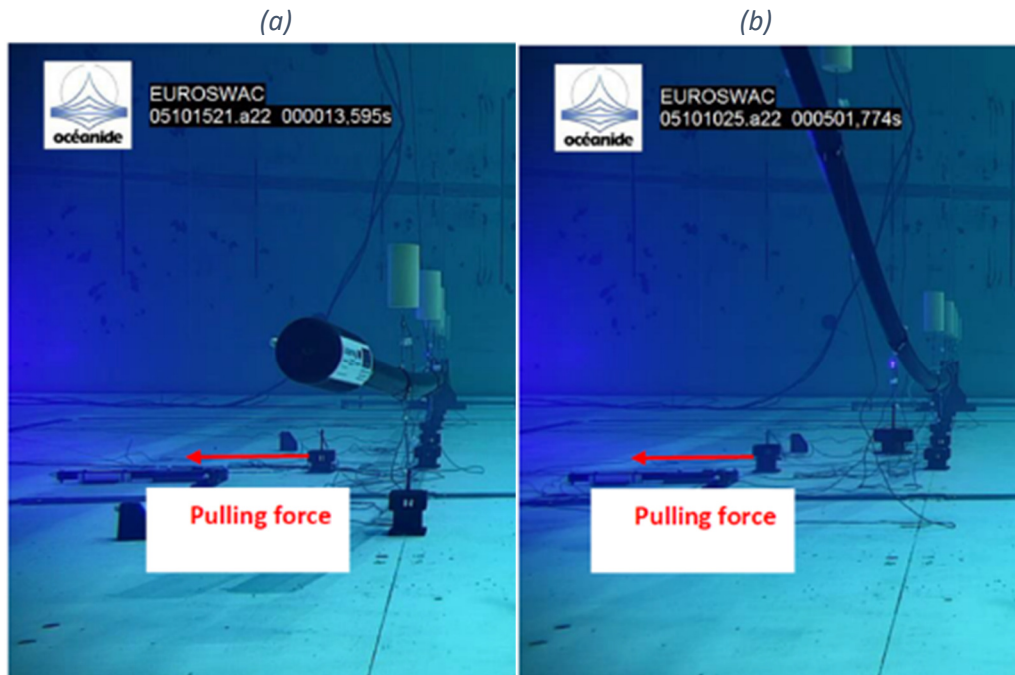


Image 3-7: Test 17 et 17c – Caractérisation du frottement du fond marin de (a) CW1-7 (gauche) et (b) CW8. Notez que les CW sont complètement détachés du système de tuyau flexible visible sur le côté droit des deux images.

Étant donné qu'Orcaflex ne fait pas la différence entre le coefficient de frottement statique et le coefficient de frottement dynamique, il a été choisi d'utiliser le coefficient de frottement statique pour obtenir une bonne estimation de la force nécessaire pour mettre l'objet en mouvement, même si cela signifie que les mouvements seront sous-estimés dans les simulations, étant donné que le coefficient de frottement dynamique est inférieur à celui statique.

Le coefficient de frottement statique a été estimé avec la formule suivante, en tenant compte de la masse dans l'eau et de la force statique F_s nécessaires pour mettre l'objet en mouvement:

$$\mu_s = \frac{F_s}{m_{water} * g}$$

Le coefficient de frottement statique a été calculé pour chaque pic de tension et la valeur moyenne a été prise en compte dans le modèle numérique. **L'essai 17c** a permis de calculer le coefficient de frottement statique pour CW8 de la Configuration 1 (Image 3-7b). Notez que les coefficients de frottement obtenus pour le CW de la configuration 1 ont également été utilisés pour le CW numérique des deux autres configurations, étant donné que le même support CW est utilisé pour tous les CW, et qu'à leur tour, la zone de contact et le matériau sont les mêmes.

	Essai 17		Essai 17b		Essai 17c	
	Fstat [kN]	μ_s [-]	Fstat [kN]	μ_s [-]	Fstat [kN]	μ_s [-]
Pic 1	58,56	0,63	61,83	0,67	63,12	0,40
Pic 2	50,96	0,55	51,22	0,55	62,54	0,40
Pic 3	46,78	0,51	49,23	0,53	72,52	0,46
Pic 4	-	-	-	-	71,36	0,45
Pic 5	-	-	-	-	79,47	0,51

Tableau 3-8: Rapport des forces statiques et des coefficients de frottement statique dérivés des essais expérimentaux de frottement sur le fond marin CW.

Théoriquement, les coefficients de frottement statique devaient être identiques compte tenu de l'objet commun du support CW pour chaque CW. L'ordre de grandeur du coefficient de frottement pour le CW s'est avéré être de 0.50, en faisant la moyenne de toutes les estimations. A partir de Tableau 3-8, les CW sont mis en mouvement pour une tension de traction allant de 47 à 79kN .

Essais 18 et 20 enregistrent respectivement la tension de traction et le déplacement transversal de CW4 jusqu'au déplacement des deux CW voisines ; et la tension de traction et le déplacement axial de CW8 relié à l'ensemble de la chaîne (Image 3-8). Ces deux tests ont été conçus pour dériver les coefficients latéral et axial du fond marin de la chaîne de la configuration 2.

Les tests 19 et 21 conduisent aux mêmes dérivations pour la chaîne de la Configuration 3.

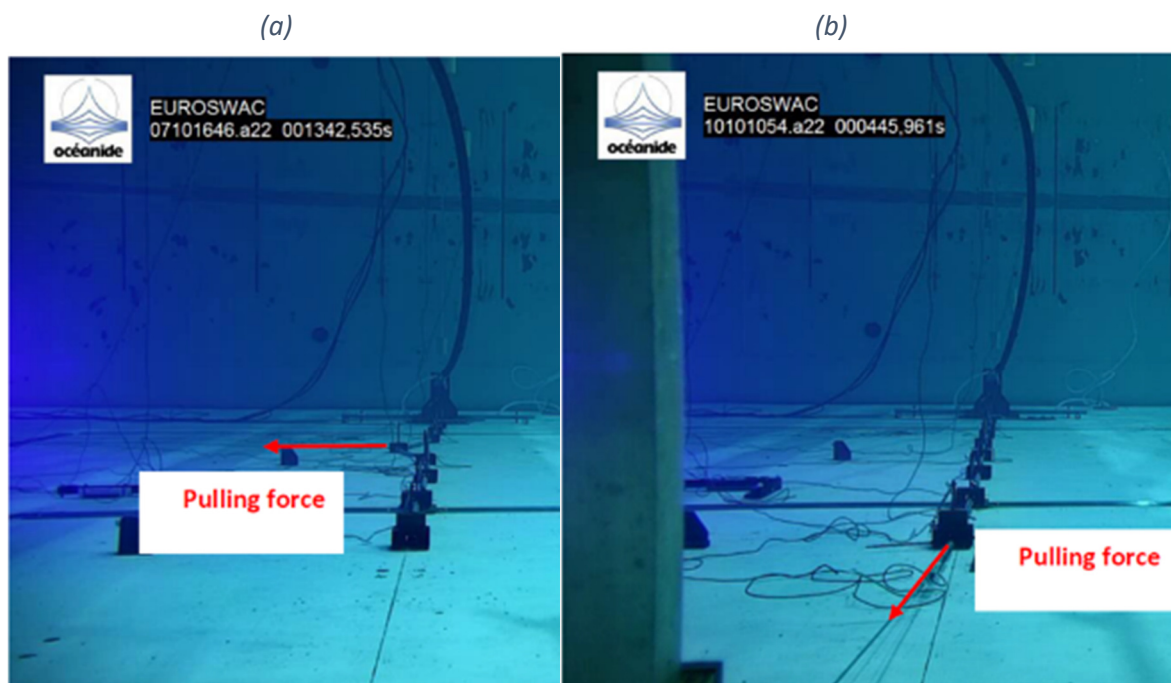


Image 3-8: (a) Test 18 – Caractérisation du frottement transversal du fond marin de la chaîne de configuration 2, et (b) du frottement latéral du fond marin de la configuration 2.

La méthodologie Orcaflex suivante a été utilisée pour calibrer les coefficients de frottement axial (c'est-à-dire "en ligne") et latéral (c'est-à-dire "transversal") des chaînes :

- Le système de poulies a été reproduit avec un treuil objet Orcaflex avec un "taux de déboursement spécifique" de $-0,1$ m/s. Le taux de déboursement est négatif, compte tenu de la longueur du fil du treuil à tirer.
- La raideur axiale du câble de treuil et l'emplacement des poulies ont été respectés pour chaque essai de frottement (précisé dans la réf. 5).
- Essais en ligne : Le coefficient de frottement axial a été calibré de manière itérative pour obtenir le pic de tension souhaité, une fois stabilisé afin de s'affranchir des effets dynamiques du taux de dévidage du fil du treuil (Figure 3-15). A noter que la calibration est effectuée sur la tension de traction plutôt que sur le déplacement en y, étant donné que dans les essais expérimentaux, le dévidage du fil du treuil était effectué de manière discontinue, alors que le fil du treuil était constamment tiré, dans la simulation (pas de déplacements ponctuels à calibrer). De plus, le pic de tension considéré a été estimé sur la base de la valeur moyenne de tous les pics de tension expérimentaux. Les deux coefficients de frottement axial sont rapportés à la section 3.2.4, dans Tableau 3-5.

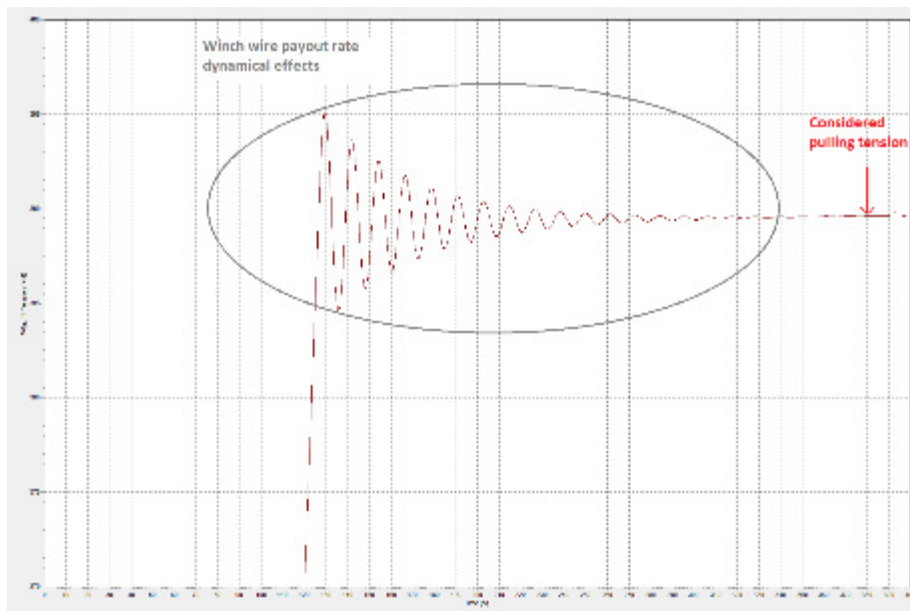


Figure 3-15: Tension du fil de treuil Orcaflex stabilisé de 389,50 kN pour un coefficient de frottement axial sur le fond marin de 0,48 (Configuration 2 - chaîne).

Essais transversaux : Dans une deuxième phase, la calibration du coefficient de frottement latéral a été réalisée de manière à obtenir le couple x-déplacement/tension souhaité, en fonction de la tension de traction enregistrée dans le bassin. La calibration du coefficient de frottement latéral était moins simple, étant donné que le coefficient de frottement transversal dépend de la portion de chaîne impliquée. En effet, plus le déport transversal est important, plus la longueur de chaîne tirée est importante, et donc plus la surface de contact en jeu est importante également (Figure 3-16). Par conséquent, cette calibration prend également en compte le déplacement x associé à la tension de traction cible. A noter que le déplacement a également été recoupé pour valider l'ordre de grandeur obtenu dans le modèle numérique. Pour le coefficient de frottement transversal, la calibration n'a pas été faite sur la valeur moyenne des 5 pics enregistrés, mais sur le premier uniquement. Les résultats obtenus sont répertoriés dans

- Tableau 3-9.

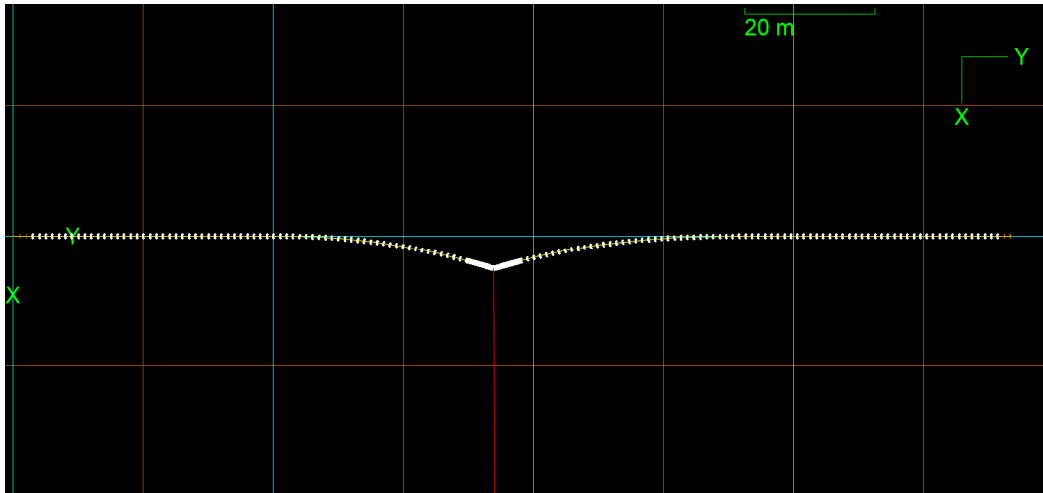


Figure 3-16: Reproduction numérique du test de caractérisation du coefficient de frottement transversal (chaîne Configuration 2).

		Tension	X_Q12	Y_Q12
		[kN]	[m]	[m]
Essai 20 - Pic 1	Expérimental	67,5	1,67	-0,018
	Numérique (Cf =0.38)	67,5	1,67	-0,093
Essai 20 - Pic 2	Expérimental	98,8	2,91	-0,026
	Numérique (Cf =0.38)	98,8	3.14	-0,3
Essai 21 - Pic 1	Expérimental	37,8	0,250	-0,003
	Numérique (Cf =0.44)	37,9	0,252	-0,010
Essai 21 - Pic 3	Expérimental	69,8	1.33	-0,010
	Numérique (Cf =0.44)	69,9	1.42	-0,07

Tableau 3-9: Comparaison des déplacements x et y obtenus pour les coefficients de frottement latéral sélectionnés dans le modèle numérique avec les données expérimentales associées (Configuration 2 : Test 20 et Configuration 3 : Test 21).

Comme indiqué, les coefficients de frottement latéraux ont été calibrés sur les déplacements x du premier pic. Lors de la mise au point sur le déplacement x d'un pic suivant (pic 2 ou pic 3), il est visible que les déplacements x ne correspondent pas. Cela est probablement dû à l'alignement inconnu des maillons de la chaîne qui n'était probablement pas rectiligne lors du premier événement de traction. La tendance d'évolution par rapport à la tension de traction est cependant respectée. De plus, lorsque l'on considère les déplacements en y, les mêmes remarques peuvent être faites.



3.4. Etude comparative entre les données expérimentales et numériques

3.4.1. Étude préliminaire

Les tests suivants sont effectués avec des vagues régulières pour évaluer principalement l'ordre de grandeur des sorties mesurées. Pour une houle d'incidence de 0°, une attention particulière aux phénomènes potentiels d'amplification du mouvement de la conduite à l'extrémité libre, pouvant entraîner un effet dit de «coup de fouet», a été prise.

De plus, les tests ont été répétés avec une Pi de 40bar environ, pour valider la calibration de l'EA et de l'EI. Ce lot de tests est réalisé uniquement sur la Configuration 3, pour des incidences de vagues de 90° et 0°.

- Coup de fouet 90° (REG1 RE1+courant REG2 REG3)
 - Config 3 à Pi=10bar : **essais 75-78**
 - Config 3 à Pi=40bar : **essais 79-82**

- Coup de fouet 0° (REG1 REG2 REG3 RE3+courant)
 - Config 3 à Pi=10bar : **essais 67-70**
 - Config 3 à Pi=40bar : **essais 71-74**

Au cours de la campagne expérimentale, des événements/phénomènes inattendus et non pris en compte se sont produits qui ne sont pas rapportés dans le modèle numérique mais exposés et discutés dans la section 3.4.1.1 pour comprendre la raison d'un certain décalage entre les résultats numériques et les données expérimentales.

Le comportement général du système de conduite flexible dans le bassin est ensuite brièvement décrit dans la section 3.4.1.2 et comparé aux résultats numériques, pour chaque condition de mer. Certaines comparaisons spécifiques sont également fournies sur le déplacement CW, le déplacement de la conduite et la tension de l'élingue (valeurs statiques et évolution temporelle). Ces comparaisons sont soit fournies à titre illustratif, soit pour rechercher une éventuelle divergence entre les données expérimentales et les résultats numériques obtenus avec le modèle Orcaflex.

3.4.1.1. Obstacles expérimentaux

3.4.1.1.1. Décalage transversal du système de conduite flexible vers l'extrémité libre

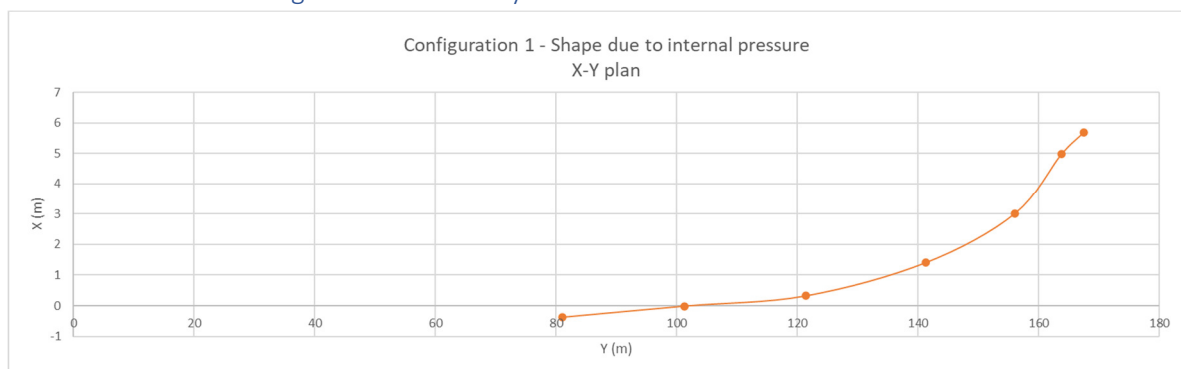


Figure 3-17: Vue en plan du départ transversal initial de la conduite flexible pour l'essai 3 (test d'extinction sur la Configuration 1).

Tout d'abord, comme mentionné précédemment, le système de conduite flexible présentait un déport transversal (direction x) à l'extrémité libre (Figure 3-17). Etant donné que le système de conduite flexible a été arbitrairement repositionné en position rectiligne lors de la campagne expérimentale, ce décalage n'a jamais été exactement le même. En effet, cette déformation initiale était présente lors de la première campagne, et s'est accentuée du fait de l'état final sans tuyau.

La position de la conduite flexible étant conditionnée par la position CW, celle-ci présentait également des différences inexplicables, puisque le système de conduite flexible initial n'était pas modifié dans le modèle numérique et restait rectiligne. Ce décalage en x mesuré lors des essais en bassin se traduit par une position de départ différente avec le modèle numérique où la conduite et les éléments d'ancrage étaient toujours placés rectilignement à chaque départ d'essai. Cela a conduit à quelques réponses différentes mineures du système de conduite flexible qui sont détaillées plus loin.

3.4.1.1.2. Irrégularité du fond du bassin sous CW8

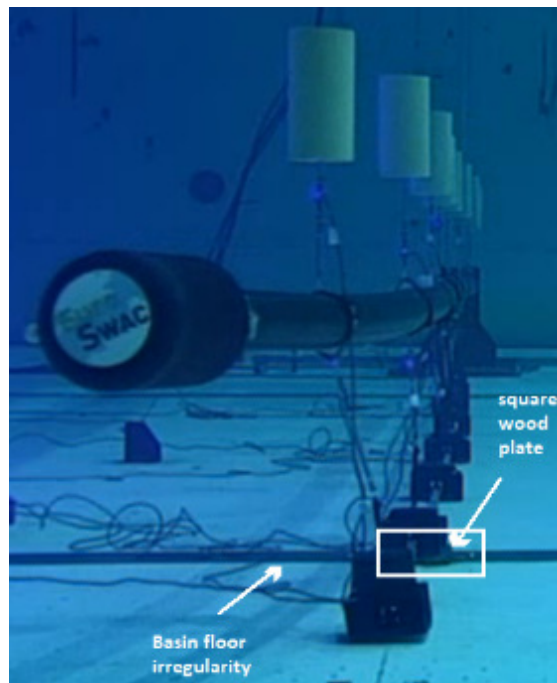


Photo 3-9: Ajout d'une plaque de bois carrée pour éviter la différence de coefficient de frottement du fond marin pour l'avant-dernier CW.

De plus, le CW7 dont le déplacement a été mesuré par Q11 s'est trouvé placé sur une irrégularité du fond du bassin. Pour remédier à ce problème, une petite plaque de bois carrée a été ajoutée sous le CW7 pour éviter une différence de coefficient de frottement sur le fond marin (Photo 3-9). Cependant, comme présenté dans la section 3.4.1.2, cette plaque de bois avait une certaine épaisseur qui a conduit à une réponse de mouvement transversal CW modifiée, en fonction de la hauteur de la vague incidente.

3.4.1.1.3. Poids ponctuels

On a également observé que le CW a adopté une position inclinée vers la direction x (Photo 3-10) ou vers la direction y qui est due respectivement au moment induit par le courant sur les supports CW, et au frottement axial de la chaîne. Cependant, dans le modèle numérique, les CW ont été modélisés avec des bouées 3D. La position inclinée du CW ne peut donc pas être reproduite avec le modèle numérique actuel.

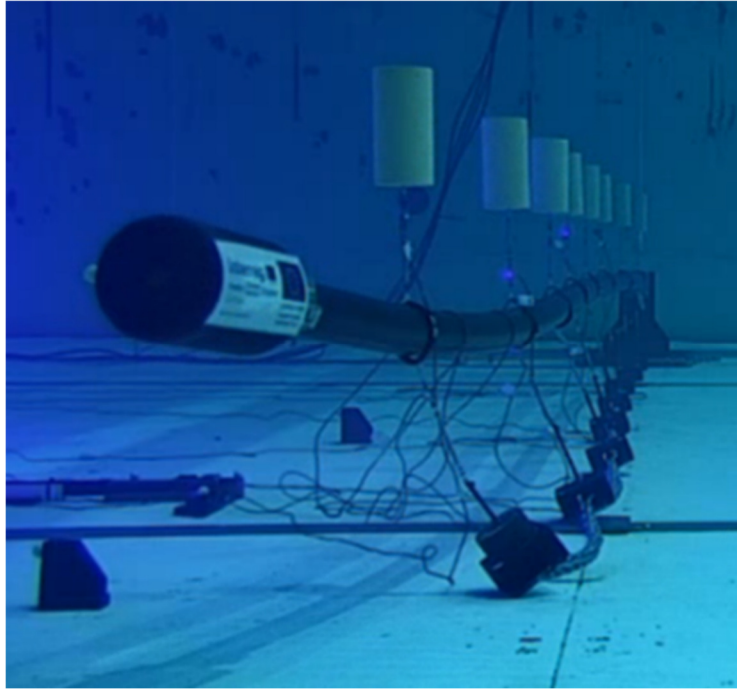


Photo 3-10: CW oblique sous l'action du courant induisant un moment sur le support CW.

