



HAL
open science

Suivi en service de la durée de vie des ombilicaux dynamiques pour l'éolien flottant

Charles Spraul

► **To cite this version:**

Charles Spraul. Suivi en service de la durée de vie des ombilicaux dynamiques pour l'éolien flottant. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. École centrale de Nantes, 2018. Français. NNT : 2018ECDN0007 . tel-01951659

HAL Id: tel-01951659

<https://theses.hal.science/tel-01951659>

Submitted on 11 Dec 2018

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

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

Thèse de Doctorat

Charles SPRAUL

*Mémoire présenté en vue de l'obtention
du grade de Docteur de l'École Centrale de Nantes
Sous le label de l'UNIVERSITÉ BRETAGNE LOIRE*

École doctorale : Science Pour l'Ingénieur – SPI (N°602)

Spécialité : Mécanique des Milieux Fluides

*Unité de recherche : Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique
(UMR6598)*

Soutenue le 12 avril 2018

Suivi en service de la durée de vie des ombilicaux dynamiques pour l'éolien flottant

JURY

Présidente : **AUBRUN Sandrine**, Professeur des Universités, Centrale Nantes

Rapporteurs : **KIMMOUN Olivier**, Maître de Conférences, Centrale Marseille
PUEL Guillaume, Professeur des Universités, Centrale Supélec

Examineur : **MOLIN Bernard**, Collaborateur bénévole, Centrale Marseille

Invité: **SCHOEFS Franck**, Professeur des Universités, Université de Nantes

Directeur de thèse : **CARTRAUD Patrice**, Professeur des Universités, Centrale Nantes
Co-encadrant de thèse : **BERHAULT Christian**, Docteur, Centrale Nantes

Résumé

Le travail présenté vise à mettre en place une méthodologie pour le suivi en service de la fatigue mécanique pour l'ombilical dynamique d'un système EMR flottant. L'approche envisagée consiste à simuler à l'aide d'outils numériques la réponse de l'ombilical aux cas de chargement observés sur site. Le post-traitement des résultats de ces simulations devant permettre d'accéder à différentes quantités d'intérêt en tout point du câble. Pour quantifier et réduire l'incertitude sur la réponse calculée de l'ombilical ce dernier doit être instrumenté. Un certain nombre de paramètres du modèle numérique feront alors l'objet d'une calibration régulière pour suivre l'évolution des caractéristiques de l'ombilical susceptibles d'évoluer.

Dans ce contexte ce manuscrit présente et compare différentes méthodes pour analyser la sensibilité de la réponse de l'ombilical aux paramètres susceptibles d'être suivis. L'objectif est notamment d'orienter le choix des mesures à mettre en œuvre. L'analyse en composantes principales permet pour cela d'identifier les principaux modes de variation de la réponse de l'ombilical en réponse aux variations des paramètres étudiés. Différentes approches sont également envisagées pour la calibration des paramètres suivis, avec en particulier le souci de quantifier l'incertitude restante sur le dommage. Les méthodes envisagées sont coûteuses en nombre d'évaluations du modèle numérique et ce dernier est relativement long à évaluer. L'emploi de méta-modèles en substitution des simulations numériques apparaît donc nécessaire, et là encore différentes options sont considérées. La méthodologie proposée est appliquée à une configuration simplifiée d'ombilical dans des conditions inspirées du projet FLOATGEN.

Mots clés

Fatigue, Ombilical dynamique, Éolien flottant, Incertitudes, Calibration, Méta-modèle

Abstract

The present work introduces a methodology to monitor fatigue damage of the dynamic power cable of a floating wind turbine. The suggested approach consists in using numerical simulations to compute the power cable response at the sea states observed on site. The quantities of interest are then obtained in any location along the cable length through the post-treatment of the simulations results. The cable has to be instrumented to quantify and to reduce the uncertainties on the calculated response of the power cable. Indeed, some parameters of the numerical model should be calibrated on a regular basis in order to monitor the evolution of the cable properties that might change over time.

In this context, this manuscript describes and compares various approaches to analyze the sensitivity of the power cable response to the variations of the parameters to be monitored. The purpose is to provide guidance in the choice of the instrumentation for the cable. Principal components analysis allows identifying the main modes of power cable response variations when the studied parameters are varied. Various methods are also assessed for the calibration of the monitored cable parameters. Special care is given to the quantification of the remaining uncertainty on the fatigue damage. The considered approaches are expensive to apply as they require a large number of model evaluations and as the numerical simulations durations are quite long. Surrogate models are thus employed to replace the numerical model and again different options are considered. The proposed methodology is applied to a simplified configuration which is inspired by the FLOATGEN project.

Key Words

Fatigue, Dynamic power cable, Floating wind turbines, Reliability, Calibration, Surrogate modelling

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Patrice Cartraud, mon directeur de thèse, pour avoir pris le temps de bien comprendre les problématiques diverses auxquelles j'ai été confronté, et ce alors que certaines sortaient de son champ d'expertise initial. Ses conseils m'ont aidé à prendre davantage de recul sur mon travail. Il m'a poussé à mieux expliquer, et donc à mieux comprendre, les outils auxquels j'ai pu faire appel. Je le remercie encore pour sa relecture de ce manuscrit qu'il a grandement aidé à faire évoluer vers plus de clarté.

Je remercie également chaleureusement Christian Berhault qui m'a encadré et qui a été à l'initiative du sujet de thèse. Son expertise sur les problématiques des liaisons fond-surface ainsi que sa large connaissance du contexte marin et des projets de recherche en cours sur les EMRs m'ont été précieuses.

Un grand merci à Thomas Soulard qui sans m'encadrer officiellement a été présent et s'est impliqué tout au long de ma thèse. Ses conseils et nos échanges sur nos problématiques communes m'ont été fort utiles.

Je remercie également Vincent Arnal, avec qui j'apprécie toujours de travailler et d'échanger des idées, et Hong Duc Pham, avec qui il a été plaisant de pouvoir collaborer. Je leur souhaite tous deux bon courage pour leur thèses respectives.

Je remercie évidemment l'ensemble des membres de mon jury et en particulier les rapporteurs, Guillaume Puel et Olivier Kimmoun, pour leur travail de relecture et leurs commentaires enrichissants, ainsi que la présidente du jury, Sandrine Aubrun. Merci aussi aux membres de mon comité de suivi de thèse, Bernard Molin et Franck Schoefs dont les conseils lors de ces étapes importantes ont été très utiles et appréciés.

Je souhaite également remercier la région Pays de la Loire et le projet de recherche FLOATGEN pour le financement de mes travaux de thèse.

Il va sans dire que je remercie mes collègues du LHEEA pour la très bonne ambiance qui a entouré ces 3 années. En particulier merci à Pierre-Yves avec qui a longuement partagé mon bureau, ainsi qu'à Sukanta et à Shun-Mei.

Au-delà du labo, je remercie toute l'équipe du RU pour les débats animés à chaque repas, et en particulier ceux du TU : Clément, Paul-Emile, Victor, Loïc, Mathieu, Louis et les autres pour les innombrables cafés-coinches.

Merci aussi aux volleyeurs de Centrale Nantes, les nouveaux comme les anciens, et à Mathieu et Thomas qui comme moi se sont attardé dans l'équipe.

Merci à tous les copains qui m'ont soutenu moralement dans les coups durs.

Je suis très reconnaissant à Marie pour son aide tout au long de ma thèse et jusque dans les derniers instants de la préparation de la soutenance.

Je remercie enfin ma famille pour son soutien : en particulier Papa, Maman, Lili ainsi que mes grands parents.

Enfin, au moment d'achever la rédaction de ce manuscrit, mes pensées vont vers mon frère, Mathias.