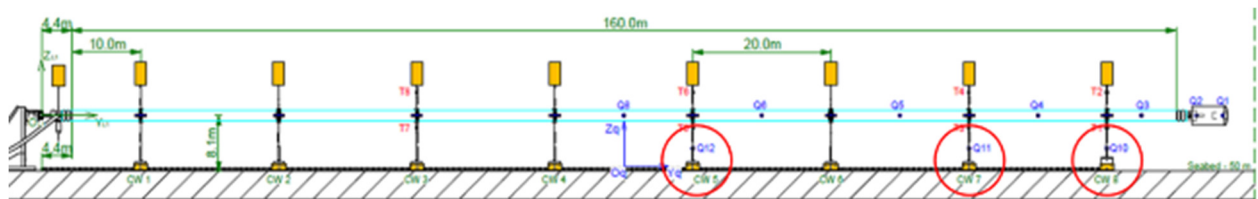
3.4.1.2. Comportement général du système de tuyaux flexibles

3.4.1.2.1. Poids des blocs X déplacements

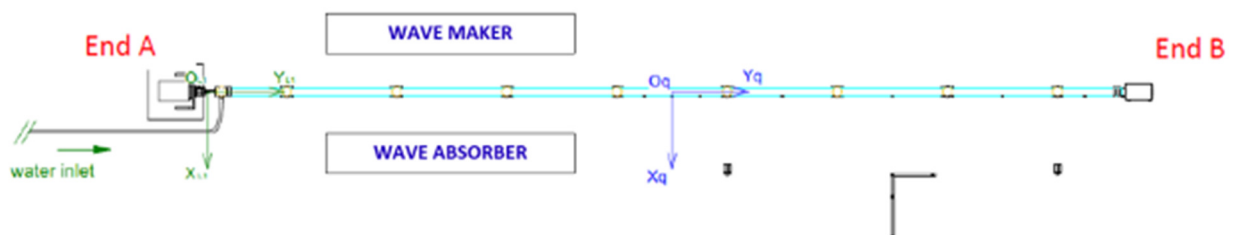
Montage expérimental

En se concentrant sur les essais à 90° des ondes régulières pour un P_i de 10bar (essais 75 - 77), les déplacements dans la direction x de trois CW, principalement situés à proximité de l'extrémité libre de la conduite, sont rapportés dans cette section.

L'emplacement des CW enregistrés est détaillé dans Croquis 3-1. CW5 est équipé de la cible Qualysis Q12, CW7 avec Q11 et CW8 avec Q10.



Croquis 3-1: Emplacement des cibles Qualysis sur les poids pour la Configuration 1.



Croquis 3-2: Vue de dessus du référentiel.

Comparaison expérimentale et numérique des signaux temporels pour les ondes régulières incidentes à 90°

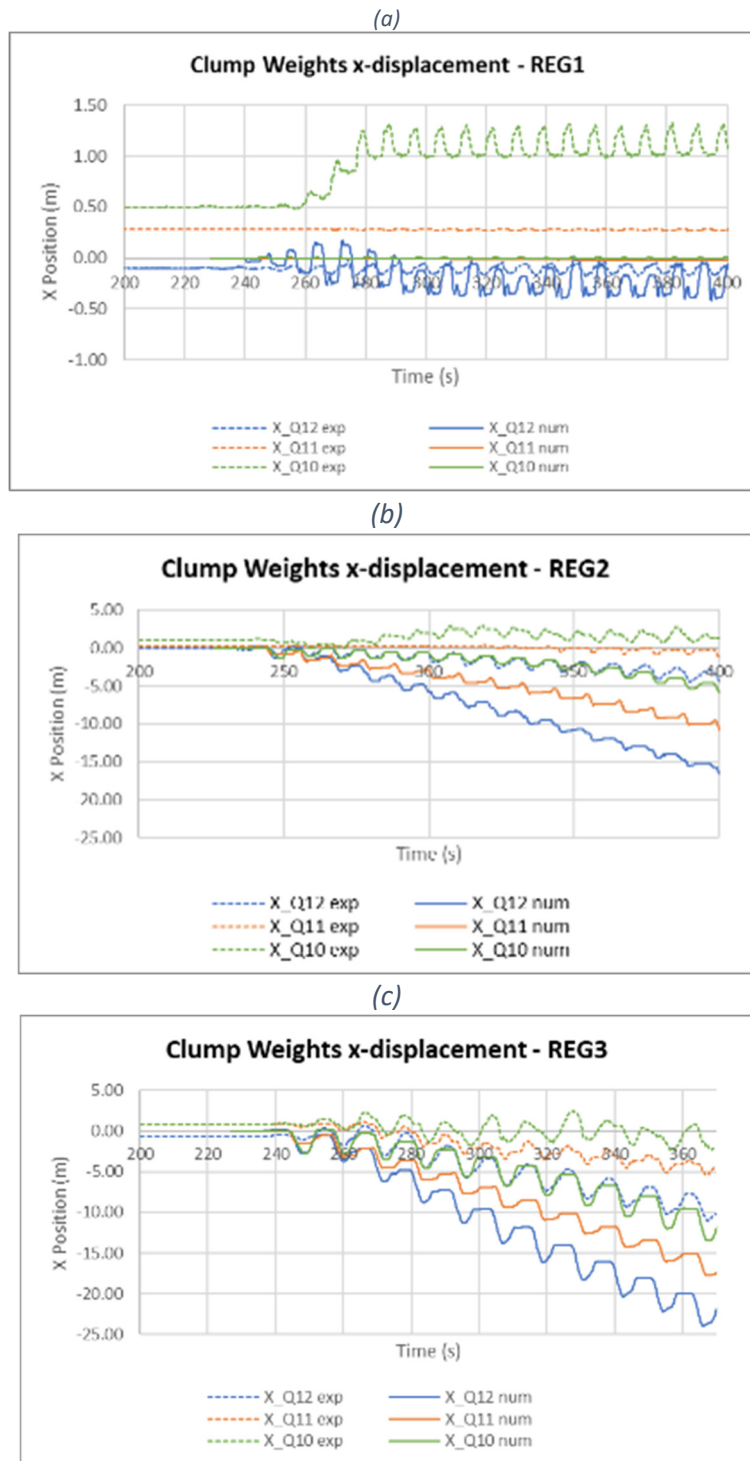


Figure 3-18: Etude comparative des décalages transversaux des poids de clumps expérimentaux et numériques pour (a) REG1, (b) REG2, (c) et REG3.

- Pour REG2 et REG3 en particulier, plus le centre du tuyau est proche, plus le décalage x vers le générateur d'ondes est grand (valeur négative). Cela signifie que le CW, et la conduite flexible à leur tour, adoptent une forme générale courbée.

- **REG 1 :**

- X_Q10 exp. se dirige vers l'absorbeur de vagues, tandis que X_Q11 exp. stagne et X_Q12 exp. évolue en sens inverse, vers le générateur de vagues
- X_Q10 num. maintient une valeur nulle (contrairement à son analogue), X_Q11 num. augmente très légèrement (tendance opposée à celle de l'exp. analogique), et X_Q12 num. se déplace légèrement vers le générateur de vagues.
- Après investigation, on a constaté que les CW se déplacent pendant la phase ascendante du mouvement orbital des particules d'eau, permettant un soulèvement des CW près de l'extrémité libre du tuyau, et donc une suppression des forces de frottement. Cependant, l'épaisseur de la plaque de bois carrée empêchait le CW7 (Q11) d'être soulevé suffisamment haut. Cela a bloqué CW7 dans sa position initiale et a restreint le mouvement de CW5 vers l'absorbeur de vagues en raison de la chaîne (Q12).
- La différence entre les valeurs X_Q10 s'explique très probablement par le fait que seul un soulèvement partiel du CW est apparu sous le petit REG1 (CW incliné uniquement), le modèle n'a pas pu reproduire la réduction de frottement due à la modélisation du CW avec bouée 3D.

- **REG 2 :**

- La conduite flexible adopte une forme coudée sous l'action de la houle régulière (Photo 3-11). Les deux CW placés à l'extrémité de la conduite restent sur l'axe rectiligne de la position de départ, tandis que les autres CW évoluent vers le générateur de vagues pour permettre la position courbe de la conduite flexible.
- Cette position de courbure de la conduite flexible est possible grâce à la hauteur de vague plus élevée de REG2, qui génère une portance CW suffisamment élevée pour déplacer CW7 (initialement bloqué à cause de la place du bois carré).

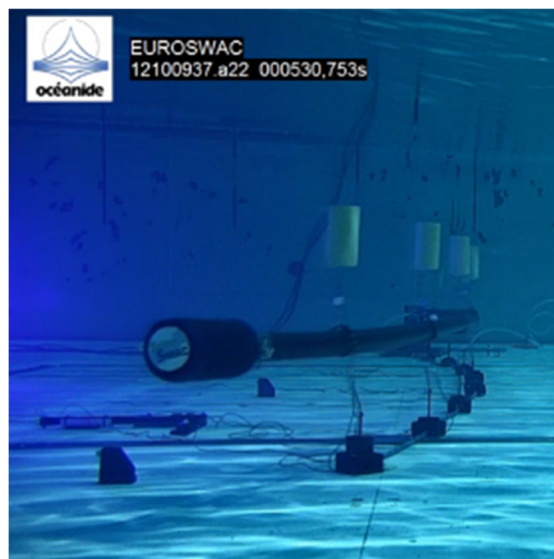


Photo 3-11: Vue transversale du système de conduite flexible Configuration3 avec la forme d'extrémité b visible du système de conduite flexible sous l'action d'un cap à 90 ° REG2 (essai 76).

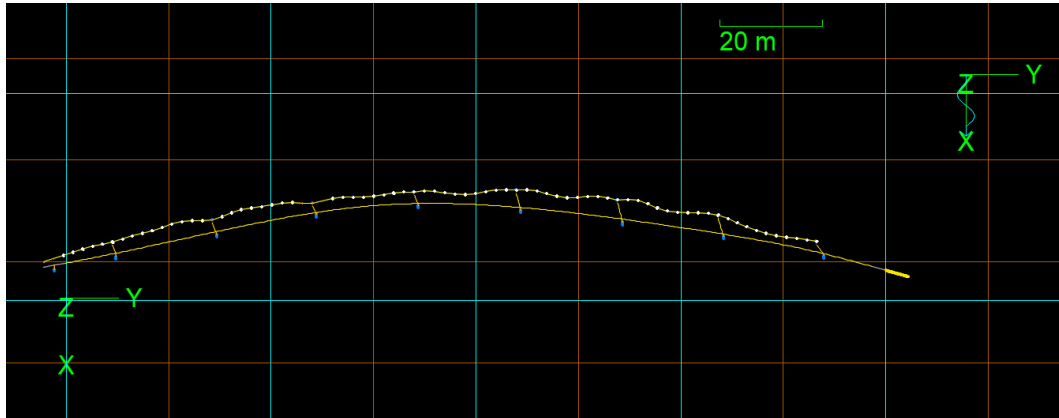


Figure 3-19: Vue en plan de la reproduction numérique de la Configuration 3 sous un incident à 90° REG2 t = 350s (test 76).

- Le modèle numérique donne cependant des déplacements CW plus importants, car après avoir adopté une position courbe, les CW sont davantage poussés en conservant leur forme courbée. Cela peut s'expliquer en partie par la gêne causée par la plaque de bois carrée, qui retarde le décalage x dans les essais en bassin.
- **REG 3 :**
 - Le dispositif expérimental et le modèle numérique adoptent tous deux une forme incurvée qui est maintenue pour être poussée vers le générateur de vagues.
 - Les tendances de déplacement CW sont maintenant respectées pour tous les CW, malgré le modèle numérique produisant des déplacements x plus importants. Afin d'étudier cette divergence, une étude de sensibilité succincte sur les coefficients hydrodynamiques des conduite flexible est menée ci-après.

Le déplacement en x plutôt contre-intuitif du CW vers le générateur de houle (négatif), plutôt que vers l'absorbeur de houle, était lié à la phase d'onde qui amène le tuyau à se trouver en position basse du mouvement orbital causé par la vague, quand elle est positionné vers l'absorbeur de vagues. Ainsi, les CW sont en contact avec le fond marin et le frottement empêche le mouvement transversal dans cette direction.

Inversement, lorsque le tuyau penche dans son mouvement circulaire vers le générateur de vagues, il se trouve qu'il est positionné vers le haut dans le mouvement circulaire et donc les CW sont soulevés vers le haut, et ils ne sont plus en contact avec le fond marin (pas de frottement) ce qui permet le mouvement transversal de la conduite flexible vers le générateur de vagues.

Étude de sensibilité aux coefficients hydrodynamiques

Etant donné que le système de conduite flexible de la deuxième campagne est autorisé à se déplacer latéralement, il est judicieux d'affiner les coefficients hydrodynamiques appliqués de la conduite flexible spécifiquement pour chaque condition de mer étudiée. La section précédente présente le déplacement CW sous REG3, dont les principaux paramètres d'onde sont rapportés dans le tableau 6 de Réf. 3 à l'échelle du modèle (étant donné que la similitude de Froude a été utilisée).

Selon les graphiques de Sarpkaya (Réf. 3, Figure 14 et 15), les coefficients hydrodynamiques pour cet essai spécifique sous REG3 sont les suivants :

$$C_D \approx 1.7 \text{ et } C_m \approx 0$$

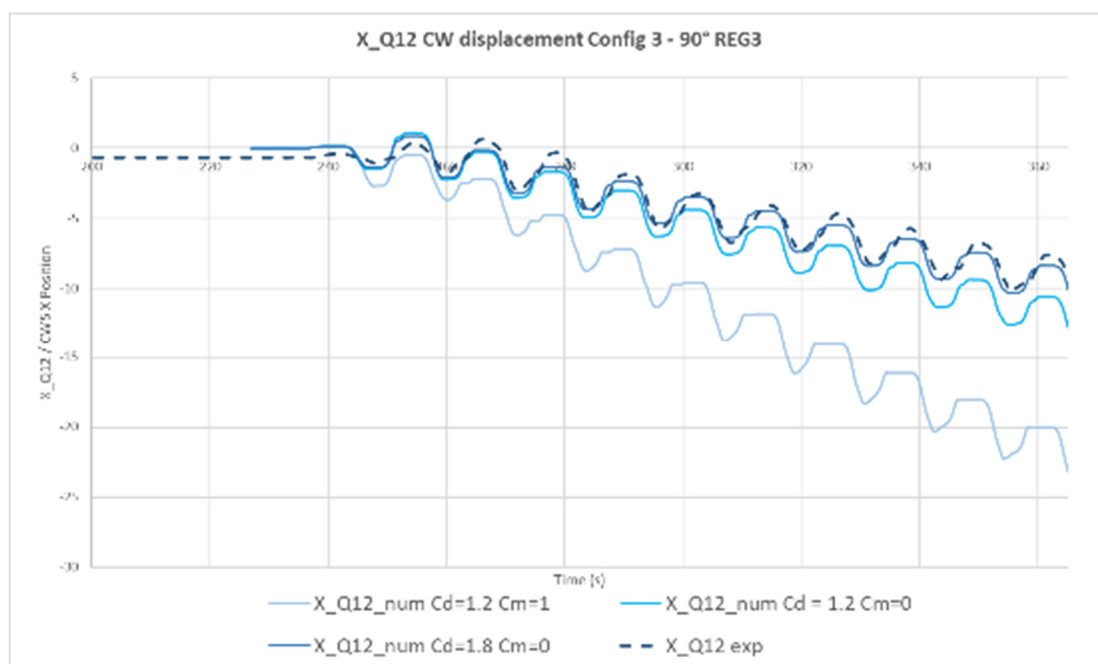


Figure 3-20: Etude comparative du déplacement transversal CW5 expérimental et numérique, mesuré par Q12 pour un incident REG3 à 90°. Les signaux horaires numériques sont répétés pour le même CW5 mais avec des valeurs de coefficient hydrodynamique variables.

Figure 3-20 illustre clairement que :

- Les valeurs raffinées des coefficients hydrodynamiques des conduite flexible pour REG3 conduisent à un mouvement transversal CW du même ordre de grandeur que celui expérimental.
- Le coefficient de masse ajouté semble avoir un impact plus important que le coefficient de traînée.

La conduite flexible étant désormais autorisée à se déplacer dans le plan transversal, les coefficients hydrodynamiques doivent être ajustés pour chaque condition de mer.

Observations comparatives sur la réponse expérimentale et numérique sous ondes régulières incidentes à 0°

En ce qui concerne les tests de cap de vague à 0°, les observations suivantes sont faites :

- Aucun mouvement transversal CW n'a été prédit par le modèle numérique, tandis que les tests ont enregistré des oscillations mineures autour de la position initiale.

- Le soulèvement vertical du CW est présent à la fois dans les données expérimentales et numériques.
- On peut observer que l'amplitude du mouvement vertical de la CW, est souvent légèrement surestimée par le modèle numérique, et rarement l'inverse.

3.4.1.2.2. Déplacements en X des tuyaux flexibles

Pour évaluer le mouvement de la conduite flexible dans la direction x et pour comparer le comportement observé avec le modèle numérique, la position de la conduite flexible à 100 s de la longueur médiane de la conduite à la crépine est tracée à la Figure 3-21, pour chaque essai, avec Figure 3-21 un P_i nominal de 10 bar. Un test supplémentaire avec REG2, mais avec un P_i de 40 bar est également inclus.

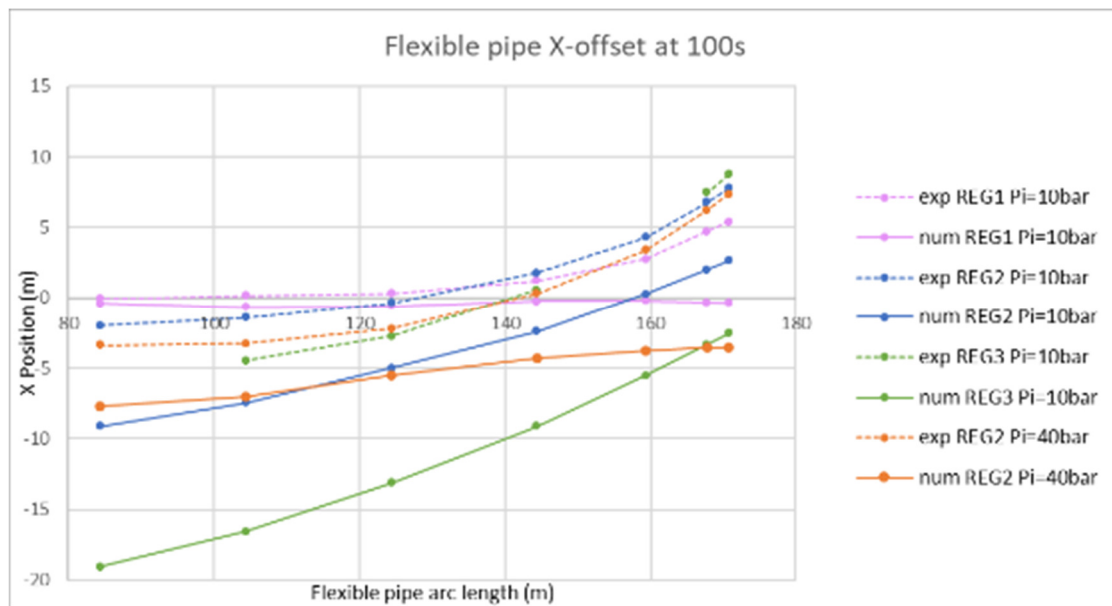


Figure 3-21: déplacements en x le long de la seconde moitié de la longueur de la conduite flexible en fonction de l'onde régulière entrante et de la pression interne à $t=100s$.

- La déformation de la forme de la conduite flexible à l'extrémité libre de la conduite vers l'absorbeur de houle (valeur X positive) est clairement visible sur les graphiques expérimentaux (lignes pointillées).
- Plus la hauteur des vagues est élevée, plus le décalage en x est élevé. Cette tendance vaut tant pour les résultats expérimentaux que numériques.
- Sous des vagues régulières, la forme courbée mentionnée précédemment se forme avant d'être poussée (par une vague suffisamment puissante), ce qui augmente le décalage en x.
- Alors que la forme entre les essais du bassin avec un P_i de 10bar et celui avec 40bar donne la même déformation de la conduite flexible sous l'action de REG2, cependant le graphe du modèle numérique montre une différence de forme. Le modèle numérique avec un P_i de 40 bar produit une déformation moins courbée du tuyau flexible.
- En accord avec les observations faites dans la section 3.4.1.2.1, le modèle numérique surestime le mouvement transversal de la conduite. La spécification des coefficients hydrodynamiques de la

conduite flexible pour un état de mer donné corrige cette surestimation, comme illustré sur Figure 3-22 pour REG3.

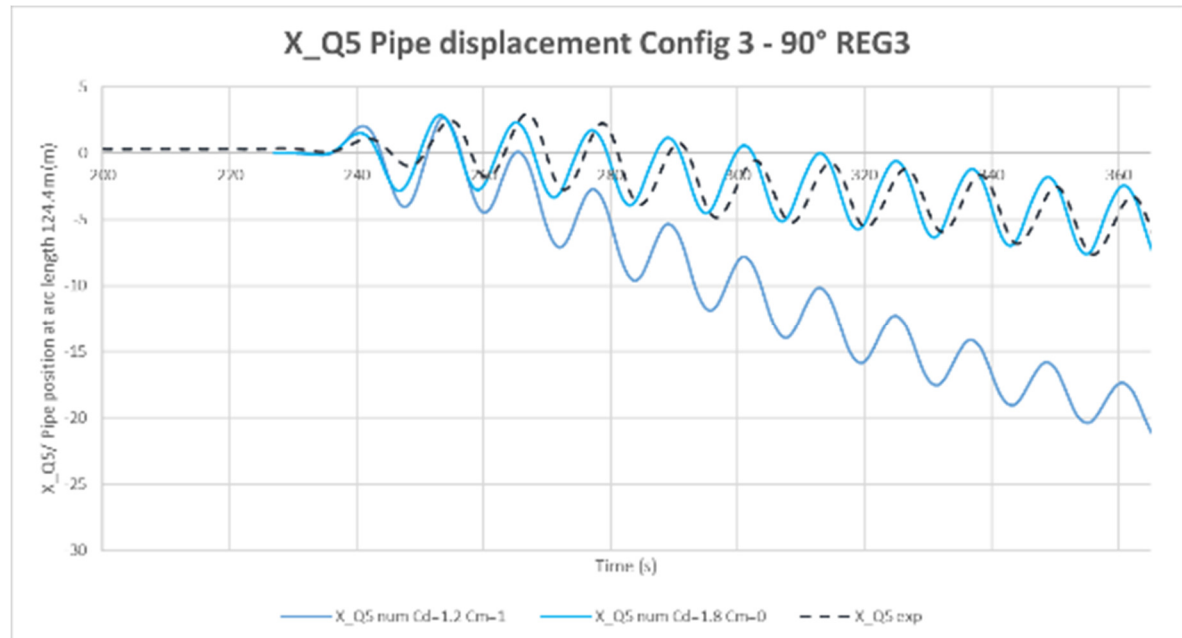


Figure 3-22: Etude comparative du déplacement transversal expérimental et numérique de la conduite flexible à la longueur d'arc 124,392m, mesuré par Q5 pour un incident REG3 à 90°. Les signaux temporels numériques sont répétés pour le même emplacement de conduite mais avec des valeurs de coefficient hydrodynamique variables.

La Figure 3-23 montre le mouvement vertical du flexible au niveau de la crépine. REG3 avec une incidence de 0° a été choisie pour évaluer le mouvement d'amplification potentiel à l'extrémité libre du tuyau comme onde la plus "favorable" pour l'observation de "l'effet coup de fouet".

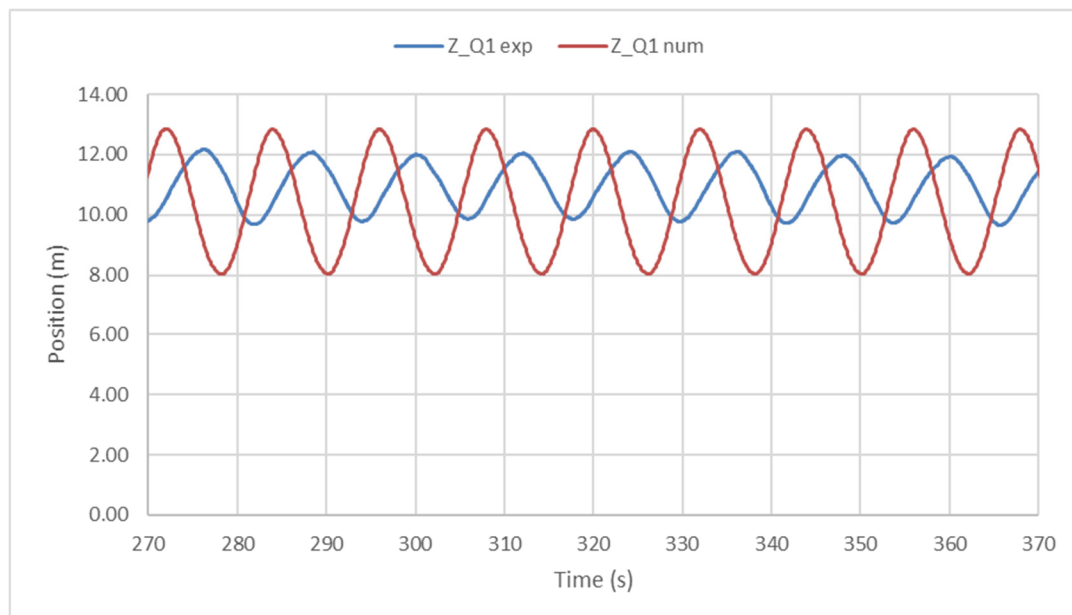


Figure 3-23: Évolution temporelle du mouvement vertical de la crépine expérimentale enregistré par Q1 et son analogue numérique (cap d'onde de 0° REG3).

- L'amplitude d'oscillation du mouvement vertical de la crépine est d'environ 1m pour le prototype expérimental et de 2,5m pour le modèle numérique. Encore une fois, le modèle numérique surestime légèrement.
- Aucune résonance du mouvement de la crépine ou ce que l'on appelle "l'effet coup de fouet" n'a été observé.

3.4.1.2.3. Tensions de l'élingue d'ancrage

Les tensions AS initiales sont analysées ci-après pour obtenir un ordre de grandeur des valeurs de tension statique dans l'AS enregistré.

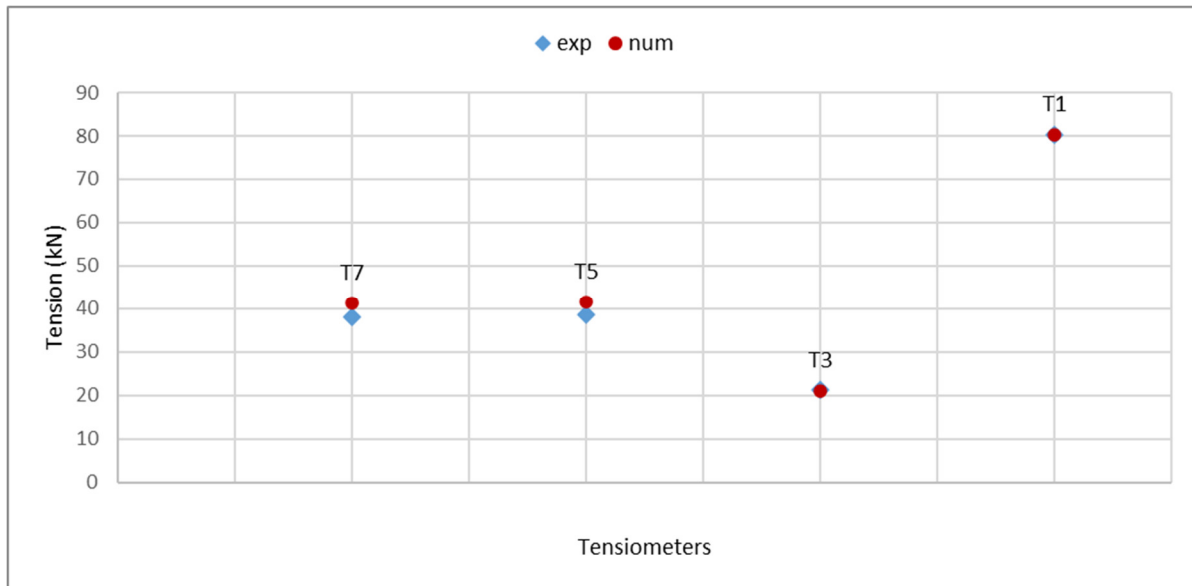


Figure 3-24: Tension statique dans les élingues d'ancrage.

- Globalement, la tension statique dans l'AS est de 40kN le long de la conduite flexible, tant pour les données expérimentales que pour les résultats numériques.
- T3 et T7 (situés à proximité de l'extrémité libre du tuyau) affichent respectivement une tension autour de 20kN et 80kN, toujours pour les données expérimentales et les résultats numériques. Cette tendance est causée par la flottabilité plus élevée de la crépine qui plie légèrement le tuyau flexible pour permettre à la crépine de se positionner au-dessus de la hauteur du tuyau flexible.
- La tension AS7, enregistrée par T3, est associée à des événements de relâchement / détente « slack ») en raison de sa valeur relativement faible.

Une étude comparative spécifique est présentée ci-après dans Figure 3-25, sous la forme d'un recoupement temporel du signal pour vérifier l'identification et la capacité prédictive du modèle numérique des événements d'étalement dans l'AS. Cette analogie s'est spécifiquement concentrée sur T3.

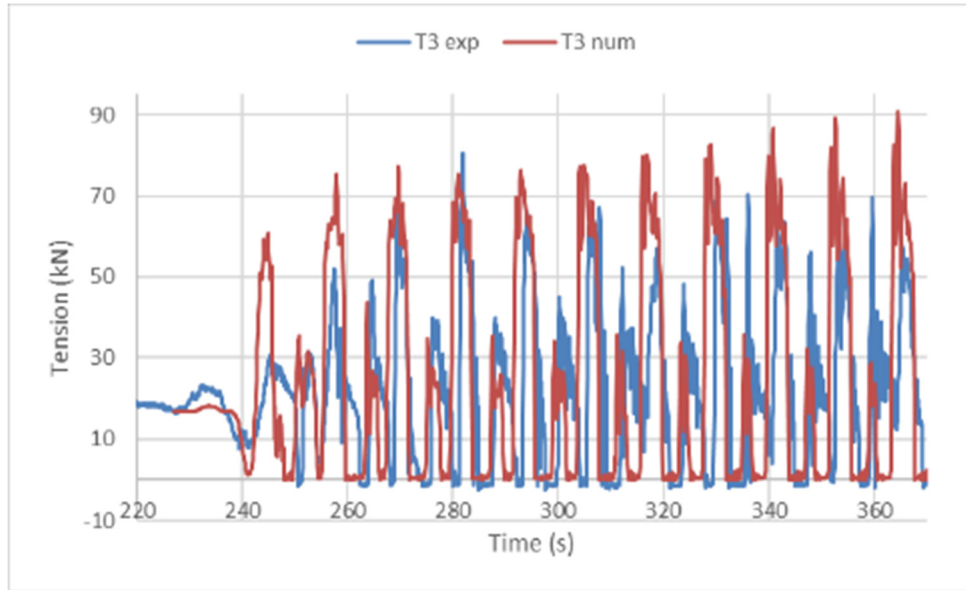


Figure 3-25: Évolution temporelle de la tension expérimentale de l'élingue d'ancrage 7 enregistrée par T3 et son analogue numérique.

- Les signaux expérimentaux et numériques identifient des événements de relâchement dans l'élingue d'ancrage 7 d'un modèle de signal très similaire.
- Le modèle numérique semble surestimer légèrement le pic de haute tension de l'événement de relâchement / détente (« slack »).
- Notez que même s'il n'est pas montré, le modèle numérique prédit parfois des événements de relâchement / détente (« slack ») dans d'autres AS même lorsque les tests expérimentaux n'en ont enregistré aucun, mais jamais l'inverse.

3.4.1.2.4. Tensions des sangles de flottabilité

De manière similaire à la comparaison de tension AS, la Figure 3-26 compare les tensions statiques BS et la Figure 3-27 présente une analogie de série chronologique pour évaluer la capacité prédictive du modèle de signal du modèle numérique concernant le signal de tension BS.

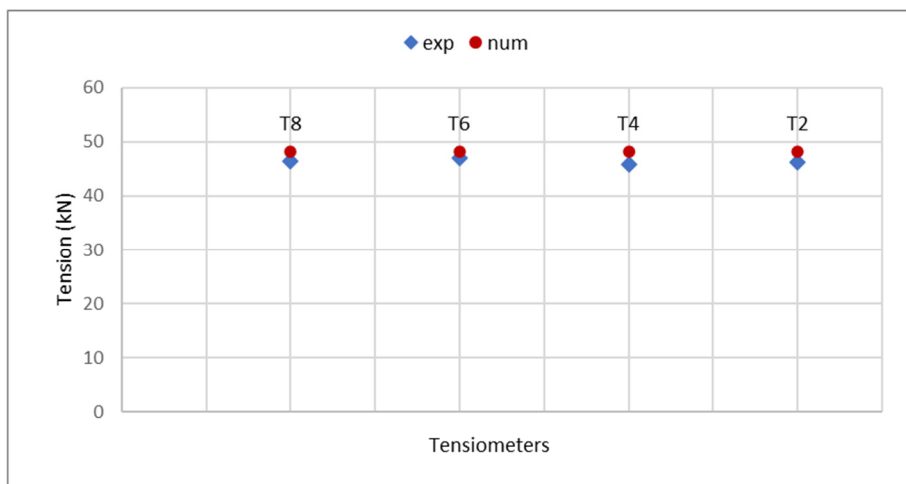


Figure 3-26: Tension statique dans les sangles de flottabilité.

- La tension BS statique est proche de la même pour chaque BS.

- La tension numérique BS est légèrement surestimée : 48kN. Alors que les tensions BS numériques sont comprises entre 46kN et 47kN.

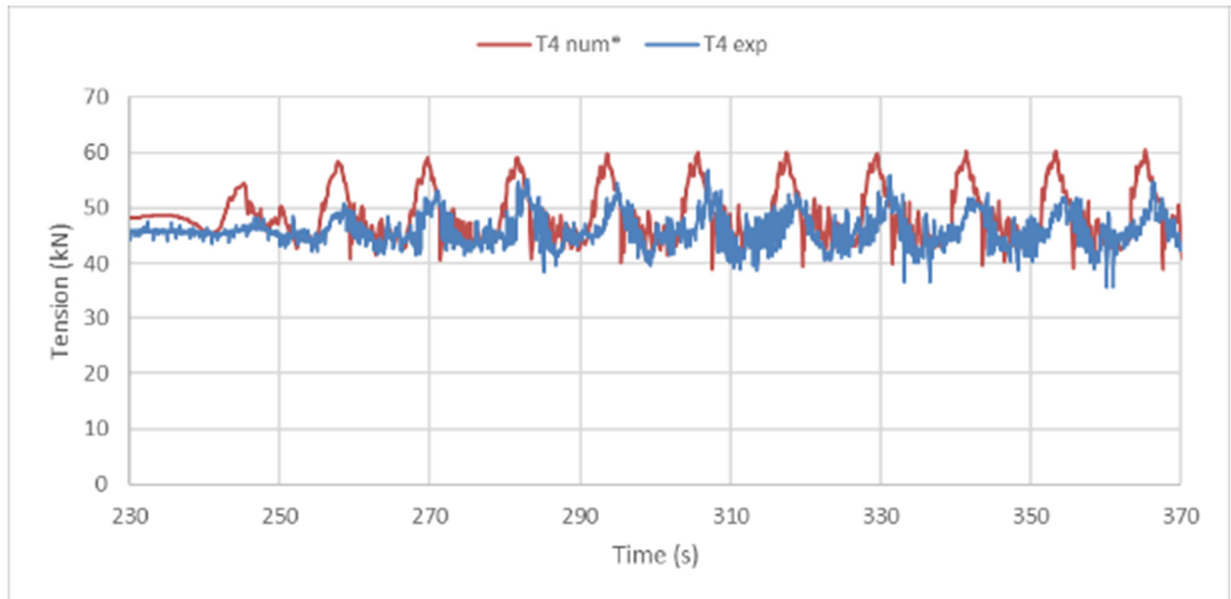


Figure 3-27: Évolution temporelle de la tension de l'élingue de flottabilité expérimentale 7 enregistrée par T4 et son analogue numérique.

- Encore une fois, le modèle du signal de tension est bien reproduit par le modèle numérique, à l'exception d'une légère surestimation de l'amplitude de tension.
- De même, le modèle a tendance à surestimer l'amplitude du signal, mais pas l'inverse.

3.4.2. Essais de stabilité des systèmes de canalisations flexibles

Pour tester davantage le modèle numérique, trois houles irrégulières différentes IRR1Y, IRR10Y et IRR100Y, avec ou sans courant ont été testées pour répondre à des conditions de mer plus réalistes. Les trois configurations d'ancrage ont été testées, à la fois pour un cap de vague de 90° et 0°. Cette section se concentre sur le cap de la mer de 90°. Notez que les houles irrégulières utilisées dans le modèle numérique ont été conçues après le spectre JONSWAP avec les valeurs Hs et Tp spécifiées. Un test a été reproduit à l'identique, en utilisant le signal d'historique temporel expérimental, filtré jusqu'à 2Hz.

- Stabilité du tuyau 90° (courant Irr1Y Irr10Y Irr100Y Irr100Y+courant)
 - Config 1 : **essais 22-26**
 - Config 2 : **essais 27-31**
 - Config 3 : **essais 32-36**
- Stabilité du tuyau 0° (courant Irr1Y Irr10Y Irr100Y Irr100Y+courant)
 - Config 1 : **essais 57-61**
 - Config 2 : **essais 47-51**
 - Config 3 : **essais 42-46**

3.4.2.1. CW/Chaîne X-Déplacements

Le décalage transversal de la CW pour chacune des 3 configurations d'ancrage est reporté dans le tableau suivant après 500s d'exposition à la condition de mer d'incidence de 90° considérée. Notez que le décalage x de départ CW des données expérimentales a été supprimé dans le tableau suivant à des fins de comparaison.

		Q12 exp	Q12 num	Q11 exp	Q11 num	Q10 exp	Q10 num
Actuel 90°	Config. 1	0,7	0.0	0,8	0.0	2.7	1.1
	Config. 2	2.1	0,7	2.1	0,6	2.8	3.0
	Config.3	1.0	0,3	1.3	0.0	2.6	0,5
IRR10Y 90°	Config.1	0,1	0.0	0.0	0.0	-0,1	-0,4
	Config.2	0.0	-0,3	0,2	0,1	-0,1	0,1
	Config.3	-0,7	-0,3	0.0	-0,7	1.2	-1.6

Tableau 3-10: Position transversale CW à CW5 (Q12), CW7 (Q11) et CW8 (Q10) après une exposition de 500s dans les conditions environnementales considérées (90°) pour les 3 configurations d'ancrage.

- Focus sur les données expérimentales :
 - Le courant crée un mouvement transversal important de la CW. Plus le tuyau est proche de l'extrémité libre, plus le décalage x CW est important.
 - La houle irrégulière ne produit aucun mouvement transversal significatif. En regardant l'évolution temporelle du signal de déplacement x CW10 (fournie ci-dessous), on constate que sous l'action d'une houle irrégulière uniquement, la conduite flexible oscille plus ou moins autour de sa position initiale.
 - Les valeurs de décalage transversal les plus significatives pour la configuration 3 (IRR10Y) sont trompeuses car CW7 était bloqué en raison de l'élévation de la plaque de bois carrée empêchant un soulèvement de CW7, entraînant une perturbation du mouvement transversal de CW. En effet, les tests réalisés pour la configuration 1 n'ont pas utilisé la

- plaque bois carrée, et les supports CW de la configuration 2 étant dépourvus de poids, ils sont légèrement soulevés, donc non impactés par la plaque bois carrée.
- La configuration 2 semble être la moins stable (déplacement transversal le plus élevé), lorsqu'elle est soumise au courant. Cette suggestion est cependant à prendre avec précaution car les conditions d'essai n'étaient pas identiques pour chaque configuration (c'est-à-dire présence de plaque de bois).
 - En comparant avec les résultats numériques :
 - Dans l'ensemble, le test reproduit numériquement effectué sous courant prédit des déplacements CW plus petits. Ceci est attribué au fait que les VIV n'ont pas été inclus dans le modèle numérique.
 - Le test sous courant donne un mouvement nul pour la configuration 1, à l'exception d'un très petit déplacement à CW8 (le plus proche de l'extrémité libre du tuyau). Ceci est principalement dû à la modélisation de la CW avec des bouées 3D empêchant une position inclinée (comme observé dans le bassin) et donc une réduction des frottements.
 - Encore une fois, la configuration trompeuse de la configuration 3 sous IRR10Y peut être causée par la plaque de bois carrée limitant le mouvement de CW7.
 - La configuration 2 la plus éloignée de CW8 a un déplacement transversal presque identique avec les données expérimentales.

Dans un souci de précision, une étude comparative succincte avec exactement le même signal horaire d'élévation de la mer, représenté sur Figure 3-28, a été menée.

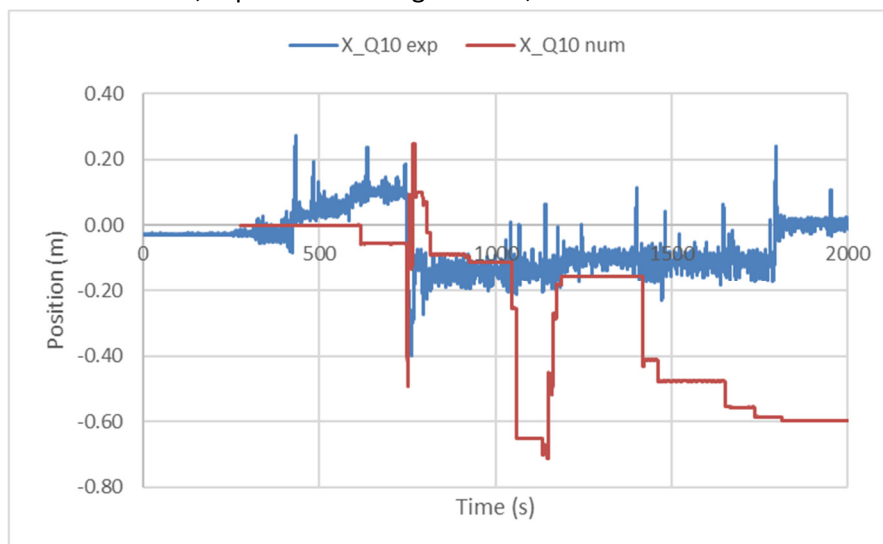


Figure 3-28: Évolution temporelle du mouvement transversal CW8 (X_{Q10}) exposé à IRR10Y (Configuration 1) avec l'offset x initial retiré des données expérimentales.

- Le mouvement transversal expérimental de CW8 sous IRR10Y est principalement statique avec des fluctuations mineures.
- Le graphique numérique suit globalement la tendance expérimentale, en tenant compte de la position initiale déformée du système de conduite flexible dans le bassin donnant un décalage en x . A partir de 1000s, le mouvement numérique s'écarte des données expérimentales. Cela pourrait être causé par l'irrégularité du fond du bassin qui retient la CW numérique.

- En conclusion, la différence entre la valeur de décalage x expérimentale et numérique rapportée dans Tableau 3-10 n'est pas due à l'utilisation d'un signal JONSWAP plutôt qu'à la même onde irrégulière exacte.

3.4.2.2. Déplacements X du tuyau flexible

Encore une fois, notez que le décalage x de départ du tuyau flexible des données expérimentales a été supprimé dans le tableau suivant à des fins de comparaison.

		Q8 exp	Q8 num	Q5 exp	Q5 num	T1 exp	T1 num
Actuel 90°	Config.1	2.0	1.5	2.6	1.7	4.8	3.1
	Config.2	3.6	2.0	3.7	2.5	4.6	5.8
	Config.3	2.3	1.8	3.0	1.8	4.5	2.5
IRR10Y 90°	Config.1	1.9	0,2	1.3	0,3	1.7	-0,4
	Config.2	0,1	-0,1	0,3	0,4	1.2	-0,5
	Config.3	-1.8	0,5	-0,7	0,1	-0,2	0,3

Tableau 3-11: Position transversale de la conduite flexible à une longueur d'arc de 84,4m (Q8), 124,4m (Q5), 170,8m (Q1, situé sur la crêpine) après une exposition de 500s au milieu marin considéré (90°) pour les 3 configurations d'ancrage.

- Focus sur les données expérimentales :
 - Le mouvement transversal de la conduite flexible suit les mêmes tendances décrites dans la section 3.4.2.1., le modèle numérique donne des mouvements transversaux plus importants. Les valeurs de déport de la conduite flexible sont cependant plus élevées compte tenu de l'inclinaison de l'élingue associée.
 - Comme mentionné dans la section précédente, les mouvements transversaux sous houle irrégulière sont en fait quasi inexistant étant donné que la conduite oscille globalement autour de sa position de départ.
- En comparant avec les résultats numériques :
 - Là encore, les données expérimentales sont globalement supérieures aux résultats numériques pour le test exposé au courant.
 - La différence de tendances pour le mouvement transversal de la conduite sous ondes irrégulières s'explique par la différence de signal d'onde irrégulière. Voir la comparaison graphique ci-dessous pour une comparaison directe en utilisant le signal exact d'élévation de la mer dans la simulation numérique.

La Figure 3-29 fournit une comparaison entre le signal de mouvement du tuyau dans la direction x à la fois à mi-longueur du tuyau et à l'extrémité libre du tuyau, au niveau de la crépine, pour exactement le même signal d'onde irrégulière.