Table des matières

Table des illustrations	8
1 Introduction.....	13
1.1 Contexte	13
1.2 Méthodes pour le calcul de la durée de vie	16
1.3 Bio-colonisation des structures marines	21
1.4 Méthodologie proposée pour le suivi en service	23
1.5 Problématiques liées à la calibration	32
2 Configurations étudiées et modélisation	35
2.1 Configurations étudiées	35
2.2 Modèle numérique.....	38
2.3 Calcul de la contrainte locale	40
2.4 Calcul du dommage	47
2.5 Modèle stochastique pour les conditions d'environnement	47
2.6 Paramétrisation des caractéristiques du câble liées à la bio-colonisation	51
3 Utilisation d'un méta-modèle en remplacement de la simulation numérique	55
3.1 Principes et objectifs	55
3.2 Processus de construction.....	56
3.3 Mesure de l'erreur.....	57
3.4 Sorties considérées.....	58
3.5 Application pratique : développement sur chaos polynomial	59
3.6 Application pratique : krigeage	61
3.7 Application pratique : réseaux de neurones artificiels.....	63
3.8 Prise en compte des paramètres environnement.....	66
3.9 Conclusions.....	72
4 Analyse préliminaire de la réponse de l'ombilical.....	75
4.1 Estimation de la durée de vie a priori	75
4.2 Sélection de cas de chargement critiques.....	77

4.3	Estimation de l'incertitude sur le dommage	80
4.4	Choix d'une approche pour les analyses de sensibilité	81
4.5	Sensibilité du dommage aux paramètres du câble	89
4.6	Analyse de sensibilité pour la configuration 72m	92
4.7	Conclusions.....	93
5	Analyse en composantes principales de la réponse de l'ombilical	95
5.1	Présentation de l'analyse en composantes principales	95
5.2	Application au dommage	97
5.3	Choix de mesures pertinentes pour la calibration	102
5.4	Application à la configuration 72m	108
5.5	Conclusions.....	111
6	Calibration sur des essais numériques	113
6.1	Simulation des mesures pour les essais de calibration	113
6.2	Sources d'erreur considérées	115
6.3	Mesure de l'efficacité de la calibration	116
6.4	Essais de calibration par optimisation.....	118
6.5	Essais de calibration avec un méta-modèle inverse.....	122
6.6	Essais de calibration basée sur l'approche bayésienne.....	126
6.7	Calibration de l'erreur méta-modèle / mesures avec l'approche bayésienne.....	131
6.8	Prise en compte des paramètres non-calibrés.....	134
6.9	Comparaison de l'influence des différentes mesures utilisées.....	138
6.10	Utilisation des caractéristiques fréquentielles des signaux	141
6.11	Influence du nombre d'états de mer employés pour la calibration	143
6.12	Conclusions.....	145
7	Conclusions.....	147
7.1	Récapitulatif des travaux présentés	147
7.2	Recommandations.....	149
7.3	Perspectives.....	150

Références	153
Annexes.....	158
A. Sensibilité de la réponse de l'ombilical aux conditions imposées au niveau du HOP.....	158
B. Étude de convergence.....	159
C. Analyse de la contribution des différents cas de chargement au dommage moyen.....	161
D. Analyse de sensibilité sur les paramètres environnementaux.....	164
E. Analyse de sensibilité sur les paramètres structurels	165

Table des illustrations

Figure 1.1 : Vue d'artiste d'un ombilical dynamique d'éolienne flottante ©NREL	15
Figure 1.2 : Exemple de section d'ombilical dynamique	17
Figure 1.3 : Exemple de courbe de fatigue	18
Figure 1.4 : Exemple de découpage en blocs selon la contribution à l'espérance du dommage... ..	20
Figure 1.5 : Bio-colonisation sur lignes d'ancrage ©SEM-REV	22
Figure 1.6 : Monitoring basé sur la mesure de la contrainte.....	24
Figure 1.7 : Monitoring basé sur la mesure de la courbure.....	24
Figure 1.8 : Monitoring basé sur la mesure des conditions d'environnement et du mouvement du flotteur, et la calibration des caractéristiques de l'ombilical	25
Figure 1.9 : Déroulé de la méthodologie proposée pour le suivi en service	28
Figure 1.10 : Estimation de la durée de vie restante	31
Figure 2.1 : Configuration caténaire	35
Figure 2.2 : Configuration "Lazy Wave"	35
Figure 2.3 : configuration "Pliant Wave"	35
Figure 2.4 : Configuration "Steep Wave"	35
Figure 2.5 : Configuration 36m	37
Figure 2.6 : Configuration 72m	37
Figure 2.7 : Différents types de contacts (Raouf 1995)	41
Figure 2.8 : Section d'un câble monocouche, définition des notations (Papailiou 1997)	43
Figure 2.9 : Évolution de la contrainte de friction en réponse à un cycle de courbure	44
Figure 2.10 : Exemples de distributions des paramètres environnementaux.....	49
Figure 2.11 : Distributions 2D des paramètres environnementaux, effet de la corrélation	50
Figure 2.12 : Orientation des axes du repère global, propagation de la houle vers -22,5°	50
Figure 2.13 : Schéma de la répartition de la bio-colonisation sur le câble et les modules	51
Figure 2.14 : Distribution marginale des paramètres liés à la bio-colonisation	53
Figure 3.1 : Évolution de l'erreur du méta-modèle en fonction du nombre de simulations utilisées dans le jeu de données.....	60
Figure 3.2 : Erreur des méta-modèles krigeage et chaos polynomial sur le dommage	62
Figure 3.3 : Histogramme de l'erreur réduite sur le dommage estimé par krigeage	63
Figure 3.4 : Fonctionnement d'un neurone artificiel.....	64
Figure 3.5 : Architecture d'un réseau de neurone avec une seule couche intermédiaire	64
Figure 3.6 : Erreur des méta-modèles réseau de neurones et chaos polynomial sur le dommage	65
Figure 3.7 : Modèle pour un cas de chargement fixe	67

Figure 3.8 : Modèle incluant les paramètres environnementaux	67
Figure 3.9 : Évolution de l'erreur du méta-modèle en fonction du nombre de simulations utilisées dans le jeu de données, modèle complet	67
Figure 4.1 : Répartition des simulations réalisées, localisation des 10% supérieurs en probabilité dommage et contribution	77
Figure 4.2 : Partitionnement des 10% de cas les plus critiques en fonction des paramètres environnementaux	78
Figure 4.3 : Analyse OAT, cas critique CC1.....	83
Figure 4.4 : Indices de Sobol cas critique CC1.....	84
Figure 4.5 : Convergence du calcul des indices de Sobol.....	84
Figure 4.6 : Analyse ANCOVA cas critique CC1, erreur du méta-modèle (gauche) et indices (droite)	87
Figure 4.7 : Analyse OAT, différences selon les cas critiques (CC1 à gauche, CC2 à droite).....	89
Figure 4.8 : Comparaison des indices ANCOVA du dommage sur les 3 cas critiques.....	91
Figure 4.9 : Comparaison des indices ANCOVA du dommage sur les cas critiques, configuration 72m.....	92
Figure 5.1 : Exemple d'application de la PCA.....	95
Figure 5.2 : Dommage moyen sur les cas CC1, CC2 et CC3.....	98
Figure 5.3 : Modes PCA du dommage sur le cas CC1.....	98
Figure 5.4 : Modes PCA du dommage sur le cas CC2.....	98
Figure 5.5 : Modes PCA du dommage sur le cas CC3.....	98
Figure 5.6 : Erreur des méta-modèles pour les trois premiers modes PCA du dommage, cas CC199	
Figure 5.7 : Indices ANCOVA pour les modes PCA du dommage.....	101
Figure 5.8 : Modes PCA de la réponse de l'ombilical, cas CC1	103
Figure 5.9 : Indices ANCOVA des 2 premiers modes PCA de la réponse de l'ombilical, cas CC1..	104
Figure 5.10 : Modes PCA de la réponse de l'ombilical, cas CC2	105
Figure 5.11 : Modes PCA de la réponse de l'ombilical, cas CC3	106
Figure 5.12 : Indices ANCOVA pour les modes PCA de la réponse de l'ombilical.....	107
Figure 5.13 : Indices ANCOVA pour les modes PCA du dommage, configuration 72m.....	109
Figure 5.14 : Indices ANCOVA pour les modes PCA de la réponse de l'ombilical, configuration 72m	110
Figure 6.1 : Répartition des cas de mesures dans le repère Hs-Tp.....	113
Figure 6.2 : Différentes sources de l'erreur	115
Figure 6.3 : Exemple de calibration des paramètres par optimisation.....	121
Figure 6.4 : Exemple de calibration des paramètres par méta-modèle inverse.....	125

Figure 6.5 : Exemple de calibration des paramètres par l'approche bayésienne.....	128
Figure 6.6 : Exemple de calibration des paramètres par l'approche bayésienne en calibrant l'erreur méta-modèle - mesures	132
Table 2.1 : Caractéristiques du câble et des modules de flottabilité	38
Table 2.2 : Différences entre les deux configurations étudiées	38
Table 2.3 : Contributions à la contrainte totale, configuration 36m	46
Table 2.4 : Contributions à la contrainte totale, configuration 72m	46
Table 2.5 : Distributions marginales des paramètres environnementaux	48
Table 2.6 : Intervalles de variation des paramètres du câble liés à la bio-colonisation	53
Table 3.1 : Comparaison de l'erreur NRMSE entre le krigeage et le développement sur chaos polynomial.....	62
Table 3.2 : Comparaison de l'erreur NRMSE entre le réseau de neurones artificiels et le développement sur chaos polynomial	65
Table 3.3 : Influence du degré maximal des termes du développement sur l'erreur	68
Table 3.4 : Influence du nombre maximal de termes dans le développement sur l'erreur	68
Table 3.5 : Comparaison de l'erreur sur différentes sorties selon que le méta-modèle prend en compte ou non les paramètres environnementaux.....	69
Table 3.6 : Erreur NRMSE des différents types de méta-modèle	71
Table 4.1 : Estimation du dommage sur les configurations étudiées.....	76
Table 4.2 : Cas de chargement critiques, configuration 36m	79
Table 4.3 : Cas de chargement critiques, configuration 72m	79
Table 4.4 : Dommage et incertitude sur les cas critiques.....	80
Table 4.5 : Comparaison des méthodes OAT et ANOVA pour estimer l'incertitude sur le dommage dues aux différents paramètres, cas CC1.....	85
Table 4.6 : Comparaison de la méthode ANCOVA aux méthodes OAT et ANOVA pour estimer l'incertitude sur le dommage dues aux différents paramètres, cas CC1	87
Table 4.7 : Résultats OAT pour les différents cas critiques	90
Table 4.8 : Résultats ANCOVA pour les différents cas critiques	90
Table 4.9 : Résultats ANCOVA pour les différents cas critiques, configuration 72m	92
Table 5.1 : Erreur des méta-modèles sur les premiers modes PCA du dommage	99
Table 5.2 : Indices ANCOVA pour le mode 0 de la PCA sur le dommage.....	101
Table 5.3 : Indices ANCOVA pour le mode 1 de la PCA sur le dommage.....	102
Table 5.4 : Indices ANCOVA pour le mode 0 de la PCA sur les sorties de la simulation	106

Table 5.5 : Indices ANCOVA pour le mode 1 de la PCA sur les sorties de la simulation	106
Table 5.6 : Mesures supposées disponibles pour la calibration	108
Table 5.7 : Erreur des méta-modèles sur les premiers modes PCA du dommage, configuration 72m.....	110
Table 6.1 : Caractéristiques des cas de mesures	115
Table 6.2 : Erreur NRMSE moyenne du méta-modèle sur les différentes sorties.....	119
Table 6.3 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration (optimisation)	120
Table 6.4 : Résultats de la calibration par optimisation en termes d'erreur sur le dommage	121
Table 6.5 : Erreur RMSE du méta-modèle sur les paramètres à calibrer.....	123
Table 6.6 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration (méta-modèle inverse)	124
Table 6.7 : Écart-type de l'erreur réduite sur les différents paramètres (méta-modèle inverse)	125
Table 6.8 : Résultats de la calibration par méta-modèle inverse en termes d'erreur sur le dommage.....	126
Table 6.9 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration (approche bayésienne)	129
Table 6.10 : Écart-type de l'erreur réduite sur les différents paramètres (approche bayésienne)	129
Table 6.11 : Résultats de la calibration bayésienne en termes d'erreur sur le dommage	130
Table 6.12 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration (approche bayésienne avec calibration de l'erreur)	132
Table 6.13 : Écart-type de l'erreur réduite sur les différents paramètres (approche bayésienne avec calibration de l'erreur)	133
Table 6.14 : Résultats de la calibration bayésienne en termes d'erreur sur le dommage lorsque l'erreur méta-modèle-mesures est également calibrée	134
Table 6.15 : Corrélation de l'erreur de calibration sur les différents paramètres (lorsque tous les paramètres sont calibrés).....	136
Table 6.16 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration selon les paramètres calibrés	137
Table 6.17 : Écart-type de l'erreur réduite sur les différents paramètres selon les paramètres calibrés	137
Table 6.18 : Résultats en termes d'erreur sur le dommage selon les paramètres calibrés	138
Table 6.19 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration selon les mesures utilisées.....	139
Table 6.20 : Résultats de la calibration en termes de dommage selon les mesures utilisées.....	140

Table 6.21 : Bandes de fréquences pour le calcul de l'énergie des signaux temporels	142
Table 6.22 : Résultats des calibrations selon les types de sorties utilisés	142
Table 6.23 : Résultats des calibrations selon les types de sorties utilisés (tensions uniquement)	143
Table 6.24 : Influence du nombre de cas de chargement utilisé pour la calibration, erreur 5% .	144
Table 6.25 : Influence du nombre de cas de chargement utilisé pour la calibration, erreur 25%	144

1 Introduction

1.1 Contexte

Depuis 2011 la France a attribué 6 parcs commerciaux pour l'installation d'éoliennes posées en mer pour une capacité totale de production de 3 GW. Les éoliennes posées sont la plupart du temps installées dans des zones ne dépassant pas 40 m de profondeur, mais la limitation à ces profondeurs ne permet pas d'exploiter certaines zones offrant pourtant un fort potentiel en ressource, notamment en Méditerranée. Afin d'atteindre les objectifs fixés au niveau national en termes de production d'énergie en mer, des solutions innovantes doivent être développées et testées. L'éolien flottant apparaît à ce titre prometteur.

L'un des avantages de l'éolien flottant est de s'affranchir de la limitation en profondeur d'eau et d'accéder ainsi à des zones où la ressource en vent est plus importante. Cette plus grande distance des côtes facilite également l'acceptation des projets et leur intégration à l'écosystème maritime, avec en outre un impact environnemental réduit. Les éoliennes flottantes ne nécessitent en effet pas de fondations fixes et seules les ancres impactent le fond marin.

La confirmation de l'intérêt technico-économique de l'éolien flottant passe cependant par le développement de composants fiables et accessibles en coût.

L'intérêt est ici porté sur les ombilicaux dynamiques dont le rôle premier et essentiel est de permettre la transmission de la puissance électrique produite vers le réseau. L'ombilical doit également permettre de soutirer de l'énergie du réseau pour le démarrage de l'éolienne et le fonctionnement des systèmes auxiliaires. Il remplit en outre une fonction de communication pour le contrôle-commande de l'ensemble des sous-systèmes de l'éolienne flottante.

Les ombilicaux considérés pour l'éolien flottant sont très différents des câbles électriques utilisés en offshore pétrolier. Ces derniers sont en effet, en comparaison, de faible puissance et sont donc plus souples. Ils sont par ailleurs déployés en grande profondeur d'eau (plus de 500m) et donc peu sollicités par les mouvements du support flottant et par la houle à la différence de ce qui est attendu pour l'éolien flottant.

Les composants internes des ombilicaux dynamiques sont également différents de ceux des câbles sous-marins classiques. Ces derniers sont qualifiés de statiques car ils reposent au fond et sont généralement enfouis. Les ombilicaux dynamiques sont donc davantage exposés à la fatigue mécanique de leurs composants. En conséquence ils possèdent généralement deux couches

d'armure au lieu d'une et n'ont pas de barrière d'étanchéité en plomb car ce matériau présente une mauvaise résistance à la fatigue.

Plusieurs démonstrateurs d'éoliennes flottantes sont en test dans le monde depuis 2010 mais tous de puissance unitaire inférieure à 2,5 MW alors que les applications industrielles visées sont supérieures à 5 MW. Les ombilicaux dynamiques de ces démonstrateurs ont été conçus pour une durée de vie faible (inférieure à 5 ans) et aucune donnée n'est disponible sur leur comportement réel.