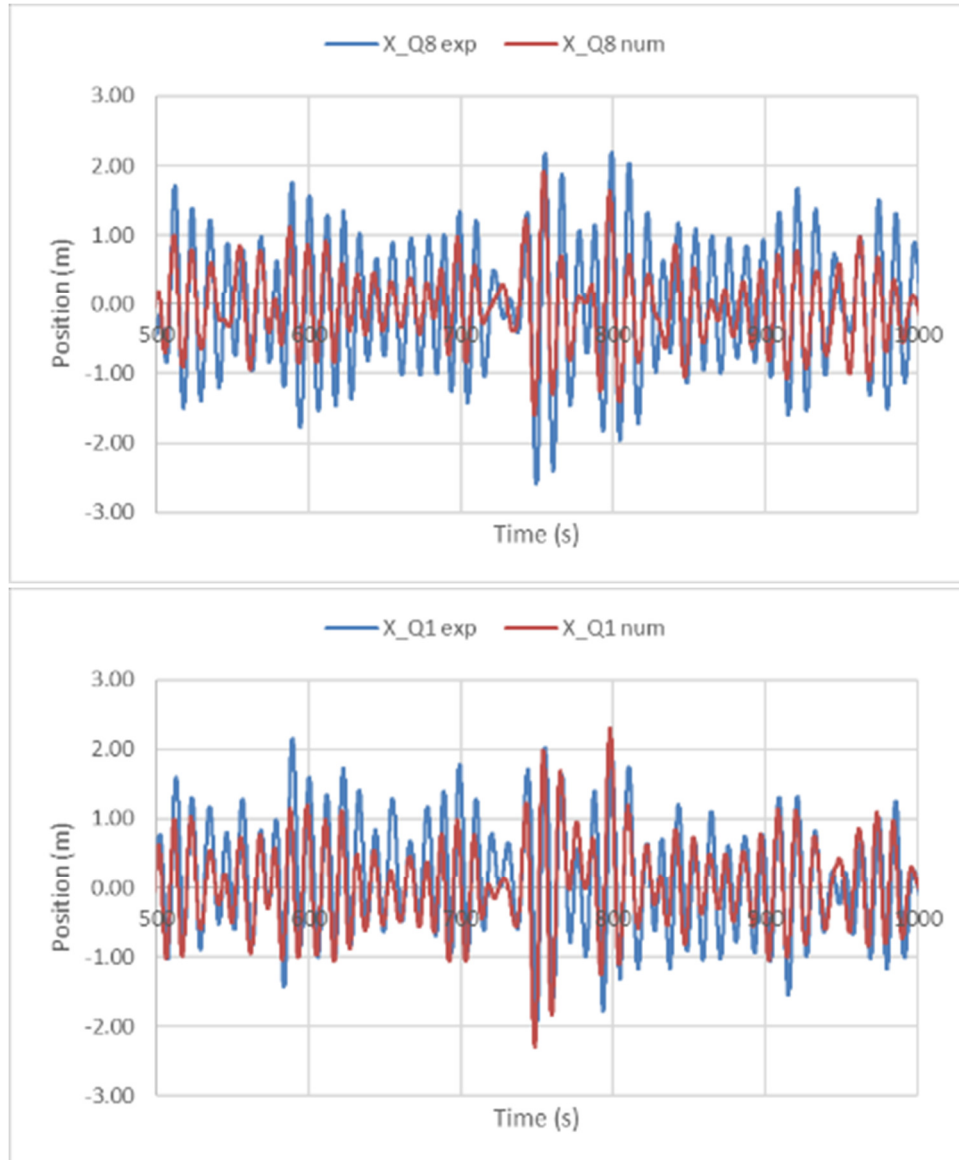


Figure 3-29: Évolution temporelle de la conduite flexible à mi-longueur (X_{Q8}) et du mouvement transversal de la crépine (X_{Q1}) exposée à IRR10Y (Configuration 1) avec l'offset x initial retiré des données expérimentales.

- En regardant l'étude comparative des signaux temporels des essais expérimentaux et des résultats numériques, il est clair que sous le même signal d'onde irrégulière, la prévisibilité du modèle numérique concernant le mouvement de la conduite est au point.
- Cependant, il semble que les oscillations des données expérimentales soient légèrement plus importantes.

3.4.3. Essais de flambement

Dans un premier temps 2 types de flambement devaient être testés : à savoir le *flambement dit 'initial'* faisant référence à la déformation locale adoptée par le flexible lors du rapprochement de deux masselottes voisines et la forme flexible '*zig-zag*' faisant référence à la forme de la conduite flexible lorsque les masses des poids sont imposées avec des décalages transversaux (Matrice d'essai jointe à la Réf. 4).

Cependant, en raison de la rigidité du tuyau flexible :

- Pour une pression interne supérieure à 5 bar, il n'était pas possible de faire flamber la conduite en ne déplaçant que deux poids voisins, que ce soit pour la méthodologie « *flambement initial* » ou la méthodologie en forme de « *zig-zag* » .
- La seule façon de plier le tuyau était de permettre un affaissement du tuyau, approximativement au milieu, en déplaçant presque tous les poids du bloc transversalement, afin de créer une forme en « V » avec le tuyau flexible (Photo 3-12)
- Le déport transversal central doit être suffisamment important pour que la fermeture du flambement soit maintenue à un P_i nominal de 10 bar (au moins 10 m).

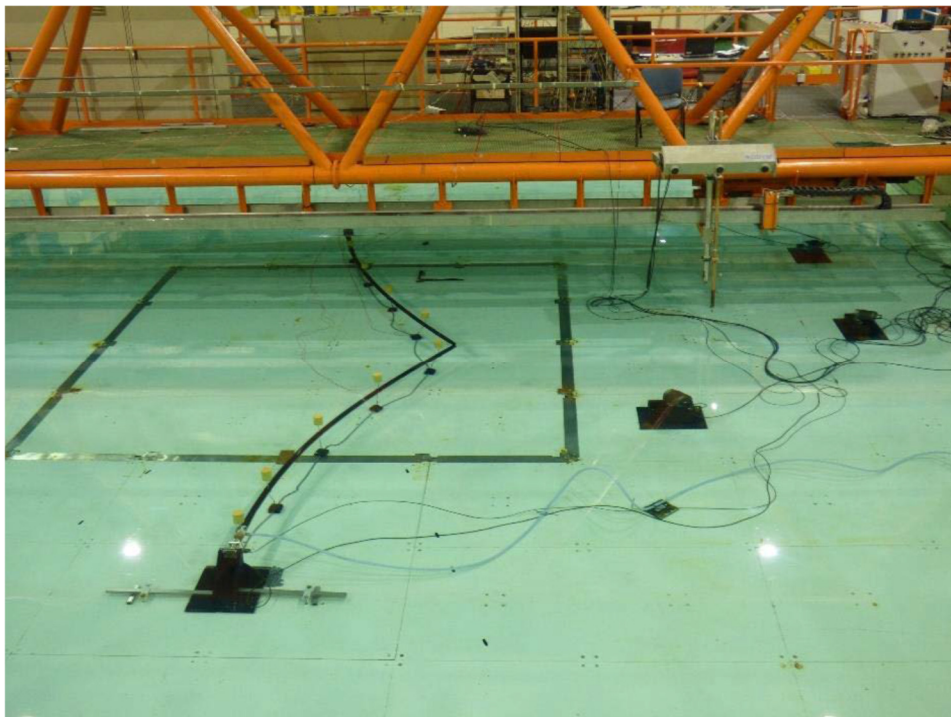


Photo 3-12: Flambement effondré du système de conduite flexible à mi-longueur de la conduite.

- Cependant, la **déformation de forme d'un solide n'est pas couverte par le logiciel Orcaflex**. Ainsi, tous les essais de flambement n'ont pas été reproduits numériquement, et aucune étude comparative n'a été menée. De plus, un effondrement doit être évité pour garantir une condition d'écoulement.
- Pour des pressions internes supérieures à 10 bars, la conduite flexible est tout simplement trop rigide pour ne serait-ce qu'autoriser une déformation de type flambement.

- Lors des essais expérimentaux de flambement menés à 5 ou 10 bar (avec un effondrement), il a été observé que pour un déport transversal central suffisamment faible (minimum de 10m encore) REG3 est suffisamment puissant pour initier un mouvement des CW vers leur position rectiligne initiale.

3.5. Conclusions de la 2ème campagne

Pour conclure cette 2^{ème} campagne, les principaux constats et constats sont listés dans la section 3.5.1. Le transition vers la 3^{ème} campagne est justifié à la section 3.5.2.

3.5.1. Points clés de la 2ème campagne

- La rigidité axiale de la conduite flexible a été caractérisée pour une tension inférieure à 1 000 kN, et les courbes de caractérisation de la déformation par rapport à la tension effective ont été définies comme bilinéaires pour des pressions internes supérieures à 5 bar.
- La rigidité en flexion a été redéfinie avec la moyenne des essais sous-marins et s'est révélée inférieure à celle définie lors de la 1^{ère} campagne. Deux méthodes ont été utilisées pour la calibration de l'EI. Une simple calibration du profil d'élévation z de la conduite flexible en fonction du Pi et une calibration de la période naturelle X de la conduite flexible. Les deux méthodes conduisent à des résultats très proches lorsque la réponse en fréquence du test d'extinction dans la direction x est à un seul pic.
- Les coefficients de frottement axial et latéral du fond marin pour les différents composants d'ancrage ont été définis. La calibration de l'outil de friction numérique, a révélé la difficulté d'étalonner le coefficient de frottement axial de la chaîne sur le fond marin, étant donné que la position initiale de la boucle de la chaîne est inconnue d'Orcaflex. En fait, déplacer le fond marin d'essai du bassin de haut en bas pour changer de configuration, modifie légèrement la position de la chaîne, ce qui a un impact important sur le frottement global de la chaîne.
- La conduite flexible testée dans le bassin présentait une forme initiale déformée à l'extrémité libre de la conduite, générant un important déport transversal (mémoire de forme).
- Sous de petites vagues régulières incidentes à 90°, le système de conduite flexible adopte la position en U induite par le mouvement circulaire des particules d'eau, en maintenant son premier et son dernier CW sur son axe de position de départ. Pour REG3, le système de conduite flexible se déplace transversalement en plus de la remarque précédente.
- Sous l'action du courant, les CW se mettent en position inclinée et le système de conduite flexible est poussé transversalement par le courant. A noter que les CW ont été modélisés avec des bouées 3D objet Orcaflex dans le modèle numérique ce qui empêchait la position oblique des CW. De plus, le VIV observé au niveau des bouées n'a pas pu être reproduit par le modèle numérique car le VIV n'a pas été inclus.
- Au cours de l'étude de comparaison des ondes régulières incidentes à 90°, les mouvements transversaux du modèle numérique se sont avérés surestimés. Le calibrage des valeurs des coefficients hydrodynamiques de la conduite flexible pour un état de mer donné a permis de se rabattre sur le même déplacement transversal expérimental à la fois au niveau de la conduite flexible et du CW.
- Aucun effet de résonance à l'extrémité libre de la conduite (au niveau de la crépine) n'a été observé pour des ondes régulières incidentes à 0°.

- Les tests de houles irrégulières testant la stabilité de la configuration des différents systèmes de conduite flexible ont été bien reproduits par le modèle numérique. La tension statique et l'évolution temporelle AS et BS ont été globalement reproduites par le modèle numérique. Les pics de haute tension d'événement lâche ont cependant parfois été surestimés par le modèle numérique. Les mouvements transversaux de la conduite flexible ont été très bien reproduits par le modèle numérique. Les mouvements transversaux CW n'ont cependant pas été correctement prédits par le modèle numérique, principalement en raison de l'omission des VIV et de l'utilisation de l'objet bouée 3D Orcaflex. De plus, notez que le CW7 a été initialement placé sur une irrégularité du fond marin du bassin qui a ensuite été recouverte par une plaque de bois qui a également obstrué le mouvement transversal du CW7 en raison de l'épaisseur supplémentaire réduisant les mouvements verticaux des poids donc la réduction de la friction.

3.5.2. Vers la 3^{ème} campagne

- Liste de suggestions pour améliorer le modèle numérique et la méthodologie de calage :
 - Utiliser des bouées 6D pour la modélisation CW
 - Réalignement cohérent du prototype dans le bassin
 - Approfondir la calibration des coefficients de frottement des éléments d'ancrage, en multipliant les essais de calibration expérimentaux, les essais en cours, et en s'assurant qu'aucune irrégularité du fond du bassin n'est présente, notamment sous les éléments d'ancrage
- La plupart des essais de la matrice d'essais de la 2^{ème} campagne ont été inclus sur la base de phénomènes observés lors des projets SubmaFlex/Via Marina qui utilisaient une conduite flexible différente : une s'allongeant sous pression. Ainsi la 3^{ème} campagne utilisera une conduite flexible similaire à celle de la Via Marina, afin de tester le comportement de la conduite en présence d'un flambement non effondré.
- De plus, l'utilisation d'une 2^{ème} conduite flexible permettra de tester l'adaptabilité de la méthodologie de calibration de l'outil numérique développée.
- Les objectifs de la 3^{ème} campagne sont les suivants :
 - Caractériser la nouvelle conduite flexible avec la méthodologie développée
 - Tester la caractérisation de la tension axiale (avec les deux extrémités de tuyau fixées) dans des conditions de mer extérieures, pour les deux tuyaux flexibles
 - Évaluer le comportement du tuyau lorsqu'il rencontre une petite pente du fond marin
 - Évaluer le comportement du tuyau lorsqu'une élingue est cassée (à la fois BS et AS)

4. Troisième campagne

4.1. Campagne expérimentale à l'échelle du modèle

4.1.1. Conception de systèmes de canalisations flexibles

Le système de conduite flexible utilisé dans la troisième campagne est le même que celui de la 2^{ème} campagne, tel que décrit à la section 3.1.

Les quelques nouveautés de la troisième campagne sont listées ci-dessous :

- Seules 2 configurations d'ancrage ont été utilisées : Configuration 1 (CW uniquement) et Configuration 2 (Chaîne uniquement)
- Une deuxième conduite flexible (Photo 4-1) s'allongeant sous pression, a été testée en utilisant exactement le même système, principalement pour les tests de flambement.



Photo 4-1: Tuyau A se rétractant sous pression (côté gauche) et tuyau B s'allongeant sous pression (côté droit).

4.1.2. Campagne expérimentale

Cette section agit comme un résumé exécutif du rapport d'essai du bassin (Réf. 7). Une description succincte de la matrice de test est d'abord fournie, ainsi qu'une liste des principales observations faites au cours de la campagne expérimentale, qui présentent un intérêt pour la calibration du modèle Orcaflex.

4.1.2.1. Procédure expérimentale

Comme détaillé dans la section 3.3.1, les deux lots d'essais utilisés pour la calibration de la rigidité axiale de la conduite flexible ont été réalisés sur la conduite B. La rigidité axiale de la conduite flexible a d'abord été évaluée avec le système de poulie sous-marine pour différentes pressions internes lors du test **2-5**. Comme étape complémentaire, la tension axiale de la conduite flexible seule a ensuite été mesurée en fixant les deux extrémités de la conduite et en augmentant progressivement la pression interne dans **l'essai 1**.

De même, des essais de rigidité en flexion et des test d'extinction ont été réalisés pour la conduite B pour les deux configurations d'ancrage 1 et 2, respectivement **les essais 12 et 33, et les essais 13-16 et 34-37** .

En ce qui concerne les tests de caractérisation, le poids dans l'eau a été vérifié expérimentalement pour les deux conduites (Tableau 4-1), afin de fournir un résultat plus précis. Ceci est important pour les tests d'étalonnage reposant sur les profils d'élévation z pour les faibles tensions de traction en particulier, qui sont sensibles à la masse dans l'eau, comme mentionné dans la section 3.3.1.

Lors de la caractérisation préliminaire de rigidité axiale de la conduite B dans le milieu aérien (Réf. 7, Section 11.1.2.), il a été constaté que la conduite B présentait une hystérésis : pour un cycle identique de finition en pression interne avec une décompression à 0 bar, la conduite flexible l'allongement est variable.

Pour les tests de réponse de configuration proprement dits, les lots ont été réalisés comme suit :

- Tuyau B – Comportement du tuyau avec flambement initial (les deux extrémités fixes) : **essais 6-11**
- Tube B – Stabilité du tube avec flambement initial (extrémité fixe/libre) : **essais 27-32**
- Tube B – Stabilité du tube en configuration initiale droite : **essais 17-26 & 38-47**

- Tuyau A – Stabilité du tuyau en configuration initiale droite en état endommagé (1 élingue cassée) : **essais 48-85**
- Conduite A – Stabilité conduite en configuration initiale rectiligne avec une bosse au niveau du fond marin : **essais 88-107**

4.1.2.2. Observations d'intérêt

La présente section liste les observations inattendues faites lors de la 3^{ème} campagne expérimentale, qui pourraient être utiles pour comprendre le comportement du modèle physique dans le bassin lors de la calibration du modèle numérique Orcaflex. Ces remarques sont pour la plupart d'entre elles, mentionnées dans Réf. 7, article 12.

Comme décrit en détail dans Réf. 7, Section 5.8., deux plaques de bois rectangulaires [13,6 mx 2 mx 0,1 m] ont été ajoutées sous CW2 et CW8 (Photo 4-2 **Error! Reference source not found.**), ajoutant une épaisseur supplémentaire à ces deux endroits qui peut avoir un impact sur le mouvement transversal du flexible système de canalisations, comme on l'a vu lors de la calibration de la 2^{ème} campagne.

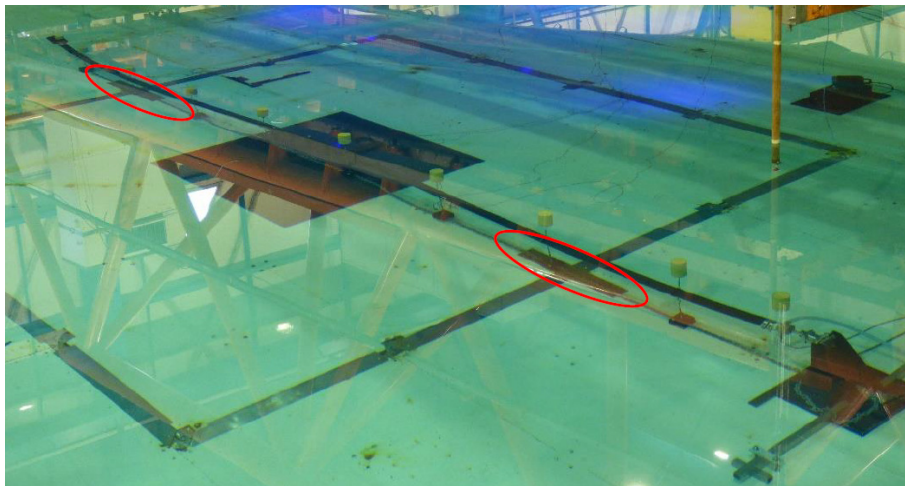


Photo 4-2: Emplacement des deux plaques de bois rectangulaires sous CW2 et CW7.

Il convient également de mentionner que les cibles Qualysis censées être positionnées sur la ligne médiane du tuyau représentée en rouge sur Photo 4-3, peuvent être légèrement décalées. Très probablement, le tuyau subit une torsion potentiellement causée par le désalignement CW qui peut amener le QT vers le bas, comme le montre la Photo 4-3. Par conséquent, les divergences dans la position Z de la conduite entre les résultats numériques et expérimentaux doivent être prises en compte en tenant compte de cette tendance (en particulier lors de la calibration du modèle numérique sur le profil d'élévation en z de la conduite, comme dans les sections 4.3.1 et 4.3.2).

De même, lors des essais de raideur axiale sur la conduite B qui utilisait un système de poulies, il a été constaté qu'en fonction des efforts de traction tirant dans le soufflet, la poutre verticale en aluminium fléchissait vers la conduite flexible (Photo 4-4). Plus la force de traction est élevée, plus le déplacement vertical du faisceau est élevé. Plus important encore, ce déplacement conduit donc à un emplacement de point de référence variable, concernant l'extrémité du faisceau vertical. Encore une fois, cette tendance doit être rappelée lors de l'examen de l'incertitude sur la calibration de la flexion axiale (Sections 4.3.1).

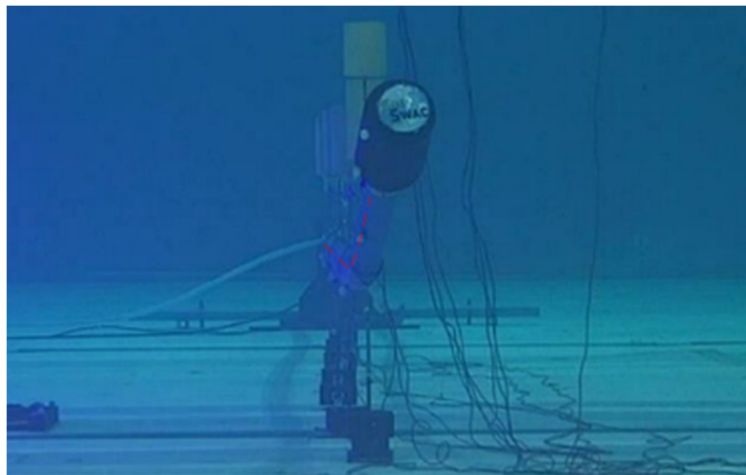


Photo 4-3: Zoom sur l'emplacement de la cible Qualysis le long de la conduite flexible B (test 33). La ligne médiane du tuyau est représentée en rouge.

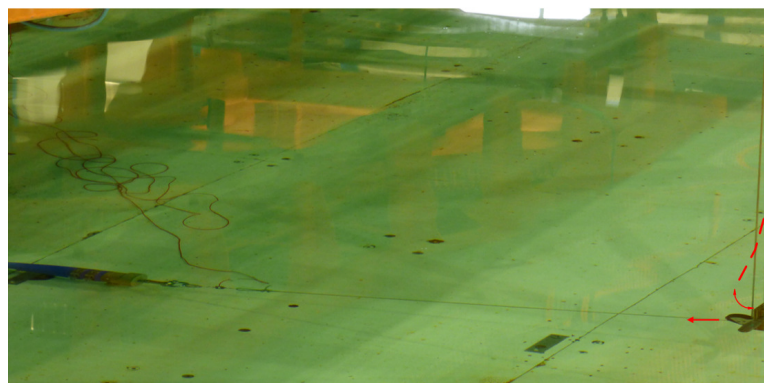


Photo 4-4: Système de poulie utilisé dans les essais 2-5 pour caractériser la rigidité axiale du tube B.

Accessoirement, il arrive que la bouée utilisée pour rendre le raccord d'extrémité de lestage B à flottabilité neutre, lorsque le système de conduite flexible est fixé aux deux extrémités, ait été involontairement conservée pendant toute la troisième campagne (Photo 4-5. Par conséquent, cette bouée supplémentaire a été incluse dans le modèle numérique par souci de cohérence. De plus, cette bouée supplémentaire a également provoqué le flambement de la conduite flexible vers la surface de l'eau lorsqu'elle était à très basse pression interne (Photo 46).

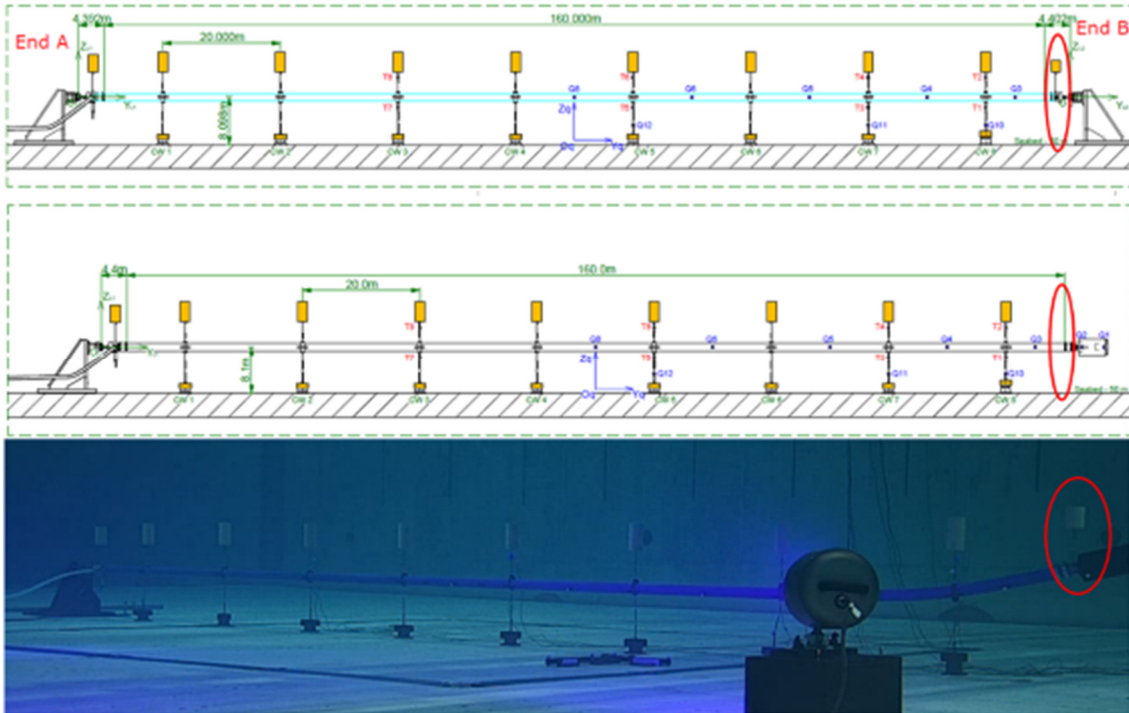


Photo 4-5: Plans du système de conduite flexible avec les deux extrémités fixes (en haut), une extrémité libre et la crépine (au milieu) et mise en place du prototype dans le bassin avec une extrémité libre et la crépine avec la bouée d'extrémité B (en bas) .