Dans le cas d'un parc commercial, il est envisagé, à l'instar de l'éolien posé, de raccorder des éoliennes en séries. Les ombilicaux dynamiques devront alors exporter des puissances de plusieurs dizaines de mégawatts, accroissant ainsi les difficultés de conception et d'installation du fait des sections plus importantes.

À la différence des fermes d'éoliennes posées, le câble d'export électrique ne bénéficie pas du support du pied de l'éolienne pour traverser la tranche d'eau (voir Figure 1.1). L'ombilical dynamique est donc exposé aux sollicitations de la houle et du courant. Il doit de plus accommoder le mouvement d'un flotteur lui-même soumis à la houle. Dans ces conditions l'ombilical dynamique doit répondre à des contraintes structurelles en plus des contraintes fonctionnelles que sont la transmission de puissance électrique et la transmission d'information. Les travaux présentés ici s'intéressent en particulier à la fatigue mécanique de ce composant vis-à-vis des chargements cycliques auxquels il est soumis aux fréquences de la houle.

Un certain nombre d'études récentes montrent en effet l'importance de la fatigue mécanique pour les ombilicaux dynamiques servant à l'export de la production électrique des éoliennes flottantes, ou des fermes de houlomoteurs (Thies 2012, Yang 2016, Yang 2017).

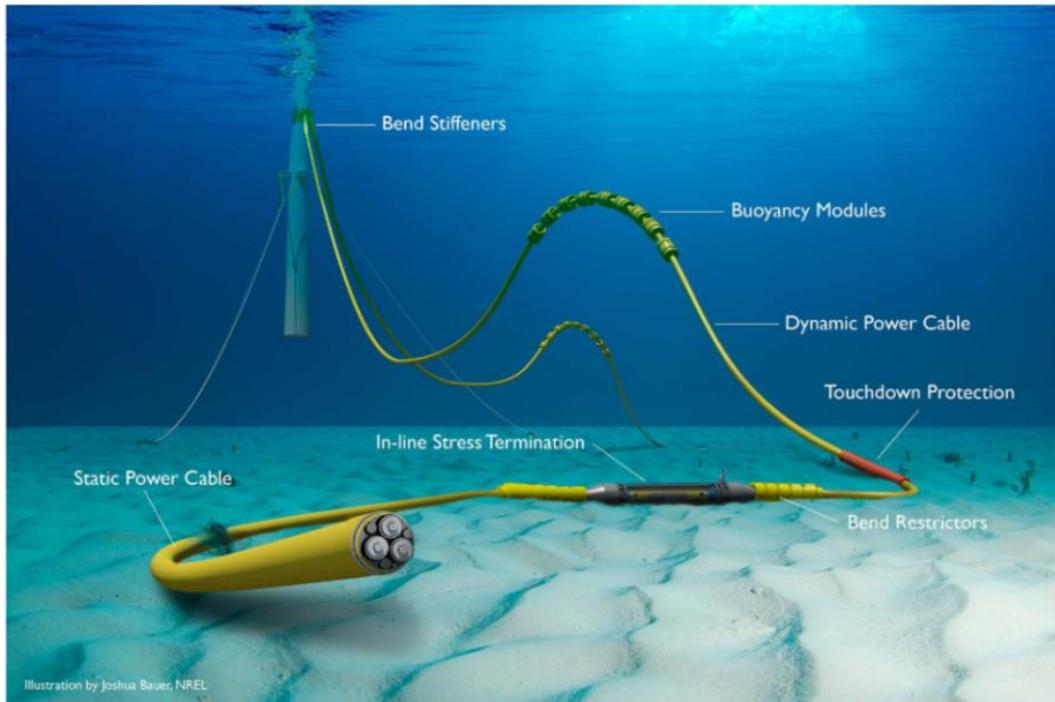


Figure 1.1 : Vue d'artiste d'un ombilical dynamique d'éolienne flottante ©NREL

Les méthodes d'analyse en fatigue généralement employées par l'industrie offshore pour les risers et ombilicaux dynamiques sont basées sur le calcul de l'espérance du dommage subi pour un cas de chargement de durée courte, généralement 3h, en fonction des statistiques environnementales du site (DNV RP-F204). Ces statistiques environnementales sont établies à partir des mesures et/ou de prévisions (Le Crom et al. 2013), et permettent d'établir une distribution de probabilité dont sont déduites les probabilités d'occurrence de chaque cas de chargement. Pour déterminer l'espérance du dommage, le dommage causé par différents cas de chargement est calculé, puis l'espérance du dommage est estimée en pondérant le dommage causé par la probabilité d'occurrence des cas de chargement considérés.

Le calcul du dommage sur un cas de chargement donné se fait en plusieurs étapes. En premier lieu la réponse du flotteur aux efforts du vent, du courant et de la houle doit être calculée. Puis la réponse globale de l'ombilical aux excitations induites par le mouvement du flotteur, mais aussi par l'écoulement hydrodynamique (houle et courant), est calculée avec l'hypothèse d'une section homogénéisée. À partir de cette réponse globale de l'ombilical, la contrainte locale dans les différents composants du câble est alors calculée en utilisant un modèle détaillé de la section. Enfin le calcul du dommage est réalisé aux points les plus critiques. Or les modèles utilisés à chacune de ces étapes simplifient nécessairement les phénomènes physiques tout en faisant appel à un grand nombre de paramètres dont les valeurs ne sont pas toujours connues de façon déterministe, ni avec précision. L'incertitude sur le dommage calculé est donc importante. Elle conduit à l'application d'un

coefficient de sécurité sur la durée de vie obtenue. Il est généralement recommandé que celui-ci ne soit pas inférieur à 10 pour les ombilicaux dynamiques (API Spec. 17E). Ainsi la durée de vie de design doit être d'au moins 200 ans pour permettre une durée de service de 20 ans.

Ce coefficient de sécurité important représente un coût non négligeable dans un contexte où le développement des énergies marines renouvelables (EMR) est fortement lié à une diminution du coût de l'énergie produite. Cependant le manque de retour d'expérience concernant les ombilicaux d'export de puissance électrique, spécifiques aux systèmes EMR flottants, est actuellement un obstacle à la réduction de ce facteur de sécurité. Il faut en outre considérer que les spécificités de chaque site (profondeur, type de sol, conditions d'environnement), et la variété des flotteurs, rendent le transfert de connaissance plus difficile d'un site à un autre.

Le travail présenté ici s'intéresse plus particulièrement à l'incertitude portant sur les caractéristiques de l'ombilical qui interviennent dans le calcul de sa réponse dynamique globale aux sollicitations du flotteur et de la houle. Ces incertitudes se propagent et contribuent à l'incertitude finale sur le dommage. Une des principales sources d'incertitude est liée à la croissance d'organismes biologiques sur la surface externe du câble. Cette bio-colonisation affecte fortement la masse et la flottabilité de l'ombilical ainsi que les efforts hydrodynamiques auxquels il est soumis, et présente une forte variabilité au cours de sa vie en raison des phases de croissance et des chutes éventuelles.

Dans ce contexte l'objectif des travaux de thèse présentés dans ce manuscrit est de proposer une méthode de suivi en service de la durée de vie des ombilicaux dynamiques basée sur une calibration régulière des paramètres du câble liés à la bio-colonisation, et d'évaluer selon la méthode de calibration retenue le gain envisageable en terme de réduction de l'incertitude sur le dommage.

1.2 Méthodes pour le calcul de la durée de vie

Le calcul de la durée de vie mécanique d'un ombilical dynamique peut s'appuyer sur diverses approches développées pour étudier la fatigue des matériaux. En particulier, selon les composants de l'ombilical qui sont considérés comme les plus critiques l'approche utilisée peut être différente. En effet les câbles électriques sous-marins sont constitués de divers matériaux remplissant différentes fonctions (voir Figure 1.2). Généralement situées au cœur de l'ombilical, les âmes conductrices en cuivre (ou en aluminium) sont chacune entourées d'isolant, d'écrans semi-conducteurs et d'une gaine. Afin de donner une forme cylindrique à l'ombilical, l'espace autour des conducteurs est rempli par des fibres en polyéthylène. Les fibres optiques, rassemblées dans une gaine occupent également un espace autour des conducteurs. L'ensemble est entouré d'une première gaine autour de laquelle une première couche de fils d'armure en acier est enroulée en

hélice. Pour les câbles dynamiques, une seconde couche d'armure est enroulée sur la première, en contre-hélice afin de minimiser le couplage tension-torsion. Enfin une gaine extérieure recouvre l'ensemble. Le rôle des couches d'armure en acier est de reprendre la majorité des efforts mécaniques afin de protéger les composants internes du câble. De ce fait ce composant apparait plus exposé au risque de rupture en fatigue. Les âmes conductrices en cuivre sont cependant également susceptibles d'être endommagées du fait de leur moindre résistance (limites d'endurance typiques : 290 MPa pour l'acier et 97 MPa pour le cuivre), avec en outre le risque de ne plus pouvoir assurer leur fonction de transport de l'énergie électrique.

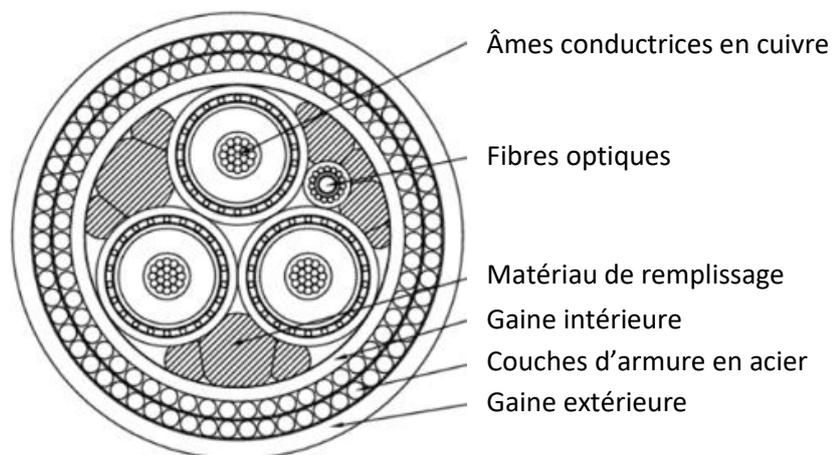


Figure 1.2 : Exemple de section d'ombilic dynamique

Différentes méthodes d'analyse en fatigue pour les structures métalliques sont passées en revue par Cui (Cui 2002). Celles-ci sont principalement divisées entre les méthodes de propagations de fissures et les méthodes de cumul de dommage. Ce sont encore ces dernières qui sont le plus souvent utilisées dans l'industrie malgré un certain nombre de limitations auxquelles les approches par propagation de fissure essaient de répondre.

Méthodes de cumul de dommage

Les méthodes de cumul de dommage sont basées sur des courbes reliant l'amplitude des cycles de chargement à la durée de vie (voir Figure 1.3). Celle-ci est alors exprimée en nombre de cycles. Pour un chargement cyclique d'amplitude constante, il s'agit du nombre de cycles maximal que le matériau peut endurer avant que le critère définissant la rupture ne soit atteint. Le dommage causé par un cycle est alors exprimé comme l'inverse du nombre de cycles maximal, qui est donné par la courbe de fatigue en fonction de l'amplitude du cycle considéré. Considérant une succession de cycles d'amplitudes variables, le dommage total est obtenu en sommant le dommage causé par chaque cycle, sans que l'ordre d'occurrence des cycles ne soit pris en compte (loi de Palmgren-Miner). La rupture est alors atteinte lorsque la valeur du dommage atteint 1.

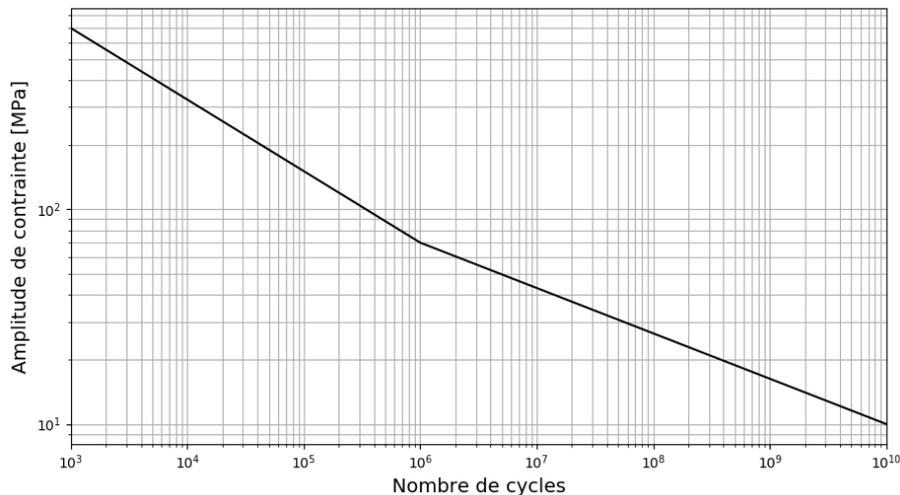


Figure 1.3 : Exemple de courbe de fatigue

Cui présente différents modèles définissant ces courbes de fatigue à partir de paramètres caractérisant le matériau. Les modèles les plus généralement utilisés sont basés sur l'amplitude des cycles de contrainte, mais afin d'inclure les effets liés à la plasticité notamment, d'autres modèles ont été développés qui considèrent l'amplitude des cycles de déformation. Ces modèles distinguent alors déformation élastique et déformation plastique (Manson and Hirschberg 1964). Pour le cuivre des conducteurs en particulier, la relation contrainte déformation étant non-linéaire il apparaît préférable d'utiliser les courbes basées sur la déformation (Karlsen 2010).

Dans ces modèles de cumul de dommage, le dommage est uniquement lié à l'amplitude des cycles, que ce soit en contrainte ou en déformation. La contrainte moyenne n'est donc pas prise en compte, mais les courbes de fatigue sont généralement obtenues pour des essais réalisés à facteur de charge constant, c'est-à-dire que le rapport entre la contrainte maximale et la contrainte minimale est le même pour tous les essais ayant servi à déterminer la courbe de fatigue. Une valeur typique de facteur de charge est -1, on parle alors d'essais alternés, avec une contrainte moyenne nulle. Des corrections peuvent cependant être apportées pour prendre en compte la contrainte moyenne. Il est également possible de réaliser des essais de fatigue spécifiques à une application donnée, en fixant la valeur de la contrainte moyenne en fonction de l'application envisagée. Ce type d'essais est toutefois onéreux en raison du nombre et de la durée des essais requis.

Il est important de considérer que les courbes de fatigues sont associées à une probabilité de rupture donnée et à un niveau de confiance donné. En effet une grande variabilité est observée lors des tests de fatigue. Pour une amplitude de chargement donnée, le nombre de cycles provoquant la rupture de l'échantillon peut donc être considéré comme une variable aléatoire. Pour les métaux il est généralement considéré que le logarithme (base 10) du nombre de cycles avant rupture suit une

loi Normale. Le nombre d'essais étant limité du fait de leur durée importante, et donc de leur coût, l'estimation des paramètres de cette loi Normale (moyenne et écart-type) souffre d'une incertitude relativement importante. Un intervalle de confiance doit donc être déterminé. Pour les courbes de design des structures offshore en acier, DNV requiert par exemple que la probabilité de survie soit de 97,7% (moyenne moins deux fois l'écart-type) avec un niveau de confiance d'au moins 75% (DNV RP-C203).

Approches par propagation de fissure

Des approches par propagation de fissure peuvent également être utilisées. Ces méthodes s'appuient sur une modélisation physique du comportement mécanique local dans la zone où se propage la fissure. L'ordre d'occurrence des cycles de contrainte est alors pris en compte. Pour l'estimation initiale de la durée de vie, la prise en compte de l'ordre d'occurrence des cycles de contrainte rend cependant l'usage de ces méthodes moins aisé par rapport aux méthodes du cumul de dommage. Elles présentent cependant l'avantage de permettre la définition d'un critère de rupture précis, en termes de longueur de fissure. Il est en revanche nécessaire de faire une hypothèse sur la taille initiale des fissures. Dans le cadre d'une approche fiabiliste, la taille initiale des fissures peut aussi être considérée comme une variable aléatoire. En général les méthodes basées sur la propagation de fissure sont associées à des inspections régulières de la structure afin de vérifier l'apparition des fissures. Dans le cas des ombilicaux dynamiques cependant une inspection visuelle est impossible, les composants étant situés à l'intérieur d'une gaine.