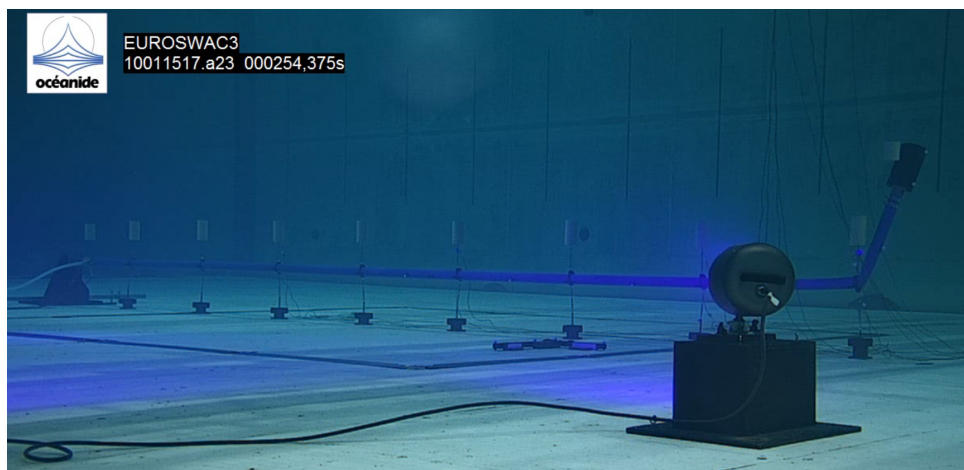


Photo 46: Effondrement de la boucle du flexible vers la surface de l'eau d'environ 75° lorsqu'il est à environ 500kPa de pression interne (essai 12).

Concernant les tests test pour les configurations non effondrées :

- Le tuyau B s'allongeant sous pression, a permis la formation de configurations non effondrées.

- La longueur supplémentaire emprisonnée dans l'inter-distance fixe entre les deux points de raccordement, flambe donc, principalement transversalement et selon une tendance imprévisible, compte tenu de la matière élastique tissée non caractérisée de la conduite flexible (Photo 4-7).
- Pour l'essai de caractérisation en traction axiale, la distance nominale entre les points de fixation correspondant à la conduite flexible et sa longueur de raccordement d'extrémité, a été augmentée à la fois pour éviter que la conduite flexible ne touche le sol au Pi le plus élevé et pour éviter tout flambement.

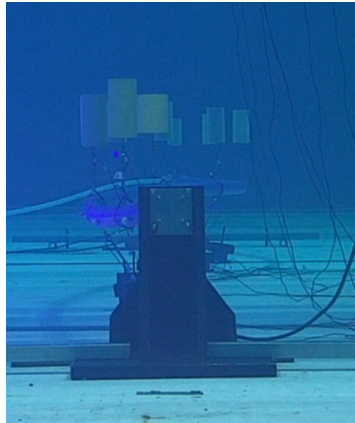


Photo 4-7: Tuyau avec flambement initial et les deux extrémités fixées à $P_i = 40\text{bar}$ (essai 27).

En ce qui concerne les tests portant sur le comportement du système de conduite flexible en l'absence d'une élingue (état endommagé) :

- Des réponses intenses du système de conduite flexible pour l'état endommagé sous REG2 ont été notées, ainsi tous les tests prévus pour les conditions endommagées sous REG3 et REG3 + courant, n'ont pas été effectués.
- Les effets combinés de la bouée supplémentaire à l'extrémité B de la conduite et du retrait de l'AS 8 ont amené la conduite flexible trop près de la surface de l'eau (Image 48), il a donc été choisi de tester la rupture de l'AS 6 à la place.

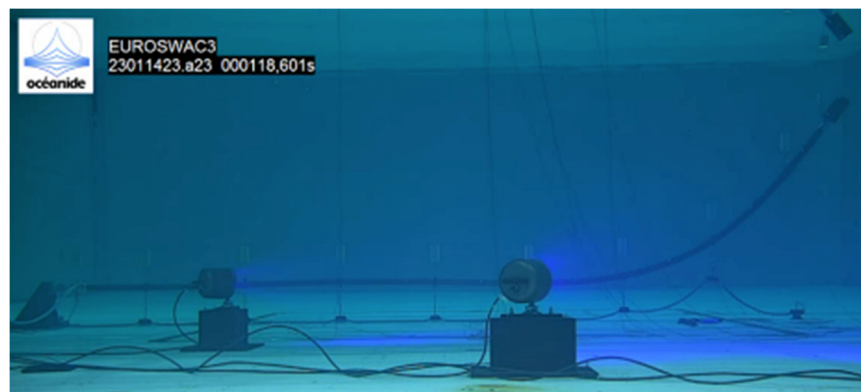


Image 48: État statique du système de conduite flexible avec AS 8 retiré (essai exclu de la matrice d'essai).

4.2. Implémentation du modèle numérique

4.2.1. Tuyau flexible, connexion d'extrémité et crépine

Le tableau 4-1 fournit les principales dimensions de la conduite flexible B « H2O Pompes 1340 mm » et ses raccords utilisés comme données d'entrée dans le modèle Orcaflex.

	Length	OD	ID	Mass per unit (air)	Mass (water)	EI	EA
-	[m]	[m]	[m]	[t/m]	[kg]	[kN.m2]	[KN]
H2O Pompes 13400mm	160	1.34	1.253	195.4	2847	Note 1	Note 1
End A	4.392	1.037	0	1.837	4363	8.58E+07	9.07E+07
End B	2.4	1.199	0	1.861	-3041 ⁽³⁾	8.58E+07	9.07E+07
Strainer	5.008	2.9	0	5.2		8.58E+07	9.07E+07

Tableau 4-1: Données d'entrée Orcaflex concernant le flexible « H2O Pompes », les deux embouts et la crépine.

- Remarque 1 : Ces résultats dépendent de la pression interne . L'évolution des rigidités axiale et en flexion en fonction de la pression est précisée respectivement dans les Sections 4.3.1et 4.3.2.
 - Note 2 : Par souci de simplicité, il a été choisi de n'implémenter que les bonnes masses (dans l'air et dans l'eau) dans le modèle numérique, lorsque l'objet à modéliser avait une forme complexe. En conséquence, les diamètres de section de ligne affichés dans le tableau 4-1 ont été légèrement modifiés.
- Note 3 : Puisque l'extrémité B et la crépine étaient encastrées ensemble, et que la masse expérimentale dans l'eau a été vérifiée en combinant les deux éléments par Océanide, la masse dans l'eau est fournie pour les deux éléments combinés.

Comme observé lors de la calibration de la 2^{ème} campagne, les coefficients hydrodynamiques de la conduite flexible jouent un rôle clé dans l'amplitude du mouvement transversal puisque la conduite flexible n'est plus fixée aux élingues d'ancrage. Le tableau 4.1 fournit une estimation des coefficients hydrodynamiques dans Réf. 11, à préciser dans le logiciel Orcaflex.

De plus, selon la DNV C205 Réf. 10(Section 6.7.2.4.), il a été constaté que lorsqu'il est soumis à la fois à un mouvement oscillatoire et à un courant constant dont la vitesse est quatre fois supérieure à la vitesse orbitale maximale des vagues, alors le Cd de l'objet exposé à cette condition de mer peut être considéré comme égal à sa valeur constante.

État de la mer	C_M	C_D
REG1	1	1
REG2	0,8	1.5
REG3	0	1.7
Courant	1	1.2
Courant + REG3	1	1.2

Tableau 4-2: Coefficients hydrodynamiques de la conduite flexible (coefficient de masse ajoutée et coefficient de traînée) en fonction de l'état de la mer.

4.2.2. Composants restants du système de conduites flexibles

Les caractéristiques des bouées utilisées dans la troisième campagne sont précisées dans Tableau 4-3ci-après.

		Buoy type 2 ⁽¹⁾	End A Buoy ⁽²⁾	End B Buoy ⁽²⁾
Shape	-	Cylinder	Cylinder	Cylinder
Volume	m3	7.56	6.71	4.57
Diameter	m	1.69	1.69	1.69
Height	m	3.38	3.00	2.04
Mass in air	kg	2645	2350	1598
Mass in water	kg	-4912	-4364	-2967

Tableau 4-3: Paramètres principaux des bouées de la troisième campagne.

Note 1 : Bouées utilisées lors de la 2^{ème} campagne.

Note 2 : Bouées utilisées pour assurer la flottabilité neutre des deux raccords d'extrémité de tuyau.

En ce qui concerne la modélisation numérique, la même méthodologie que celle décrite à la section 3.2.3 a été adoptée. Un ajustement mineur a été effectué sur les paramètres numériques de l'élingue (

		Real AS	Numeric al AS	Real BS	Numeric al BS
Length	m	3.46	4.43	3	3.97
Diameter	m	0.123	0.123	0.0896	0.0896
Mass in air	kg	93.3	93.3	49.3	49.3
Mass in water	kg	81.4	81.4	43	43
EA	kN	1190	1523	2046	2708

Tableau 4-4), pour tenir compte de la différence de diamètre de tuyau entre le tuyau A et le tuyau B. Le diamètre du tuyau B est plus petit, et donc la longueur numérique supplémentaire ajoutée à l'élingue numérique est plus petite. (0.97m au lieu de 1.007m).

		Real AS	Numeric al AS	Real BS	Numeric al BS
Length	m	3.46	4.43	3	3.97
Diameter	m	0.123	0.123	0.0896	0.0896
Mass in air	kg	93.3	93.3	49.3	49.3
Mass in water	kg	81.4	81.4	43	43
EA	kN	1190	1523	2046	2708

Tableau 4-4: Paramètres principaux de l'élingue de la troisième campagne (associée à la canalisation B).

Les composants d'ancrage des configurations d'ancrage 1 et 2 utilisés dans cette troisième campagne ont été conservés identiques comme décrit dans la section 3.2.4, dans le modèle numérique utilisé pour cette troisième campagne.

4.3. Axes de calibration du modèle numérique

De la même manière que pour la conduite flexible A, la conduite flexible B a été caractérisée expérimentalement, à la fois en termes de rigidité axiale et de rigidité en flexion. Dans cette section, la méthodologie déjà introduite pour incorporer ces données en tant qu'entrées Orcaflex spécifiées par l'utilisateur est présentée. Aucun autre sujet pouvant nécessiter un processus de validation du modèle numérique n'a été identifié au cours de cette troisième campagne.

4.3.1. Calibration de la rigidité axiale

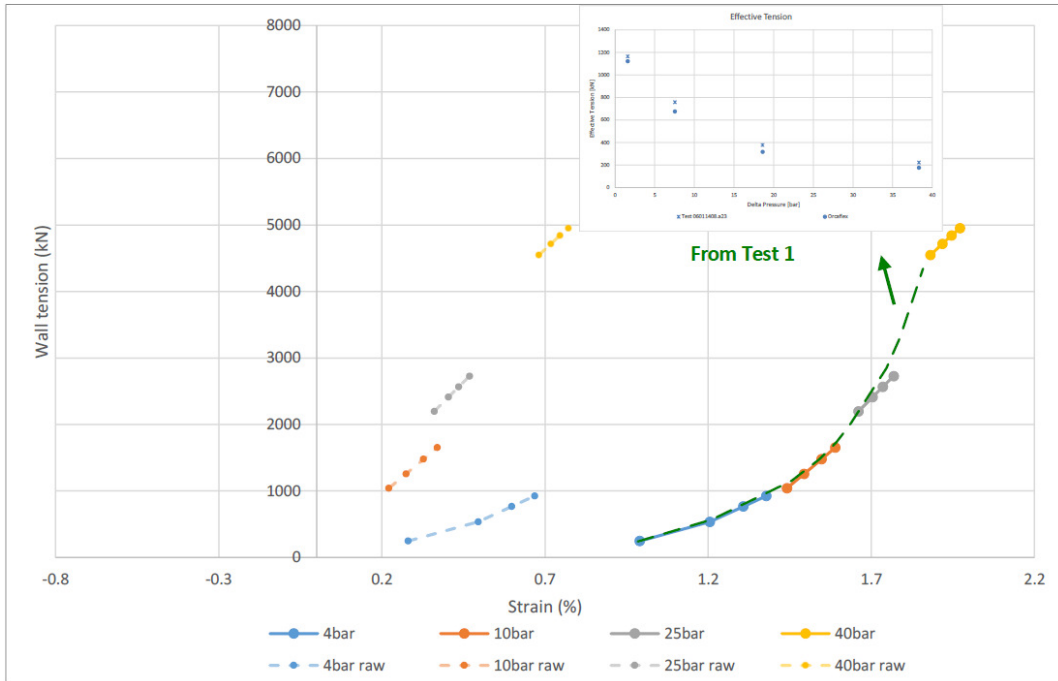
La rigidité axiale dépendante de la pression du tuyau flexible B a d'abord été caractérisée dans l'air avec une pression induite par l'air, comme décrit dans Réf. 7, section 11.1.2.

On a remarqué que :

- Pour une charge donnée, la conduite flexible subissant un cycle de pression commençant et finissant à 0 bar, ne donne pas la même valeur d'allongement initial et final.
- De même, pour une pression donnée, la conduite flexible subissant un cycle de chargement commençant et finissant à 0kN, ne donne pas la même valeur d'allongement initial et final.
- La conduite flexible présente ainsi un comportement d'hystérésis.
- Une conséquence directe est la variabilité de la rigidité de la conduite flexible, et à son tour l'estimation approximative de sa rigidité axiale.

Néanmoins, la rigidité axiale a été évaluée telle que définie précédemment (Section 3.3.1), avec l'utilisation combinée des **tests 2-5** et **du test 1**, étudiant respectivement la rigidité axiale de la conduite flexible en fonction à la fois de la pression interne (5bar-40bar) et la tension de traction (300-100kN); et en définissant la longueur initiale exacte du tuyau en fonction de la pression interne (en faisant correspondre le comportement de tension effectif lorsque les deux extrémités du tuyau sont fixes).

(a)



(b)

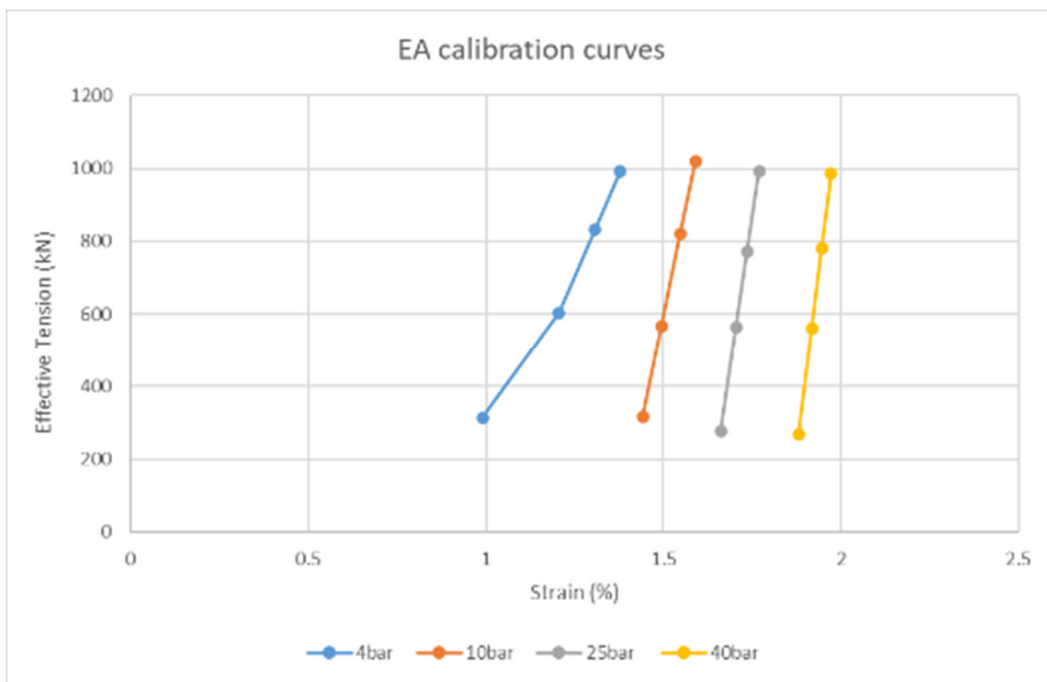


Figure 4-1: Courbes EA calibrées pour le tuyau B obtenues à partir de la 3ème campagne de calibration exprimées par (a) la tension de paroi en fonction de la déformation (%), et (b) la tension effective en fonction de la déformation (%).

De la même manière que pour la première campagne, les profils d'élévation du modèle numérique de conduite flexible, pour chaque pression, ont été calibrés en modifiant itérativement la valeur de EA pour une tension de traction donnée, jusqu'à s'aligner avec ceux expérimentaux (essais 2-5). La valeur initiale de l'évaluation EA est obtenue à partir des tests de caractérisation dans l'air. Ce faisant, une courbe déformation[%]/Tw[kN] est obtenue pour chaque pression interne (4bar, 10bar, 25bar, 40bar). Grâce à l'essai 1, ces courbes de caractérisation EA ont ensuite été ajustées pour respecter le

comportement de la tension effective de la conduite (c'est-à-dire déterminer la longueur initiale de la conduite) en fonction de P_i (Figure 4-1a).

Il est clair que le tuyau B s'allonge sous pression : cet allongement varie de 1% à 2% pour des pressions internes comprises entre 4 et 40bar.

De plus, on peut remarquer en considérant Figure 4-1b, que par rapport aux courbes EA du tuyau A, celles caractérisant le tuyau B sont toutes linéaires à l'exception de celle de 4bar.

De même, ces courbes EA ont été importées dans une feuille MathCad comme base de données pour l'interpolation linéaire, afin d'obtenir une telle courbe EA pour tout P_i compris entre 4bar et 40bar.

4.3.2. Calibration de la rigidité en flexion

Comme indiqué dans la section 4.1.2.2, la conduite flexible présentait un effondrement de boucle à faible P_i (environ 4-5 bars). Ainsi, l'estimation de l'EI de la conduite flexible à ce P_i n'a pas pu être effectuée compte tenu de la déformation de la conduite flexible non prise en charge par le logiciel Orcaflex.

En accord avec la Section 3.3.2, la calibration de la conduite B EI a été réalisé sur la Configuration d'ancrage 1, compte tenu de l'absence de chaîne dans les éléments d'ancrage. En effet, la position initiale exacte de la chaîne n'est pas connue par le logiciel OrcaFlex, compte tenu de l'immersion du fond marin, de l'aspect séquentiel des essais expérimentaux modifiant la position de la chaîne, et du repositionnement approximatif et non systématique de la chaîne entre chaque essai.

Les profils d'élévation expérimentaux du **test 12** ont servi de référence pour calibrer les valeurs EI de la conduite B. Pour les trois pressions internes testées : 10bar, 25 bar et 40 bar, les profils ont été appariés de façon à rendre la partie « libre » de le système de conduite flexible (c'est-à-dire à proximité de la crépine) chevauche les profils en z enregistrés dans le bassin.

Dans la section 4.1.2.2, la position du QT a été discutée et est rappelée ici, pour justifier le choix des points de référence dans la calibration du profil d'élévation. Comme on peut le voir sur Photo 4-9, la plupart des cibles Qualysis se sont légèrement décalées de leur position initiale au milieu de l'axe, ce qui a conduit à une sélection du QT à conserver comme point de référence pour la calibration en élévation. Q8 ainsi que Q2 et Q1 ont été qualifiés comme étant les plus proches de leur position théorique sur la conduite flexible, et donc utilisés dans le processus de calibration EI.

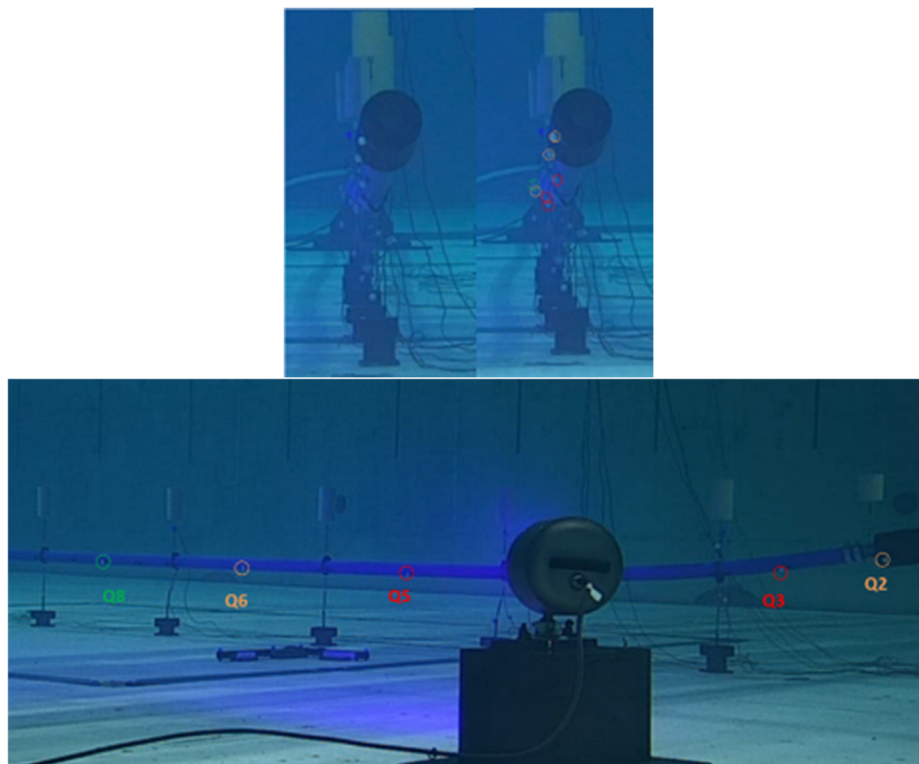


Photo 4-9: Qualysis cible la localisation sur la conduite flexible lors de l'essai de rigidité en flexion de la configuration 1 (*essai 12*), vue transversale (haut), et vue longitudinale (b).

Il convient cependant de mentionner que les valeurs EI suivantes pourraient être légèrement surestimées compte tenu de la position vers le bas de Q2 et Q1 (c'est-à-dire QT sur la crépine) qui sont encore légèrement décalées par rapport à leur position supposée médiane.

La Figure 4-2 présente les profils d'élévation enregistrés lors de la campagne expérimentale, ainsi que les profils d'élévation obtenus à partir du modèle numérique calibré. Comme indiqué précédemment, les points de référence sont Q8 (à 84,4 m), Q2 (à 167,8 m) et Q1 (à 170,8 m).

Les valeurs EI obtenues sont répertoriées dans Tableau 4-5.