Application pratique à l'estimation de la durée de vie

Dans l'industrie offshore l'approche classiquement employée pour l'analyse en fatigue des risers s'appuie donc sur les méthodes de cumul de dommage (DNV RP-F204). La méthode employée pour le calcul de la réponse du riser doit être adaptée aux spécificités de la configuration étudiée. En particulier les méthodes fréquentielles permettent un gain de temps important mais ne sont pas recommandées dans les cas où la réponse de la structure est fortement non-linéaire. Une difficulté supplémentaire avec les méthodes fréquentielles est la combinaison des chargements aux basses fréquences et aux fréquences de houle. Lorsque les deux sources de chargement sont d'importance comparable la méthode à privilégier est la simulation numérique dans le domaine temporel, en utilisant la méthode dite du « Rainflow Counting » (RFC) pour déterminer le nombre et l'amplitude des cycles de contrainte à partir du signal temporel issu de la simulation. Sous certaines hypothèses des méthodes fréquentielles restent cependant applicables (Jiao et Moan 1990).

Afin de déterminer l'espérance du dommage cumulé sur le long terme, il est nécessaire de sélectionner un certain nombre d'états de mer pour lesquels le dommage sera calculé. Le plan

d'expérience recommandé consiste à rassembler les états de mer par blocs (voir Figure 1.4), et pour chaque bloc à ne considérer qu'un seul état de mer en lui donnant la probabilité d'occurrence du bloc entier. En général chaque bloc est défini par des valeurs extrêmes d'hauteur significative de houle et de période de pic. Selon les cas, il peut également être nécessaire de considérer la direction de propagation moyenne de la houle. Les autres paramètres environnementaux sont habituellement considérés constants. La philosophie adoptée est le conservatisme, c'est-à-dire qu'au sein de chaque bloc le cas de chargement retenu doit être le plus sévère en termes de dommage. À ce titre la valeur maximale de hauteur de houle est généralement employée, mais pour la période de pic le débat reste ouvert et une étude de sensibilité est souvent nécessaire. Enfin il est recommandé qu'un bloc ne contribue pas pour plus de 5% à 10% de l'espérance dommage en tenant compte des probabilités d'occurrence. La procédure est donc généralement itérative et les blocs contribuant le plus au dommage sont éventuellement redécoupés afin d'affiner l'estimation dans la zone la plus critique.

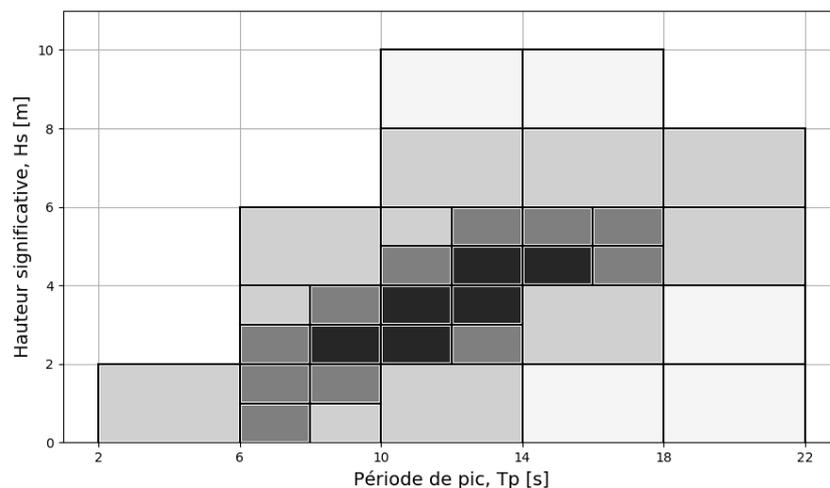


Figure 1.4 : Exemple de découpage en blocs selon la contribution à l'espérance du dommage

Avec l'augmentation des puissances de calcul il apparaît cependant envisageable d'employer des plans d'expérience basés sur un plus grand nombre d'états de mer. Si l'intégration numérique directe ou par simulation de Monte Carlo peut encore paraître excessive pour une application industrielle, l'application de méthodes de réduction de variance comme l'échantillonnage préférentiel, ou la construction de surfaces de réponse apparaissent comme des alternatives intéressantes (Low et al. 2012).

Coefficient de sécurité et approche fiabiliste

Afin de compenser les incertitudes associées à la méthode de calcul de la durée de vie, un coefficient de sécurité doit être appliqué à la durée de vie calculée pour obtenir la durée de vie de design. Dans le cas de configurations connues et maîtrisées, un facteur de sécurité standard peut

être appliqué directement en fonction de la classe de sûreté requise. Pour les ombilicaux dynamiques un coefficient de sécurité de 10 est par exemple demandé par l'API (API Spec. 17E).

DNV propose également une méthodologie pour déterminer un coefficient de sécurité en fonction de l'estimation du biais et de l'incertitude de la méthode employée, sans passer par une approche fiabiliste. À cette fin les états de mer contribuant le plus à l'espérance du dommage à long terme doivent être identifiés. Le biais et l'incertitude de la méthode sont déterminés sur ces états de mer. Le biais est obtenu en comparant la méthode utilisée avec la méthode de référence (simulation dans le domaine temporel et algorithme RFC). L'incertitude est estimée par une analyse de sensibilité paramètre par paramètre.

Dans les cas où les retours d'expériences sont limités ou inexistants, ce qui est aujourd'hui le cas des ombilicaux dynamique pour l'éolien flottant, il est cependant présenté comme préférable d'utiliser directement une approche fiabiliste. Le coefficient de sécurité est alors remplacé par la définition d'une probabilité de rupture acceptable. Le nombre de simulations requis augmente cependant de façon très importante puisque de nombreux paramètres sont incertains lors de l'estimation initiale du dommage.

Pour le suivi en service en revanche, l'incertitude sur un certain nombre des paramètres du modèle peut être fortement réduite suite aux mesures. Certains paramètres des cas de chargement endurés par l'ombilical en particulier peuvent être connus de façon déterministe. L'approche fiabiliste, limitée aux paramètres les plus critiques, apparaît donc particulièrement adaptée. Il convient alors pour chaque cas de chargement de déterminer, non pas une estimation conservative du dommage mais la distribution de probabilité du dommage causé. L'intervalle de confiance de la durée de vie consommée peut dans ce cas être estimé, à un instant donné au cours de la phase de service, en sommant le dommage subi depuis l'installation par simulation de Monte Carlo.

Les applications présentées ici ont pour objectif le suivi en service de la durée de vie d'un ombilical dynamique et une approche fiabiliste est envisagée. L'intérêt porte donc en particulier sur la quantification de l'incertitude sur le dommage pour les différents cas de chargement étudiés. Les méthodes utilisées pour calculer la réponse globale de l'ombilical, l'amplitude des cycles de contrainte et le dommage sont décrites dans le chapitre 2.

1.3 Bio-colonisation des structures marines

La bio-colonisation désigne le développement d'organismes biologiques sur les parties immergées des structures en mer (voir Figure 1.5). Ces organismes fixés sur les structures

augmentent la masse effective de ces dernières, diminuant ainsi leur flottabilité nette (définie comme la différence entre la poussée hydrostatique et le poids de la structure). Les efforts hydrodynamiques subis par la structure colonisée peuvent également être fortement modifiés. La bio-colonisation sur une structure est généralement caractérisée par son épaisseur, sa densité, sa rugosité, et le pourcentage de surface couverte.