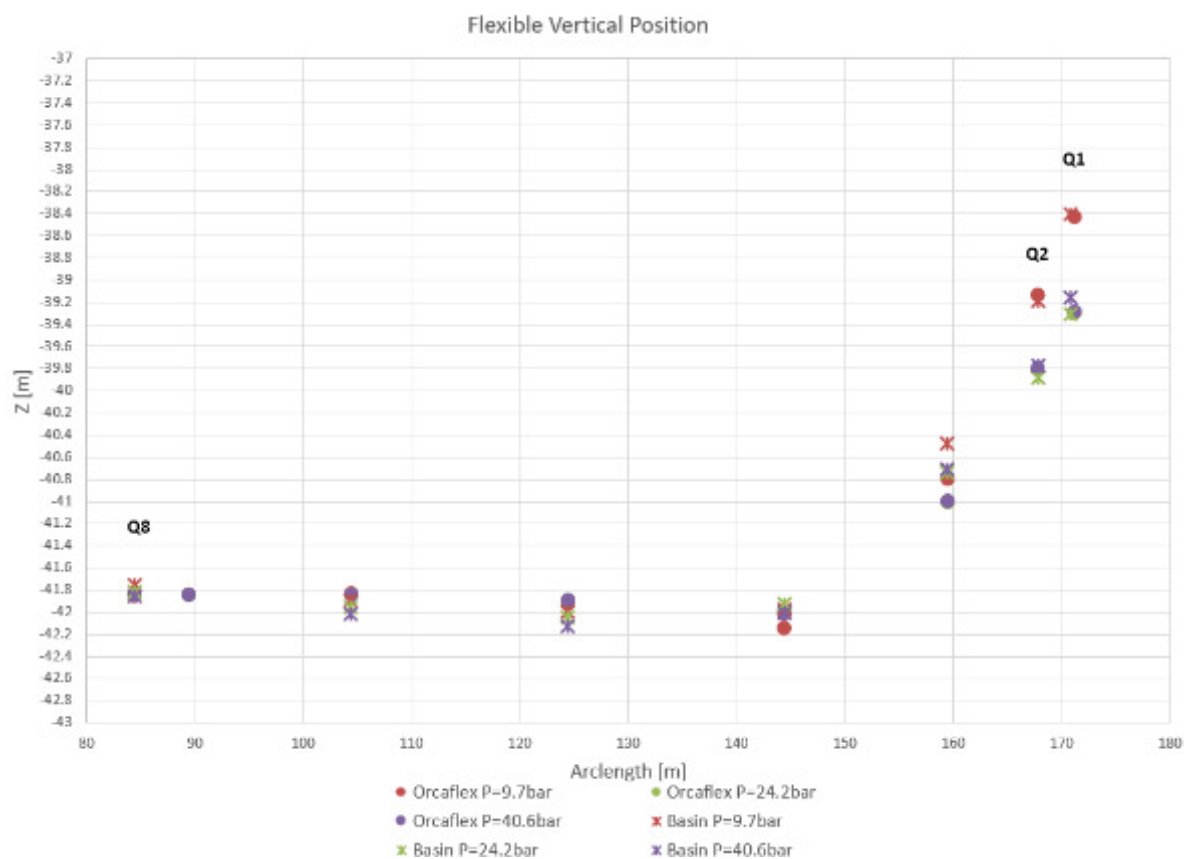


Figure 4-2: Profils d'élévation de la canalisation B en fonction de la pression interne pour l'ancrage Configuration 1 (essai 12).

Pi [kPa]	EI [kN.m2]
973	57000
2417	82000
4058	82000

Tableau 4-5: Valeurs EI de la conduite B obtenues par la méthode du profil d'élévation.

4.4. Etude comparative entre les données expérimentales et numériques

4.4.1. Introduction

Cette étude comparative porte sur les cinq modèles physiques différents testés lors de la troisième campagne :

1. Conduite B, nouveau matériau de conduite ayant tendance à s'allonger sous la pression, ancré en configuration 1 (avec masselottes uniquement), déployé sur fond plat et testé dans des conditions de houle irrégulières,
2. Conduite B ancrée en configuration 2 (avec chaîne seule) déployée sur fond plat et testée en conditions de houle irrégulière,
3. Pipe A, déjà utilisée lors des deux campagnes précédentes, ancrée en configuration 1 (avec lestage uniquement), déployée sur fond accidenté et testée dans des conditions de houle irrégulières,
4. Conduite A ancrée en configuration 2 (avec chaîne uniquement), déployée sur fond bosselé et testée en conditions de houle irrégulière,
5. Canalisation A ancrée en configuration 2 (avec chaîne seule), déployée sur fond plat et testée en conditions de houle régulière en considérant un cas d'avarie simulant la perte d'une des élingues suivantes :
 - Élingue d'ancrage 6,
 - Élingue d'ancrage 7,
 - Élingue de flottabilité 7,
 - Élingue de flottabilité 8.

Un modèle OrcaFlex de chacun des 5 modèles physiques listés ci-dessus est paramétré et calibré à partir des résultats des deux campagnes précédentes et des essais de caractérisation réalisés sur la conduite B, présentés aux sections 4.3.1 et 4.3.2. L'objectif est d'appliquer la méthodologie de calibration développée dans le cadre de ce projet à ces 5 cas particuliers. Ensuite, chaque condition environnementale générée au cours de la campagne est exécutée numériquement et une comparaison systématique entre les résultats numériques et les mesures physiques est effectuée pour valider la procédure de calibration et les modèles numériques.

La liste suivante répertorie les différences existant entre le modèle numérique et le modèle physique :

- Les bouées et les poids des blocs sont modélisés dans le modèle OrcaFlex sous forme d'éléments 3D. Par conséquent, pour ces éléments, seules les traductions sont prises en compte. Cependant, au cours des essais, des rotations importantes des poids des touffes ont été observées.
- Pour des conditions de vagues irrégulières, les séries temporelles d'élévation des vagues ont été recalculées dans OrcaFlex en utilisant les caractéristiques spectrales de la vague. Par conséquent, la série temporelle d'élévation des vagues n'est pas strictement la même entre le modèle numérique et le modèle physique.
- Le modèle numérique peut être considéré comme un monde parfait. Dans ce modèle, le tuyau et la chaîne sont parfaitement droits au début des simulations et tous les éléments ont un plan de symétrie parfait. Les tests physiques sont dans le monde réel. Au cours de la campagne, les essais

se succèdent conduisant à des conditions initiales différentes pour la conduite flexible et le système d'ancrage.

- La caractérisation du coefficient de frottement entre la chaîne et le fond du réservoir n'a pas été concluante. Par conséquent, un paramètre de frottement générique a été sélectionné.

Sur la base des observations ci-dessus, la comparaison présentée dans cette section est plus qualitative que quantitative. Enfin, l'objectif est de montrer que pour les modèles numériques et physiques, les paramètres d'intérêt ont les mêmes ordres de grandeur et présentent les mêmes tendances.

4.4.2. Comparatif

La comparaison porte sur les principaux paramètres d'intérêt d'un point de vue conception :

- Le comportement hydrodynamique de la conduite et donc les mouvements de la conduite aux 8 points de mesure répartis le long de la conduite flexible,
- Les tensions axiales mesurées dans les 4 élingues d'ancrage instrumentées lors des essais avec une cellule de charge 1D.

Lors des tests, il a été observé que les variations de tension dans les élingues de flottabilité sont très faibles. Cette observation a été confirmée par l'étude numérique. Par conséquent, ce paramètre n'est pas considéré comme intéressant pour la présente étude comparative. De plus, pour une houle incidente à 90 degrés, c'est-à-dire transversale à l'axe principal de la conduite flexible, les mouvements 3D sont comparés tandis que pour un cap de vague de 0 degré, c'est-à-dire alignés sur l'axe principal du flexible, seuls les mouvements verticaux sont par rapport aux mouvements horizontaux en ligne et à flux croisés sont de très faibles amplitudes pour ce cas.

Les statistiques prises en compte dans les comparaisons sont les suivantes :

- Les valeurs maximales des tensions dans les élingues pouvant être considérées comme valeurs de calcul,
- Et l'écart type pour les mouvements de la conduite flexible car les mouvements observés sont faibles et que les valeurs extrêmes sont plus impactées par les conditions initiales des essais qui peuvent différer entre le modèle numérique et le modèle physique.

Enfin, la comparaison est effectuée à l'aide de tracés 2D comparant les valeurs mesurées lors de la campagne qui sont tracées aux résultats extraits du modèle numérique comme illustré par les deux figures ci-dessous. Un tracé est fourni pour chaque configuration de canalisation testée : canalisation A ou B, fond plat ou bosselé, sans ou avec 1 perte d'élingue. Chaque figure comprend tous les tests effectués pour chaque condition de conduite. Enfin, chaque point du tracé est un point de comparaison et plus le point est proche de la droite $y=x$ meilleure est la comparaison entre le modèle physique et le modèle numérique.

Le premier exemple ci-dessous montre que les modèles numériques et physiques se comparent très bien car tous les points sont proches de la courbe ' $y=x$ '. Cela démontre que le modèle numérique prédit bien les tensions maximales dans les élingues d'ancrage.

Le deuxième exemple montre que les deux modèles présentent une tendance très similaire car les points forment une courbe linéaire. Cela montre que le modèle numérique fournit les mêmes tendances que le modèle physique mais tend à sous-estimer les mouvements verticaux de la conduite.

Dans toutes les comparaisons suivantes, les tensions sont données en kN et les mouvements des tuyaux sont en mètres.

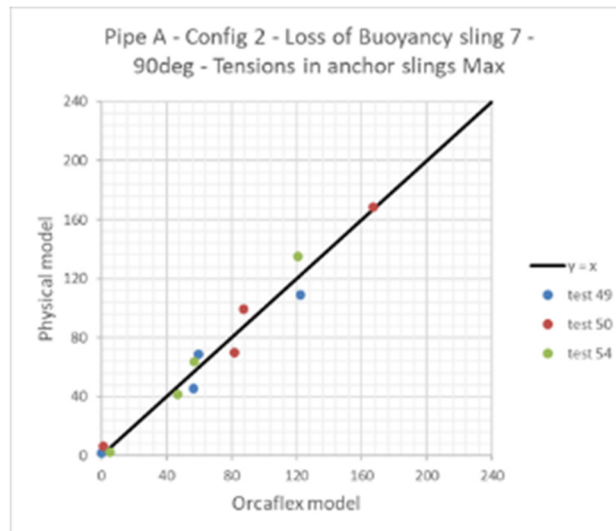


Figure 4-3: Exemple 1 de tracé comparatif entre modèle physique et modèle numérique.

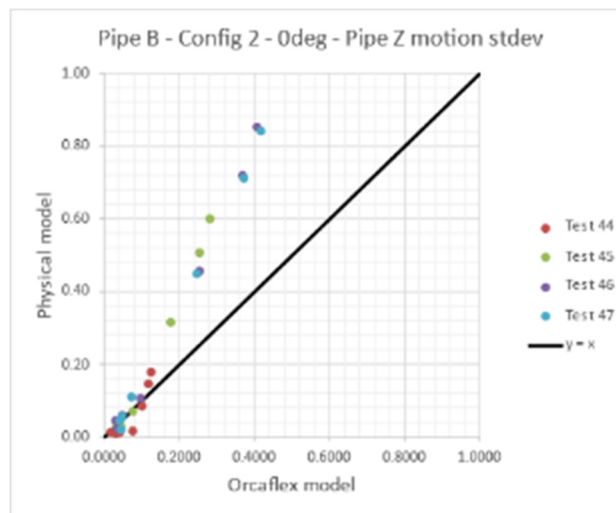


Illustration 4-4: Exemple 2 de tracé comparatif entre modèle physique et modèle numérique.

4.4.3. Pipe B : Comparaison des résultats numériques et physiques

De l'ensemble des tracés de comparaison fournis ci-après, il vient :

- Dans tous les cas, le modèle numérique et le modèle physique présentent les mêmes tendances et les mêmes ordres de grandeur pour tous les paramètres,
- Le modèle numérique prédit très bien les tensions maximales dans les élingues d'ancrage pour tous les cas et le comportement de la conduite pour la configuration d'ancrage 1, c'est-à-dire avec des masses d'ancrage uniquement,

- Pour la configuration d'ancrage en chaîne uniquement, le modèle numérique a tendance à sous-estimer les mouvements de la conduite. Deux causes peuvent expliquer ces écarts. Premièrement, la position initiale de la chaîne n'est pas similaire entre le modèle numérique et le modèle physique. Dans le modèle numérique, la chaîne est rectiligne au début de la simulation alors que dans le modèle physique la position initiale de la chaîne est impactée par l'historique de mouvement du test précédent. Dans un second temps, un coefficient de frottement type a été utilisé pour simuler l'impact du fond du bassin sur la chaîne. Par conséquent, on s'attend à ce qu'une meilleure caractérisation du frottement de la chaîne produise des prédictions numériques plus fiables.

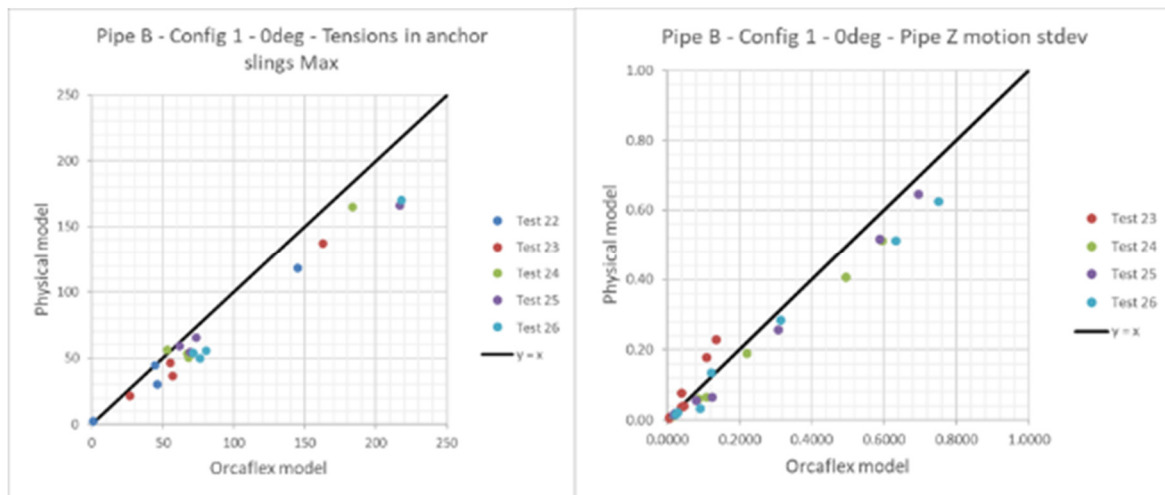


Figure 4-5: Tuyau B – Configuration 1 – houle à 0 deg.

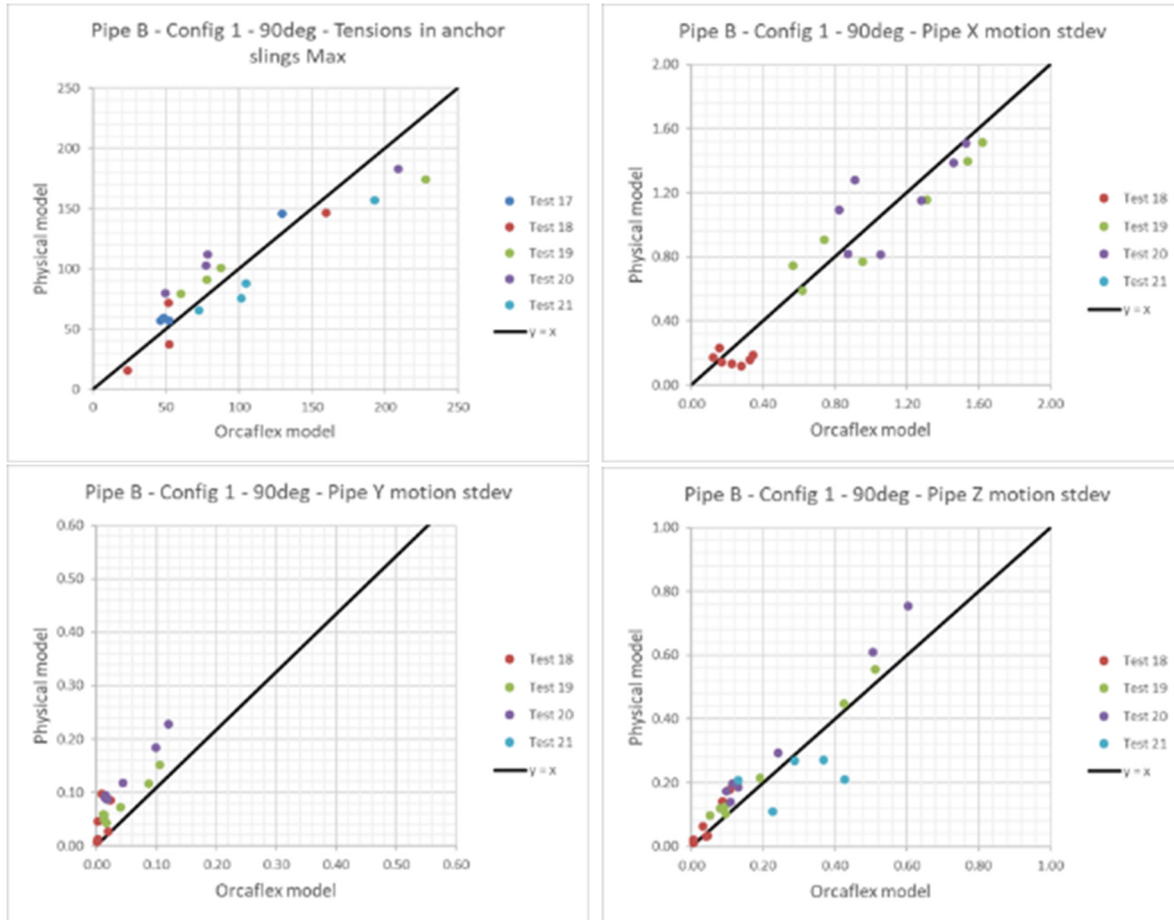


Figure 4-6: Tuyau B – Configuration 1 – houle à 90 deg.

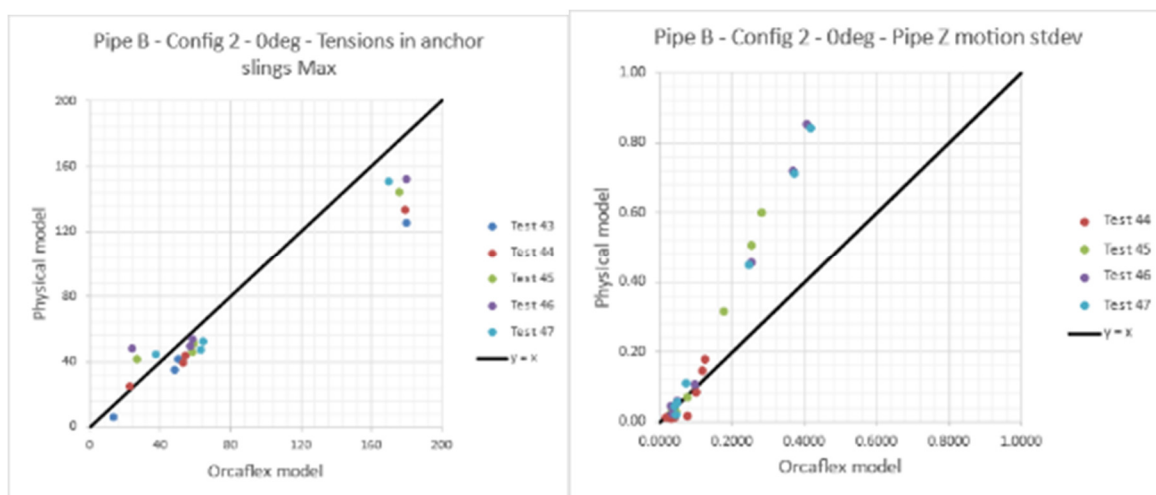


Figure 4-7: Tuyau B – Configuration 2 – houle à 0 deg.

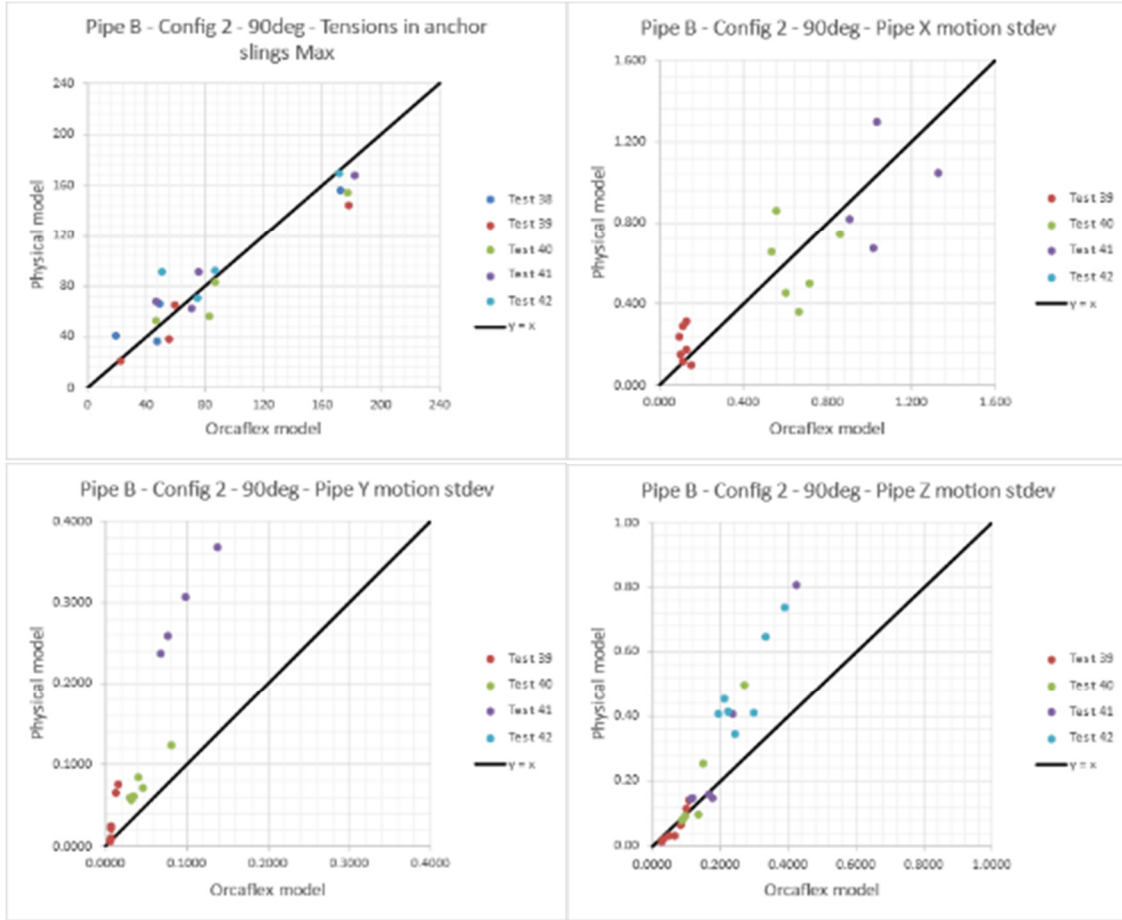


Figure 4-8: Tuyau B – Configuration 2 – houle à 90 deg.

4.4.4. Tuyau A posé sur une bosse : comparaison des résultats numériques et physiques

Pour cette configuration, la comparaison entre le modèle numérique et le modèle physique conduit aux observations suivantes :

- Là encore, le modèle numérique prédit très bien les tensions maximales dans les élingues d'ancrage,
- En ce qui concerne les mouvements de la conduite, même si le modèle numérique et le modèle physique présentent les mêmes tendances, les résultats du modèle numérique présentent plus de divergences que pour l'état du fond marin plat. Cependant, aucune tendance claire ne peut être extraite, tantôt le modèle numérique a tendance à sous-estimer et tantôt à surestimer les résultats.