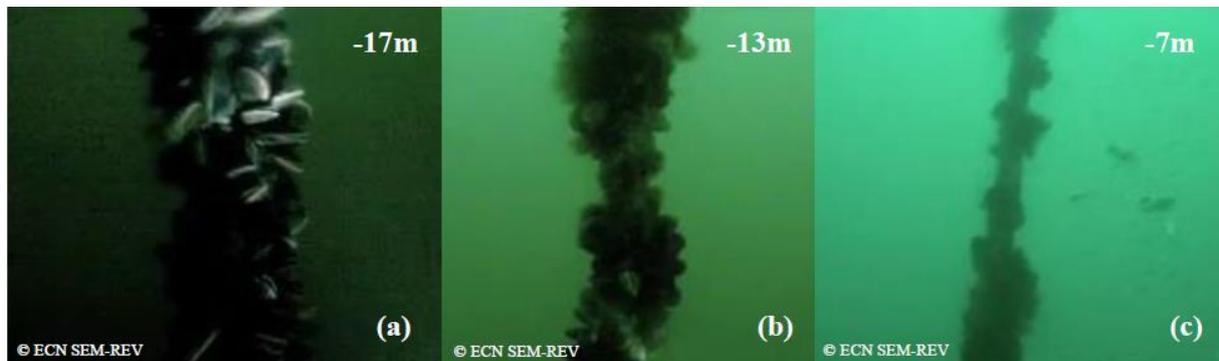


Figure 1.5 : Bio-colonisation sur lignes d'ancrage ©SEM-REV

La quantité et le type d'organismes présents sur une structure donnée peuvent varier de façon importante en fonction de la géographie du site où la structure est installée. La profondeur d'eau notamment est un facteur déterminant, principalement lié à la luminosité. En effet, pour une structure donnée la quantité et le type d'espèces observés varient avec la profondeur. La colonisation est ainsi généralement plus développée à proximité de la surface. Il est donc important de noter qu'en faible profondeur d'eau une proportion plus importante des liaisons fond-surface peut être affectée.

Les ombilicaux dynamiques d'éoliennes flottantes sont a priori installés dans des profondeurs d'eau relativement faible (de 30m à 100m) et peuvent donc être recouverts de bio-colonisation sur une grande partie de leur longueur. Avec des épaisseurs de bio-colonisation qui peuvent être du même ordre de grandeur que le rayon du câble, les propriétés hydrodynamiques de ce dernier peuvent être fortement modifiées. Il apparaît donc que les ombilicaux dynamiques d'éoliennes flottantes risquent d'être particulièrement affectés par ce phénomène.

Les problématiques associées à la bio-colonisation des structures marines sont connues de longue date, en particulier dans l'industrie pétrolière offshore qui a rencontré des difficultés similaires à celles attendues pour l'éolien flottant. Les sociétés de classification ont donc publié des standards et des recommandations pour différentes régions du monde. En particulier en Atlantique Nord et en Mer du Nord, il est recommandé que le design des structures immergées prenne en compte des épaisseurs de bio-colonisation allant jusqu'à 100mm entre 0 et 40m de profondeur et

50mm au-delà de 40m de profondeur, avec une densité de la couche de bio-colonisation égale à 1330 kg/m³ (NORSOK N-003).

Les épaisseurs observables ainsi que les espèces dominantes peuvent cependant être très différentes d'un site à l'autre, y compris au sein d'une même région géographique. Lorsque les structures considérées apparaissent particulièrement sensibles à la présence de bio-colonisation, il est donc préférable de s'appuyer sur des données plus précises, idéalement issues de mesures sur site (Macleod et al. 2016). En effet les épaisseurs données par les standards correspondent a priori à des valeurs extrêmes (il est notamment considéré que le câble est recouvert à 100%) qui conduisent généralement à surestimer la masse totale (Mallat et al. 2014). En fonction du design retenu, la situation avec les épaisseurs maximales de bio-colonisation ne constitue néanmoins pas systématiquement le pire scénario. La difficulté est alors de trouver un design aussi bien adapté aux cas avec que sans colonisation.

Des hypothèses peuvent également être faites sur l'évolution du processus de bio-colonisation. Par exemple il est généralement supposé que l'épaisseur de la couche de bio-colonisation augmente de façon linéaire pendant les deux premières années suivant l'installation, puis reste constante par la suite (DNV RP-C205).

Cependant l'évolution dans le temps du processus de bio-colonisation est bien plus complexe. Après l'installation de la structure en mer, la phase de croissance des organismes peut durer plusieurs années mais des variations saisonnières sont à prévoir. Des événements ponctuels peuvent également causer des variations importantes, en particulier d'éventuelles opérations de nettoyage ou de maintenance. Il est également envisageable que des chutes ou des glissements se produisent le long d'un câble, au cours d'une tempête par exemple. Par ailleurs des effets liés à la température de surface de l'ombilical peuvent être attendus sur la variabilité temporelle de la bio-colonisation. Il est donc difficile d'adopter une approche entièrement déterministe pour modéliser l'évolution de la bio-colonisation, et de plus en plus de travaux de recherche se dirigent vers des modèles fiabilistes (Ameryoun et al. 2013).

En conséquence, il semble pertinent de développer des approches basées sur des mesures régulières in-situ permettant d'évaluer les données caractéristiques de la bio-colonisation, et de les intégrer de façon réaliste dans les modèles qui seront utilisés pour calculer la durée de vie de l'ombilical.

1.4 Méthodologie proposée pour le suivi en service

Le suivi en service de la durée de vie de l'ombilical dynamique vise à quantifier et à réévaluer au cours du temps le dommage (en terme de fatigue) subi par l'ombilical depuis son installation.

Le dommage se définit ici, pour un composant donné, suivant une loi expérimentale reliant l'amplitude des cycles de contrainte au nombre de cycles causant la rupture du composant (Figure 1.6). Il ne s'agit donc pas d'une grandeur pouvant être mesurée directement. L'objectif du suivi en service est donc plutôt d'évaluer le nombre et l'amplitude des cycles de contrainte dans les composants jugés critiques. La contrainte à considérer ici est la contrainte axiale, selon la ligne moyenne des fils hélicoïdaux.

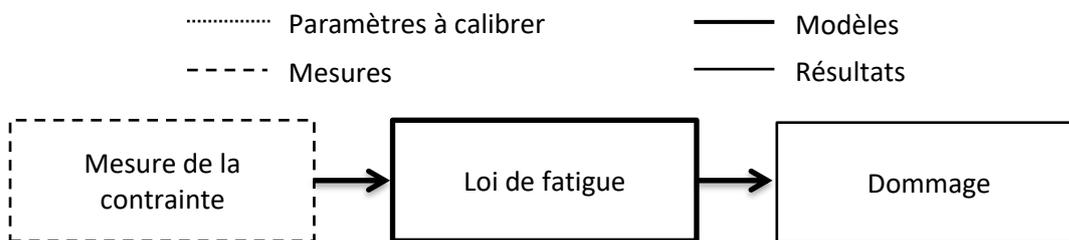


Figure 1.6 : Monitoring basé sur la mesure de la contrainte

Il n'est cependant pas non plus évident de mesurer la contrainte dans les composants internes de l'ombilical, du moins pas au moyen de jauges de déformation classiques, car les composants sont situés à l'intérieur du câble. Pour cette même raison, l'inspection du câble dans le but de détecter l'apparition de fissures, comme cela se fait pour certaines structures en mer, n'est pas possible.

Des moyens de mesure sont cependant développés pour mesurer la déformation dans des fibres optiques par réflectométrie. De telles fibres optiques pourraient être intégrées au design du câble. Il est alors envisagé d'utiliser ce type de mesure pour déterminer la courbure le long du câble puis, de la courbure repasser à la contrainte dans les composants critiques (Figure 1.7). Il s'agirait cependant a priori de fibres optiques dédiées, puisque les fibres optiques utilisées pour la transmission d'information sont justement placées dans une gaine afin de glisser librement et de subir le moins de contrainte possible.



Figure 1.7 : Monitoring basé sur la mesure de la courbure

Cette solution reste cependant encore en développement et se posent encore les questions du coût de mise en œuvre et de la possibilité d'effectuer les mesures en continu.

Dans la suite il est donc proposé une alternative supposant qu'une telle mesure n'est pas accessible et qu'en revanche il est possible de mesurer la réponse du câble en termes de tension, d'angle ou de position du câble et en un nombre restreint de points.