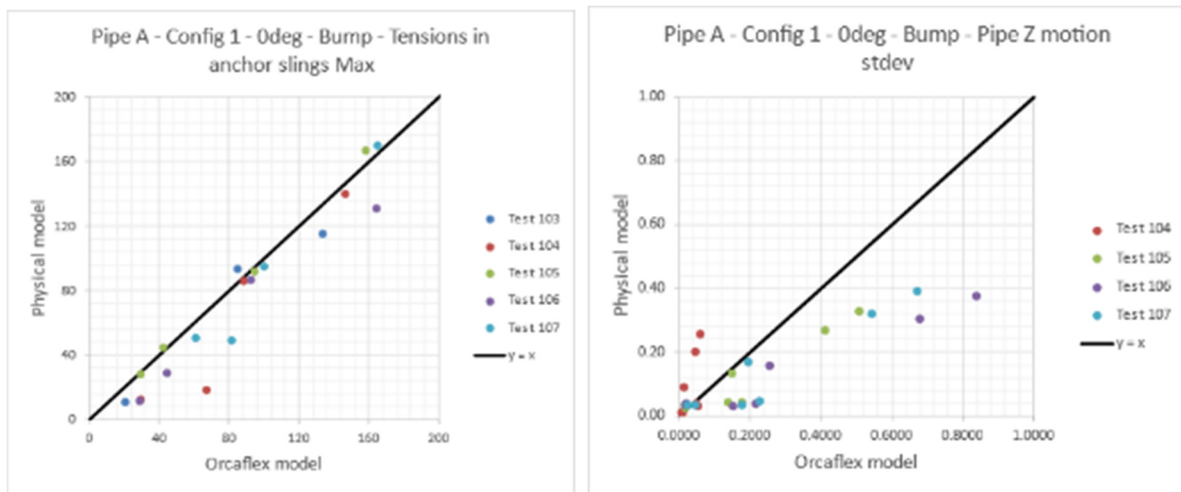


Figure 4-9: Tuyau A posé sur une bosse – Configuration 1 – houle à 0 deg.

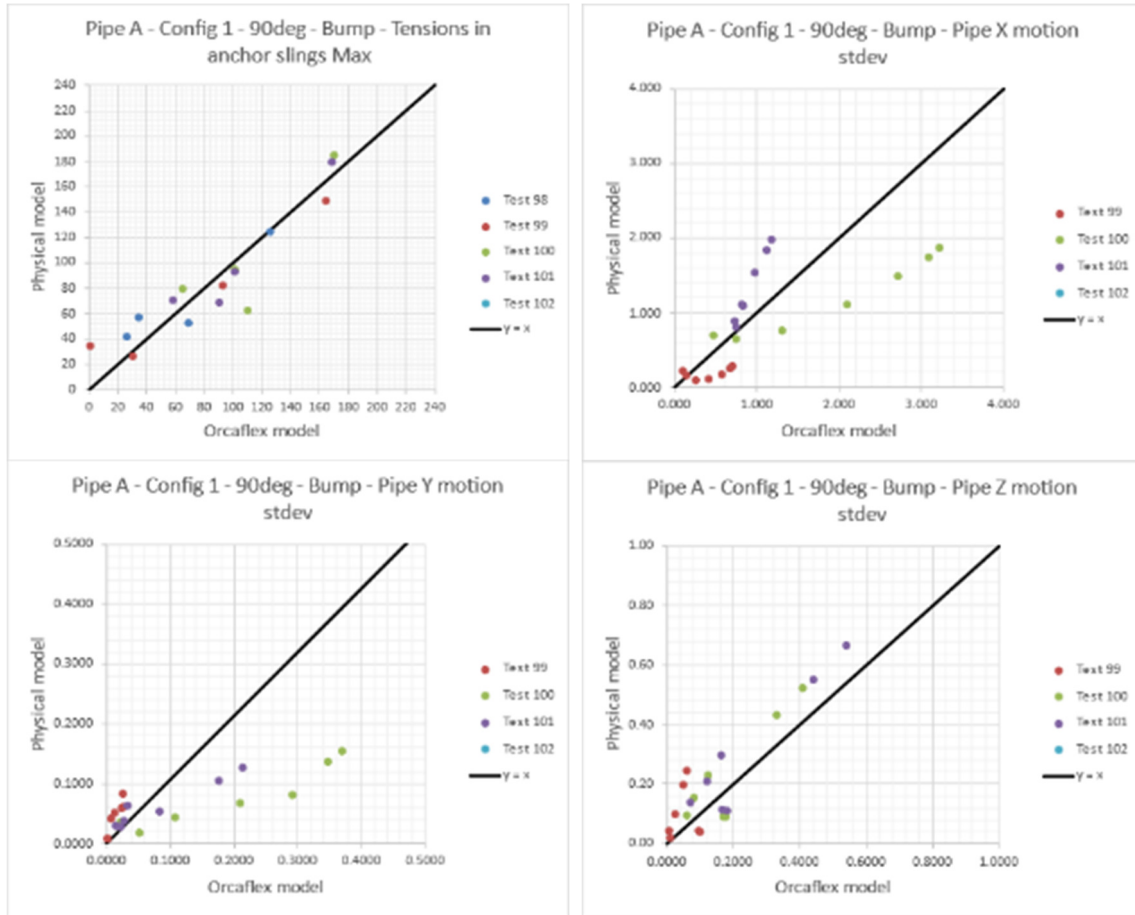


Figure 4-10: Tuyau A posé sur une bosse – Configuration 1 – houle à 90 deg .

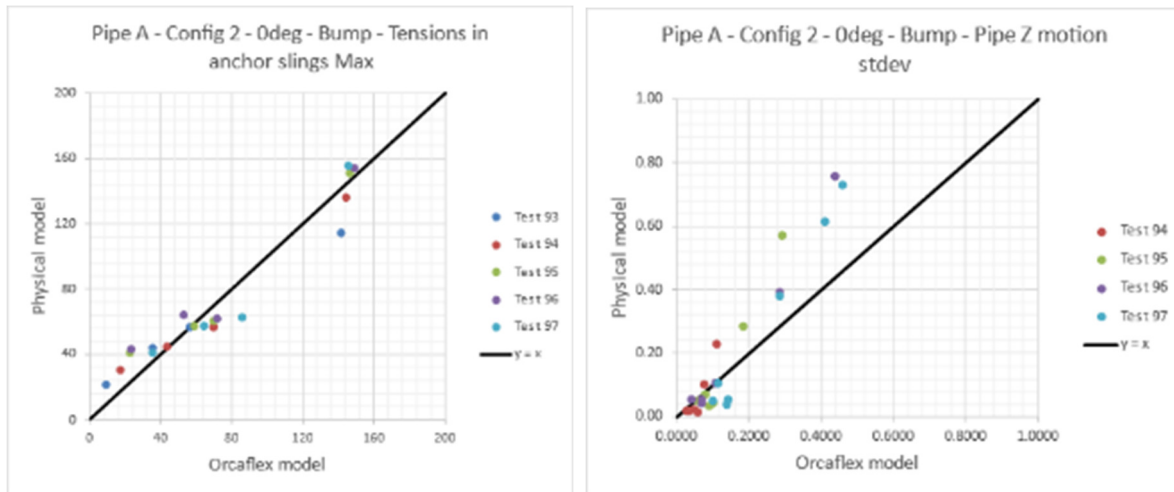


Figure 4-11: Tuyau A posé sur une bosse – Configuration 2 – houle à 0 deg .

4.4.5. Conduite A en conditions endommagées: comparaison des résultats numériques et physiques

Les conditions endommagées ont été testées dans des conditions de houle régulières uniquement.

Pour ces cas, la comparaison entre les résultats du modèle numérique et les mesures du modèle physique illustrées par les figures ci-dessous montre que :

- Le modèle numérique prédit très bien les tensions maximales dans les élingues d'ancrage pour tous les cas,
- En ce qui concerne les mouvements des tuyaux, les tendances et les ordres de grandeur sont les mêmes entre les deux modèles. Cependant, les points sont plus étalés que pour les comparaisons précédentes. Cela pourrait s'expliquer par le fait que lors d'essais réguliers de houle le système a tendance à dériver au cours des essais modifiant les conditions initiales de l'essai suivant et impactant ainsi le comportement de la conduite.

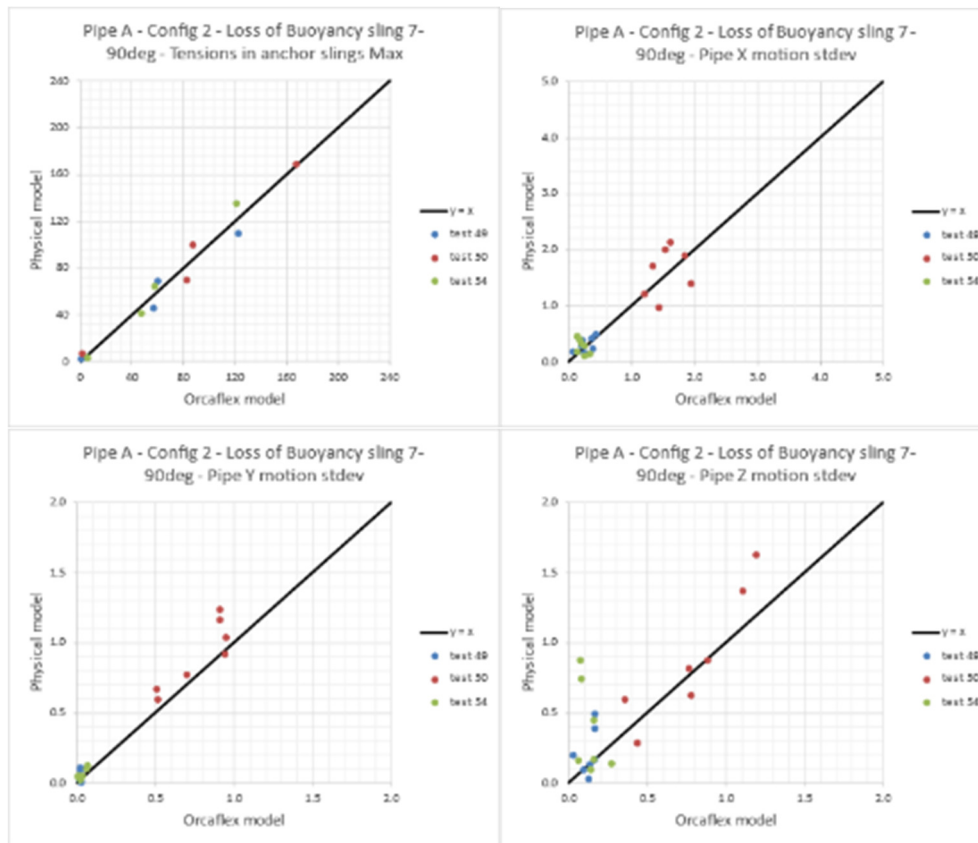


Figure 4-12: Pipe A – élingue perte de flottabilité 7 – Configuration 2 – houle à 90 deg.

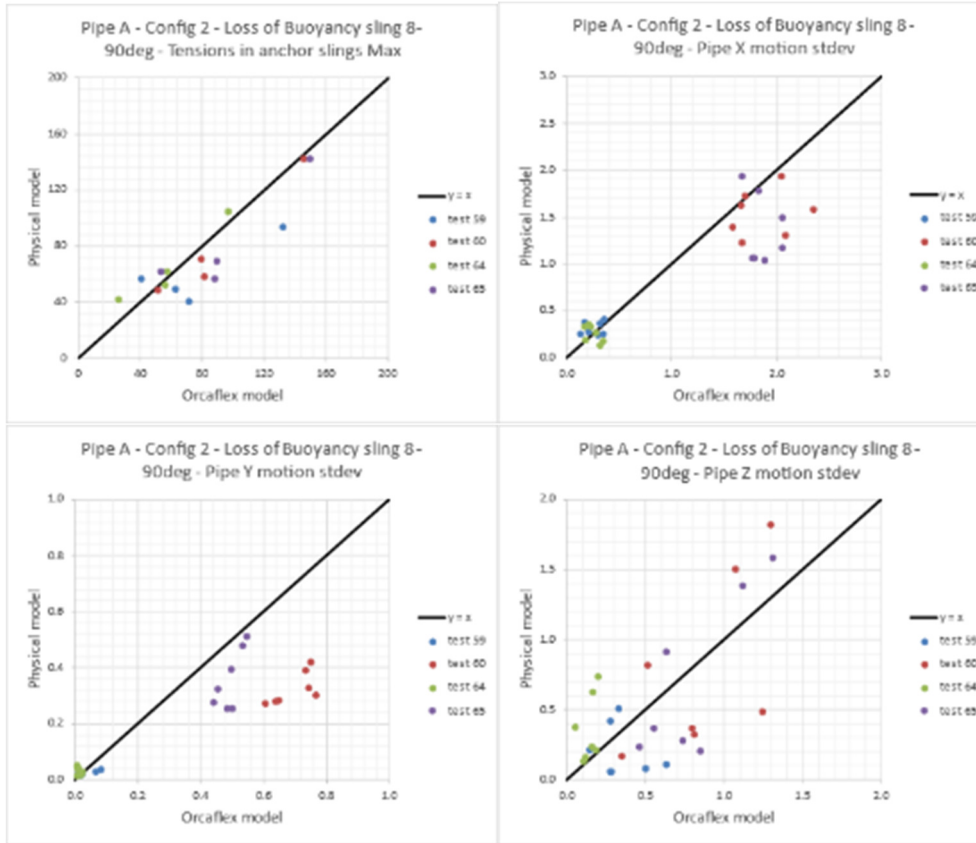


Figure 4-13: Pipe A – élingue perte de flottabilité 8 – Configuration 2 – houle à 90 deg .

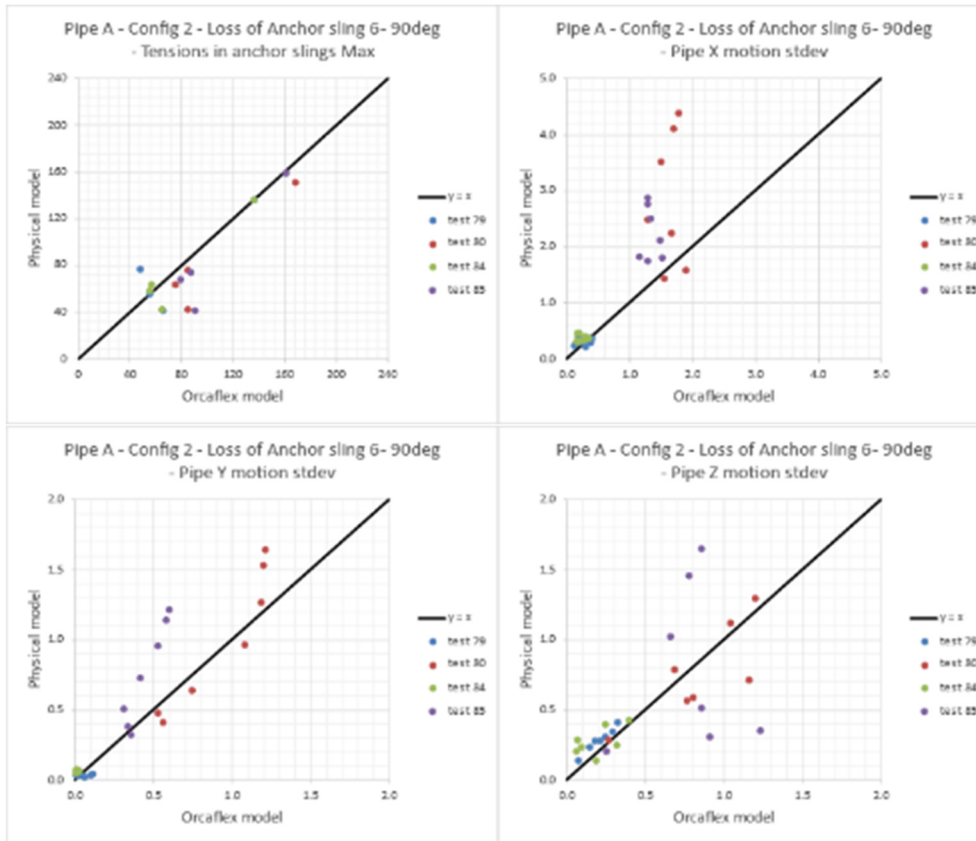


Figure 4-14: Tuyau A – perte de l'élingue d'ancrage 6 – Configuration 2 – houle à 90 deg .

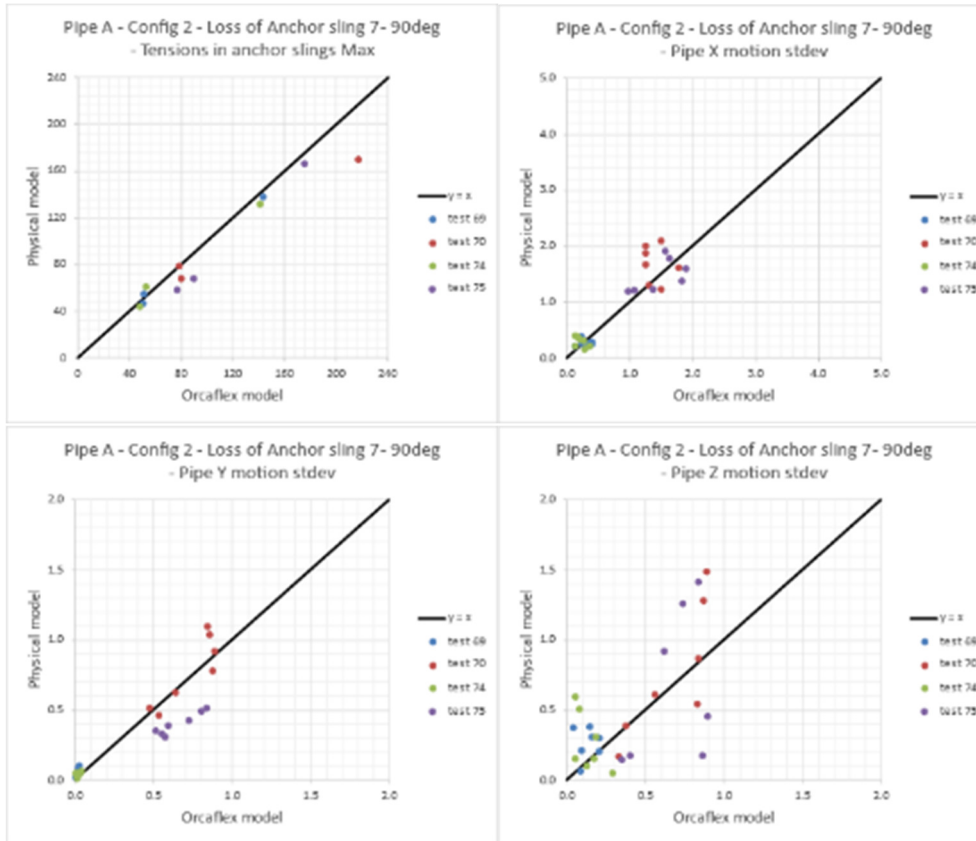


Figure 4-15: Tuyau A – perte de l'élingue d'ancre 7 – Configuration 2 – houle à 90 deg .

Pour des conditions de houle régulière, une comparaison dans le domaine temporel peut être effectuée. Ainsi, pour compléter les observations précédentes, une comparaison dans le domaine temporel est effectuée sur le test n°80. L'essai a été réalisé avec la canalisation A posée sur fond plat en configuration 2, avec chaîne seule, et en considérant la perte de l'élingue d'ancre n°6, troisième élingue à partir de l'extrémité libre de la canalisation.

Cette comparaison est effectuée sur les mouvements 3D de la crépine, les charges de connexion 3D à l'extrémité fixe du tuyau et les tensions axiales dans les élingues d'ancre.

Le modèle numérique et le modèle physique se comparent très bien. Certaines différences peuvent être observées; cependant, les valeurs et l'allure des courbes sont très proches ce qui montre que, d'une part, le modèle numérique prédit bien les valeurs des paramètres d'intérêt et que, d'autre part, le modèle numérique simule bien leurs réponses dynamiques à la houle.

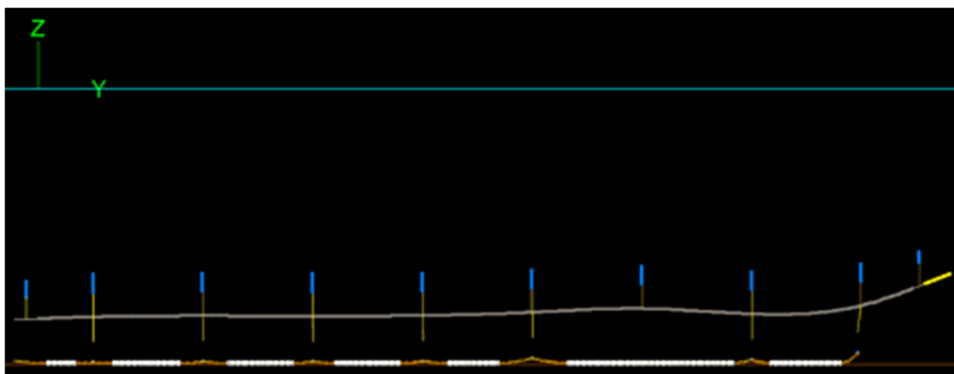


Photo 4-10: Tuyau A – perte de l'élingue d'ancre 6 – Essai n°80 – Etat statique.

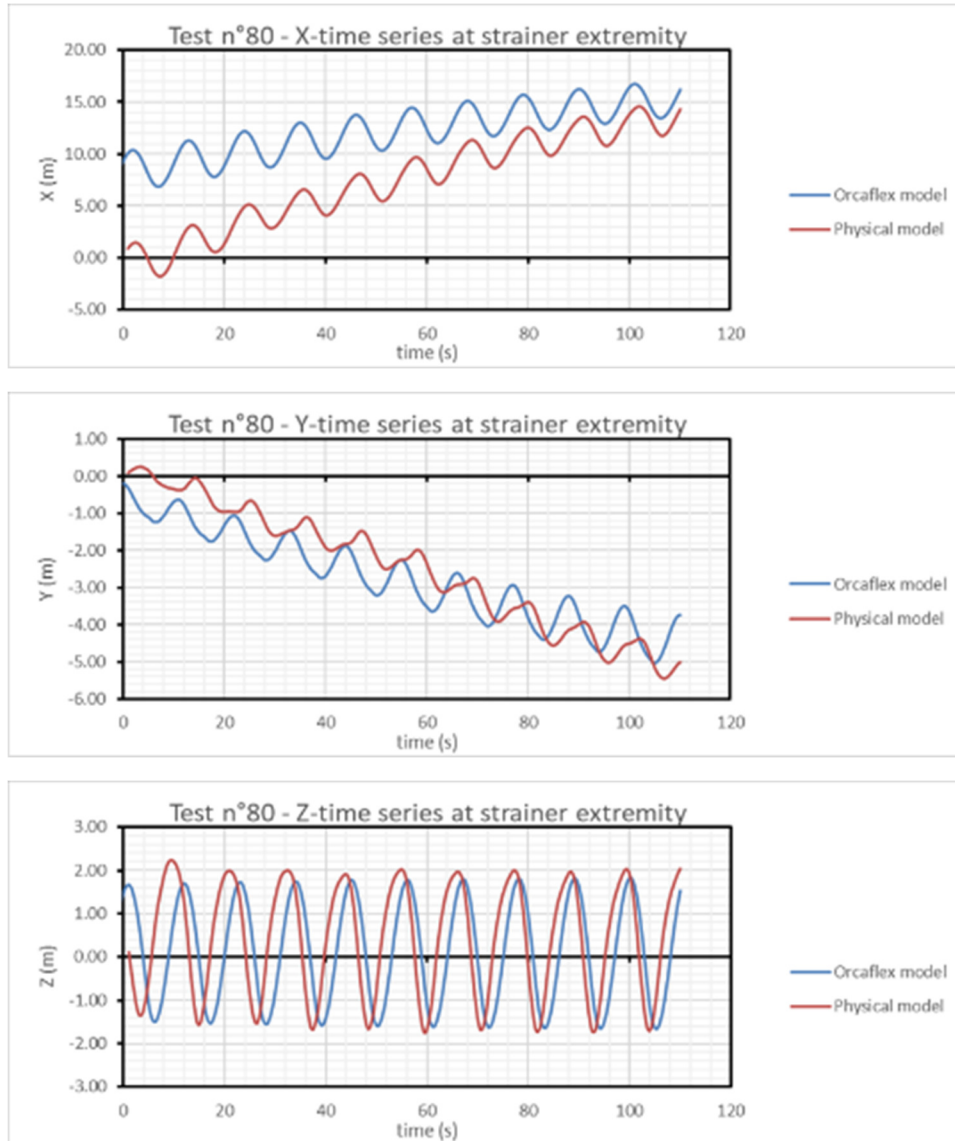


Image 4-16: Tuyau A – Perte de l'élingue d'ancrage 6 – Essai n°80 – Mouvements 3D au niveau de la crépine.

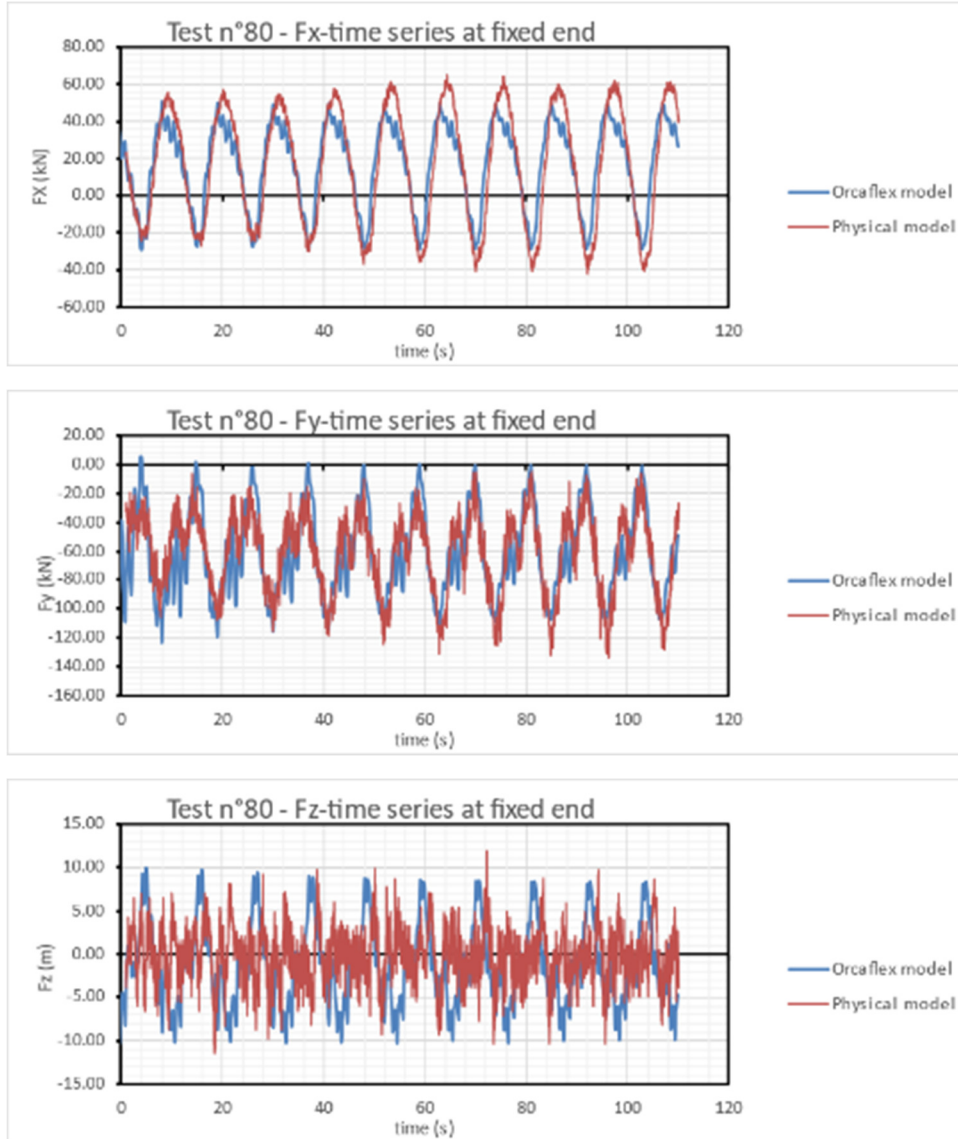


Figure 4-17: Tuyau A – Perte de l'élingue d'ancrage 6 – Essai n°80 – Charges 3D à l'extrémité fixe du tuyau.

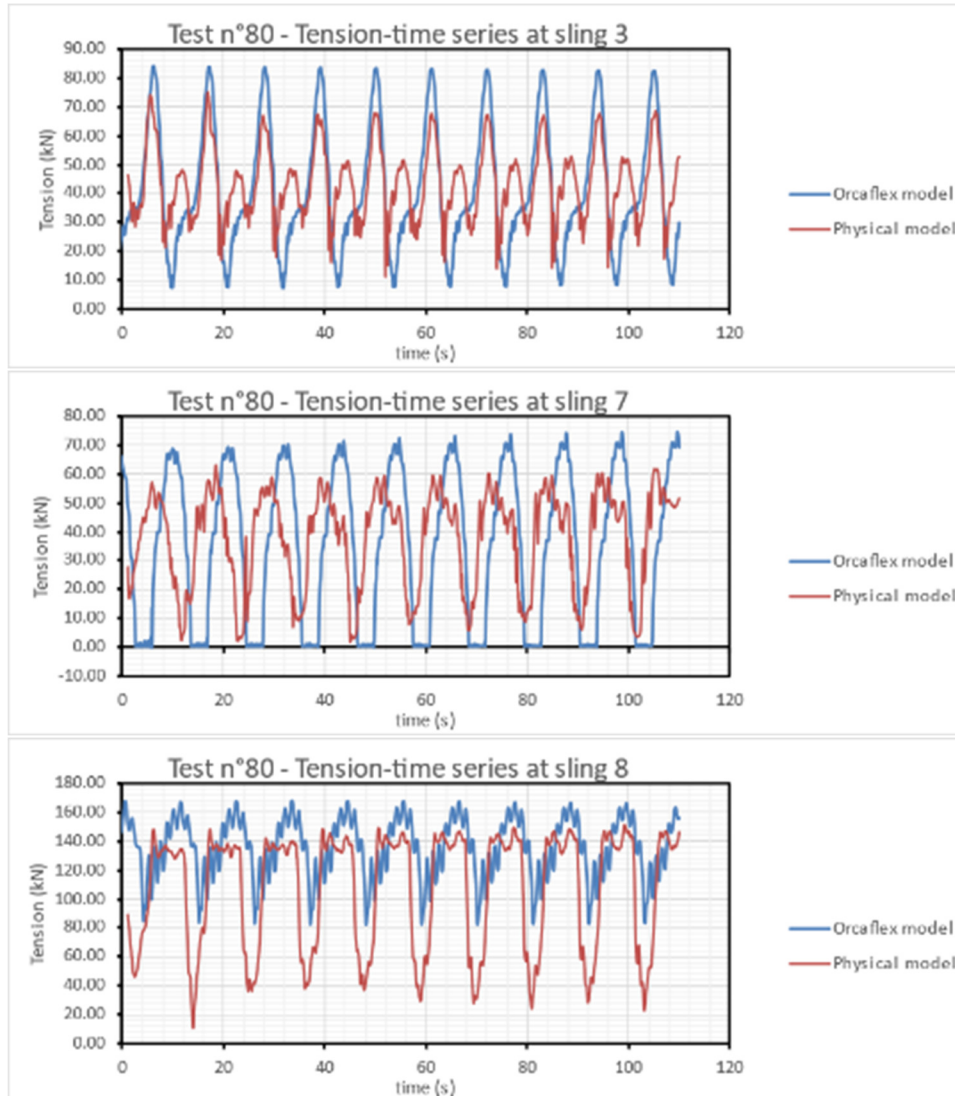


Figure 4-18: Tuyau A – perte de l'élingue d'ancrage 6 – Essai n°80 – tensions dans les élingues d'ancrage.

4.5. Conclusions de la 3ème campagne

La section 4.5.1 résume l'état d'avancement, ainsi que les principaux constats et résultats obtenus lors de cette troisième campagne.

La section suivante examine la voie à suivre pour d'éventuelles études ultérieures.

4.5.1. Points clés de la 3ème campagne

Les objectifs de la troisième campagne étaient :

- De valider la méthodologie de calibration mise en place pour construire un modèle numérique robuste reproduisant les réponses hydrodynamiques et mécaniques du dispositif expérimental en utilisant une nouvelle conduite flexible avec une réponse mécanique différente (allongement sous pression),
- de tester des configurations de flambement non effondré avec cette nouvelle conduite flexible,
- d'étudier la réponse du système de conduite flexible dans des conditions spécifiques telles qu'une élingue cassée (condition endommagée) et en présence d'une bosse dans le fond marin.

Ainsi, la troisième campagne expérimentale comportait les nouveautés suivantes :

- Nouvelle canalisation allongée sous pression : canalisation B
- Seules 2 configurations d'ancrage ont été testées : Configuration 1 (CW uniquement) et Configuration 2 (chaîne uniquement)
- Configuration en état endommagé : retrait successif des AS 6, AS7, B7 et B8 (tuyau A)
- Réponse flexible du système de tuyauterie lorsqu'il est placé sur une bosse (tuyau A)
- Comportement dynamique général avec une configuration initiale rectiligne (tuyau B)
- Comportement dynamique général avec une configuration initiale de flambement (tuyau B)

De plus, les essais préliminaires de caractérisation suivants ont également été menés dans l'air pour compléter la base de données expérimentales utilisée pour la calibration du modèle numérique :

- La masse dans l'eau si la conduite flexible B a été obtenue expérimentalement pour fournir une valeur plus fiable dont la précision est essentielle pour la calibration en EA et EI (c'est-à-dire la position caténaire dans les profils d'élévation z).
- L'allongement du tuyau B a été testé à des pressions spécifiques, pour une charge croissante rebouclant à 0 kN : il a été constaté que l'allongement à 0 kN avant le processus de chargement n'est pas le même que l'allongement à l'étape de déchargement.
- L'allongement du tuyau B a également été testé par des cycles de pression pour des charges données, et là encore un comportement d'hystérésis a été constaté : la valeur initiale d'allongement du tuyau après décompression à 0 bar n'est pas identique à l'allongement avant de subir le cycle de pression.

- Le comportement d'hystérésis du tuyau B (et très probablement aussi du tuyau A, qui n'a pas été étudié) est identifié pour réduire la précision du processus de la calibration EA, car il n'est actuellement pas pris en compte.

Au cours de cette troisième campagne expérimentale, certains phénomènes expérimentaux imprévus sont survenus et sont listés ci-après, dans le double but de la traçabilité et de discuter de l'influence potentielle sur la précision de la calibration du modèle numérique :

- Deux plaques de bois carrées ont été utilisées pour pallier l'irrégularité du fond du bassin BGO, en ajoutant une élévation supplémentaire sous CW2 et CW7, qui peut influencer le mouvement transversal du système de conduite flexible.
- La bouée utilisée pour rendre l'extrémité de lestage B à flottabilité neutre en configuration fixe/fixe a été involontairement conservée pour les configurations fixe/libre alors que la flottabilité de la crépine en tenait déjà compte. Ainsi, il a également été inclus dans le modèle numérique.
- Cette flottabilité supplémentaire a fait s'effondrer verticalement la conduite flexible près de la crépine pour un Pi faible (environ 4 bars) lors du test de contrôle de la rigidité en flexion, empêchant l'calibration de l'EI à ce Pi.
- Au cours des essais de contrôle de la rigidité axiale à l'aide de la configuration de la poulie, la poutre verticale a été soumise à une flexion variable vers le système de conduite flexible en raison de la tension de traction croissante. En conséquence, la précision de l'calibration EA est réduite.
- De même, la position z réelle du QT, censée être sur l'axe médian du tuyau, est légèrement variable d'un QT à l'autre (tendance à pointer vers le bas), ce qui a un impact sur l'calibration de l'EI, car il repose sur le profil d'élévation (rendements EI numérique plus élevé que dans la réalité).

Concernant les rigidités axiales et en flexion de la conduite B et le calage du modèle numérique associé, les conclusions suivantes sont tirées :

- Les courbes du tube B EA représentent un tube s'allongeant sous pression : cet allongement varie de 1% à 2% pour des pressions internes comprises entre 4 et 40bar.
- Les courbes EA pour les pressions internes d'environ 10bar, 20bar et 40bar sont toutes linéaires, tandis que celle caractéristique d'un Pi de 4bar est bilinéaire.
- Les EI obtenus à partir de la calibration numérique sur les profils d'élévation expérimentaux sont susceptibles d'être supérieurs à la valeur réelle compte tenu de la torsion de la conduite flexible (non autorisée dans le modèle numérique) qui fait baisser le QT lors de la comparaison de la position z initiale sur la conduite axe médian. Cela pourrait expliquer une plus petite amplitude de mouvement du tuyau, en particulier à l'extrémité libre du tuyau.

La comparaison systématique entre le modèle numérique et le modèle physique a montré que :

- Le modèle numérique fournit les mêmes tendances et les mêmes ordres de grandeur pour la plupart des cas.
- Le modèle numérique prédit bien les tensions maximales dans les élingues d'ancrage pour tous les cas.

- Le modèle numérique présente plus de divergences concernant les mouvements de la conduite flexible. Cependant, le modèle numérique et le modèle physique montrent de petits mouvements de la conduite aux fréquences des ondes, démontrant le comportement hydrodynamique cohérent de la conduite flexible modélisée. De plus, il est mis en évidence ici que les mouvements prédits pour la configuration d'ancrage 1, avec des poids (CW) uniquement, se comparent mieux au modèle numérique que pour la configuration d'ancrage 2, avec chaîne uniquement. On rappelle que la position initiale de la chaîne n'est pas similaire entre le modèle numérique et le modèle physique. Dans le modèle numérique, la chaîne est rectiligne au début de la simulation alors que dans le modèle physique la position initiale de la chaîne est impactée par l'historique de mouvement du test précédent. De plus, un coefficient de frottement type a été utilisé pour simuler l'impact du fond du bassin sur la chaîne. Par conséquent, on s'attend à ce qu'une meilleure caractérisation du frottement de la chaîne produise des prédictions numériques plus fiables.

Enfin, la méthodologie de calibration développée à partir des résultats des deux premières campagnes a été appliquée aux cas investigués lors de la troisième campagne. L'analyse comparative entre le modèle numérique et le modèle physique tend à démontrer que le logiciel OrcaFlex peut être utilisé pour étudier le comportement hydrodynamique d'un système de conduite flexible et pour concevoir les principaux éléments d'un tel concept. De plus, la méthodologie de calibration développée à partir des résultats d'essais avec le tuyau A a été appliquée avec succès à un autre matériau de tuyau présentant une réponse différente à la variation de pression interne. En conclusion, l'outil numérique développé et la méthodologie de calibration associée peuvent être utilisés pour concevoir un véritable tuyau d'admission flexible pour les futurs systèmes SWAC.

4.5.2. Recommandation pour des Etudes supplémentaires

De manière générale, il a été observé que la calibration du modèle numérique doit de préférence s'appuyer sur une large base expérimentale. Concrètement, il est donc préférable d'effectuer plusieurs répétitions des tests identifiés comme "tests de calibrage" (c'est-à-dire utilisés pour dériver les données d'entrée d'OrcaFlex telles que l'EI, l'EA, le coefficient de frottement du fond marin, ...) plutôt que de tester un grand nombre de configurations.

De plus, plusieurs aspects du modèle numérique pourraient être améliorés en termes de niveau de précision dans les données d'entrée/hypothèses autorisées. La liste suivante est établie à partir des phénomènes expérimentaux observés dans le bassin :

- Comme indiqué dans la section 3.5.2, l'utilisation d'objets Orcaflex 6D Buoy pour la modélisation de la CW donnerait des résultats plus précis, basés sur les positions inclinées observées lorsqu'elles sont soumises au courant.
- De même, il est rappelé que la position initiale de la chaîne d'ancrage avant chaque essai est inconnue du logiciel et supposée rectiligne. En réalité, cette position initiale est modifiée par les incertitudes expérimentales et l'historique des mouvements des tests précédents. Un repositionnement méticuleux de la chaîne entre chaque test ou un système de suivi de mouvement, combiné à une caractérisation approfondie du frottement de la chaîne donnerait un déplacement transversal plus fiable pour les systèmes de conduite flexible utilisant une chaîne dans leur configuration d'ancrage.

- De la même manière, autoriser la torsion au niveau de la conduite éviterait les divergences de données dues à ce phénomène, comme noté lors de la calibration EI.
- Une caractérisation approfondie de l'hystérésis de la conduite flexible testée permettrait une estimation plus précise, et donc une calibration de l'EA.

5. Conclusion

L'objectif de cette étude était d'étudier la faisabilité d'utiliser le logiciel OrcaFlex pour modéliser et concevoir une conduite flexible SWAC. Plus précisément, les étapes suivantes ont été suivies :

- Production d'une base de données expérimentale à travers la réalisation de 3 campagnes expérimentales sur le bassin BGO FIRST d'Océanide.
- Conception et optimisation du système de conduite flexible sur la base de sa réponse hydrodynamique expérimentale.
- Calibration d'un modèle numérique avec OrcaFlex et démonstration de l'adéquation de ce logiciel pour un tel projet.

Chaque campagne expérimentale était guidée par des objectifs spécifiques qui sont rappelés ci-après :

- 1^{ère} campagne : Etude du comportement d'un système de conduite flexible pour calibrer un modèle numérique avec un prototype simplifié fixé au fond du bassin pour affiner le design conceptuel.
- 2^{ème} campagne : Test pour une conception plus réaliste incluant une crépine à l'extrémité libre du système, et des configurations d'ancrage adéquates.
- 3^{ème} campagne : Etude de cas particuliers tels que l'utilisation d'une nouvelle conduite flexible présentant une réponse mécanique différente, le comportement sur fond marin non plat et le comportement en cas de rupture d'élingue.

La liste suivante résume les principaux concepts à considérer lors de la conception et du raffinement du design :

- Maintenir le tuyau flexible à une certaine distance du fond marin avec des modules flottants pour éviter les dommages causés par le frottement.
- Optimiser la distribution des bouées pour à la fois éviter les événements de relâchement dans les élingues et minimiser le nombre de bouées pour des raisons économiques.
- S'assurer de la connaissance de la réponse mécanique de la conduite flexible sous pression (si non précisée par les dispositions) par des essais préliminaires expérimentaux.
- Préférer plusieurs répétitions de tests de caractérisation pour réduire l'incertitude des données d'entrée dans le logiciel utilisé pour le modèle numérique (c'est-à-dire, EI ; EA, coefficient de frottement du fond marin) plutôt que de tester un grand nombre de configurations.
- Déterminer la tension de conception et le décalage maximal de la position du tuyau, respectivement avec des points d'ancrage fixes et avec des composants d'ancrage modulaires (c'est-à-dire un système CW empilable) par exemple.
- Tester ou étudier la réponse du système de conduite flexible dans des situations spécifiques telles que :
 - Elingue cassée
 - Évolution d'une déformation locale (c'est-à-dire, un flambement d'une conduite) à travers un cycle de pression ou soumis à diverses conditions de mer
 - Bosses sur le fond marin
 - Effet de la présence du filtre à l'extrémité libre du tuyau

- Amplification potentielle de l'amplitude du mouvement du tuyau à l'extrémité libre du tuyau

La méthodologie de calibration du modèle numérique du système de conduite flexible avec OrcaFlex comprend la calibration des grandeurs physiques suivantes :

- La calibration de la rigidité axiale de la conduite flexible en fonction de la pression interne (en termes de déformation [%]/tension de paroi [kN])
- La calibration de la rigidité en flexion de la conduite flexible en fonction de la pression interne
- Les coefficients de frottement sur le fond marin des éléments d'ancrage
- Les coefficients hydrodynamiques de la conduite flexible en cas de mouvement transversal autorisé

Le processus de calibration actuel est basé sur les tests de caractérisation suivants, qui doivent être répétés pour une meilleure précision de saisie des données :

- EA : essai de rigidité axiale sous l'eau et caractérisation de la tension axiale sous l'eau
- EI : suivi sous l'eau des profils d'élévation des conduite flexible en fonction de la pression interne ou du test d'extinction (considérez les fréquences naturelles X)
- μ_s : essai sous-marin de traction axiale et transversale liée au déplacement pour chaque élément d'ancrage
- C_A et C_D : enregistrement du mouvement transversal dans diverses conditions de mer

Les principales conclusions de chaque campagne expérimentale sont résumées comme suit :

- 1ère campagne :
 - Réponse globale du prototype de système de conduite flexible simplifié, lorsqu'il est soumis à des vagues régulières
 - Détermination de la tension de conception
 - Validation de la taille et de l'étalement des bouées
 - Première définition de la méthodologie de calage du modèle numérique
 - Constatation d'un état hyperstatique du système de conduite flexible dû à l'état de fixation aux deux extrémités et au fond du bassin
- 2ème campagne :
 - Réponse globale du système de conduite flexible comprenant une crépine à l'extrémité libre et une configuration d'ancrage, lorsqu'il est soumis à la fois à des vagues régulières et irrégulières
 - Tenter d'étudier la réponse spécifique du système de conduite flexible en présence d'un flambement --> échec à former un flambement sans effondrement avec le premier tuyau flexible (c.-à-d. raccourcissement sous pression)
- 3ème campagne :
 - Réponse globale du système de conduite flexible avec la nouvelle conduite flexible (c'est-à-dire s'allongeant sous pression sous des vagues irrégulières)
 - Réponse spécifique du système de conduite flexible avec le raccourcissement de la conduite sous pression lorsqu'il est placé sur une bosse
 - Réponse spécifique du système de tuyau flexible avec le raccourcissement du tuyau sous pression lorsqu'il y a une élingue cassée

En conclusion, le projet EuroSWAC a permis d'appréhender les points suivants listés ci-après :

- Procédure de conception et de raffinement de la section de conduite flexible SWAC
- Ordre de grandeur des extrants de la conception du système
- Détermination du contenu typique de la matrice d'essai à utiliser pour l'étude du comportement hydrodynamique d'un système de conduite flexible et de la calibration de son modèle numérique (c'est-à-dire produire une base de données expérimentale utile)
- Liste des tendances à prendre en compte dans l'optimisation de la conception du système expérimental de conduite flexible (c.-à-d., comportement typique du système de conduite flexible dont il faut se méfier ou caractéristiques du fond marin à prendre en compte lors de la conception d'un système de conduite flexible)
- Méthodologie de calibration pour la construction de modèles numériques de systèmes de conduite flexible
- Validation de l'adéquation du logiciel Orcaflex à ce type de projet, la limite réside dans le niveau de précision des données d'entrée et des hypothèses de modélisation envisagées (plus la précision des données d'entrée est élevée, plus les sorties numériques sont proches de la réalité)