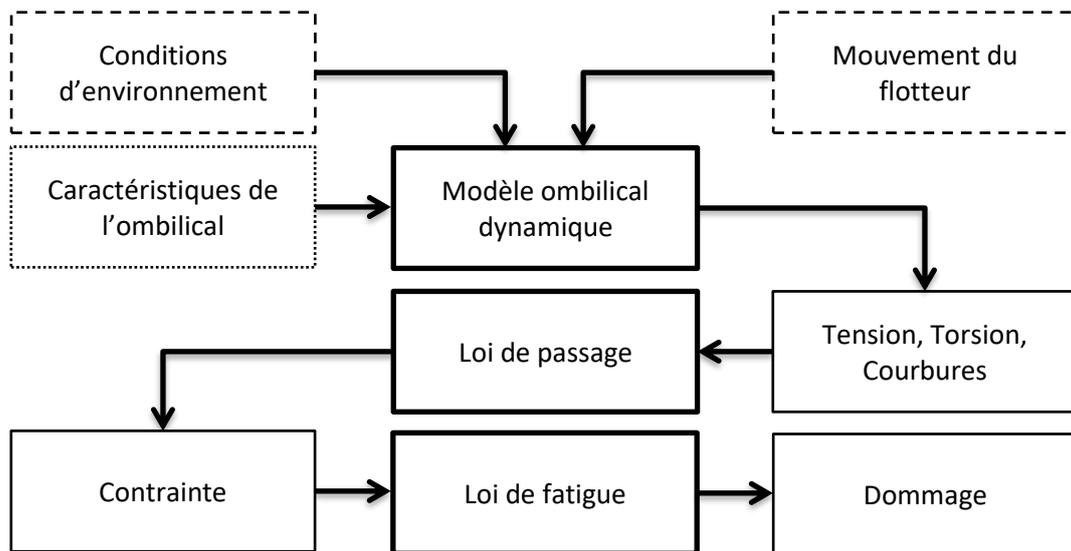


Figure 1.8 : Monitoring basé sur la mesure des conditions d'environnement et du mouvement du flotteur, et la calibration des caractéristiques de l'ombilical

Dans ce cas la méthodologie pour le suivi en service s'appuie donc en particulier sur le suivi des cas de chargement vus par le câble. Ceux-ci sont principalement décrits par les conditions d'environnement et le mouvement du flotteur qui en découle. La simulation numérique de la réponse dynamique de l'ombilical est donc nécessaire pour obtenir les tensions, torsions et courbures du câble (Figure 1.8). Par ailleurs une calibration régulière des paramètres du câble associés à la bio-colonisation est envisagée dans le but de réduire l'incertitude qui leur est associée. Le travail présenté dans la suite du manuscrit est centré sur ce processus de calibration, ainsi que sur le choix des paramètres à calibrer et des mesures à mettre en œuvre pour que la calibration soit efficace. Cette partie vise à inscrire le processus de calibration dans une méthodologie globale de suivi en service de la durée de vie d'un ombilical dynamique.

La Figure 1.9 montre les différentes étapes de mise en œuvre de la méthodologie proposée. Les paragraphes suivants détaillent les problématiques propres à chaque étape.

Étape 0 : Phase de design.

Lors de la phase de design, une fois la configuration de l'ancrage, du flotteur et de l'ombilical fixée, il est nécessaire de vérifier que l'ombilical respecte les contraintes réglementaires sur la durée

de vie en fatigue. Pour cela la durée de vie de l'ombilical doit être calculée ainsi que le coefficient de sécurité associé. Ce coefficient de sécurité dépend de la classe de sûreté requise, mais aussi de l'incertitude sur le dommage qui doit donc également être estimée. Il devient alors nécessaire de déterminer les paramètres les plus influents parmi ceux qui interviennent dans le calcul de la durée de vie (DNV RP-F204).

Par ailleurs dans l'optique du suivi en service, il est également important d'identifier ces paramètres critiques. En effet, dès la phase de design, le choix des mesures à mettre en œuvre doit être opéré. À cette fin il faut distinguer parmi les paramètres influents ceux qui pourront faire l'objet d'une mesure et ceux qui ne le pourront pas. 3 catégories de paramètres sont considérées ici : les **paramètres négligeables** qui ont peu d'influence sur le dommage, les **paramètres mesurables**, et les **paramètres critiques** qui ont une influence non-négligeable sur le dommage mais qui ne sont pas mesurables.

Typiquement les paramètres caractérisant les conditions d'environnement, tels que la hauteur significative de la houle ou la vitesse du vent, peuvent faire l'objet de mesures. De même la réponse du flotteur peut être mesurée aux basses fréquences ainsi qu'aux fréquences de la houle (GPS et accéléromètres). En revanche les paramètres définissant les caractéristiques du câble susceptibles d'être modifiées après son installation, en raison de la bio-colonisation par exemple, sont difficilement mesurables, et sont donc ici qualifiés de critiques. Pour ces paramètres il est proposé de procéder à des calibrations régulières au cours de la durée de vie afin d'améliorer la précision du suivi en service du câble.

Il est nécessaire d'identifier dès la phase de design ces paramètres critiques afin de sélectionner des mesures pertinentes pour leur calibration. Il convient donc, lors de la phase de design et suite au calcul initial de la durée de vie de l'ombilical, de quantifier l'incertitude sur la durée de vie associée aux différents paramètres. Puis d'identifier les sorties du modèle qui sont pertinentes pour la calibration. Il faut enfin sélectionner des mesures à mettre en œuvre pour obtenir les sorties du modèle qui seront utilisées. Différentes méthodes d'analyse de sensibilité pouvant être utilisées à cette fin sont présentées et comparées dans la suite du manuscrit (partie 4).

Il est ici important de remarquer que la configuration étudiée lors de la phase de design est amenée à évoluer. En effet une fois les différents composants construits, certains paramètres de la configuration jusqu'alors incertains peuvent être mesurés, les caractéristiques structurelles de l'ombilical par exemple (raideur axiale, flexion, torsion...), mais aussi la masse et les caractéristiques hydrostatiques de l'éolienne et de son flotteur. De même suite à l'installation sur le site de

production, l'emplacement réel des points d'ancrage diffère généralement du design initial. Il est donc d'usage de distinguer a minima 3 étapes de mise à jour de la configuration : « as-designed », « as-built » et « as-installed ». Pour le suivi en service, les paramètres critiques à considérer sont ceux qui demeurent incertains jusque dans la configuration « as-installed », du fait qu'ils puissent évoluer au cours de la durée de service de l'éolienne. Dans la suite c'est donc la configuration « as-designed » qui est considérée, et les éventuelles évolutions de cette configuration doivent également être prises en compte dans le suivi en service de l'ombilical.

Étape 1 : Mesures des cas de chargement vus par le câble sur une période donnée.

Suite à l'installation et à la mise en service de l'éolienne flottante, la phase de suivi en service commence. La première étape consiste alors à caractériser les cas de chargement vus par le câble. Pour cela il est nécessaire de mesurer les conditions d'environnement qui influent sur la réponse de l'ombilical (houle, vent, courant, marée). Il est également important de mesurer le mouvement du flotteur. En effet la réponse du flotteur bien qu'elle puisse être calculée à partir des conditions d'environnement peut varier significativement sur certaines périodes, suite à la rupture d'une ligne d'ancrage ou bien du fait d'une mise à l'arrêt temporaire de l'éolienne par exemple. Or le mouvement flotteur a une influence très forte sur la réponse de l'ombilical. En ce qui concerne la réponse du flotteur, une distinction doit être faite entre la réponse basse-fréquence, mesurée à partir de la position GPS, et la réponse aux fréquences de la houle, mesurée par des accéléromètres.

Les étapes 1 à 5 présentée ici sont répétées tout au long du suivi en service de l'ombilical, mais pas nécessairement cas de chargement par cas de chargement. Une certaine périodicité peut être adoptée afin de regrouper les cas de chargement observés sur un même intervalle de temps. Cette périodicité peut par exemple être fixée en fonction de la fréquence à laquelle il est attendu que la calibration des paramètres du câble soit nécessaire.

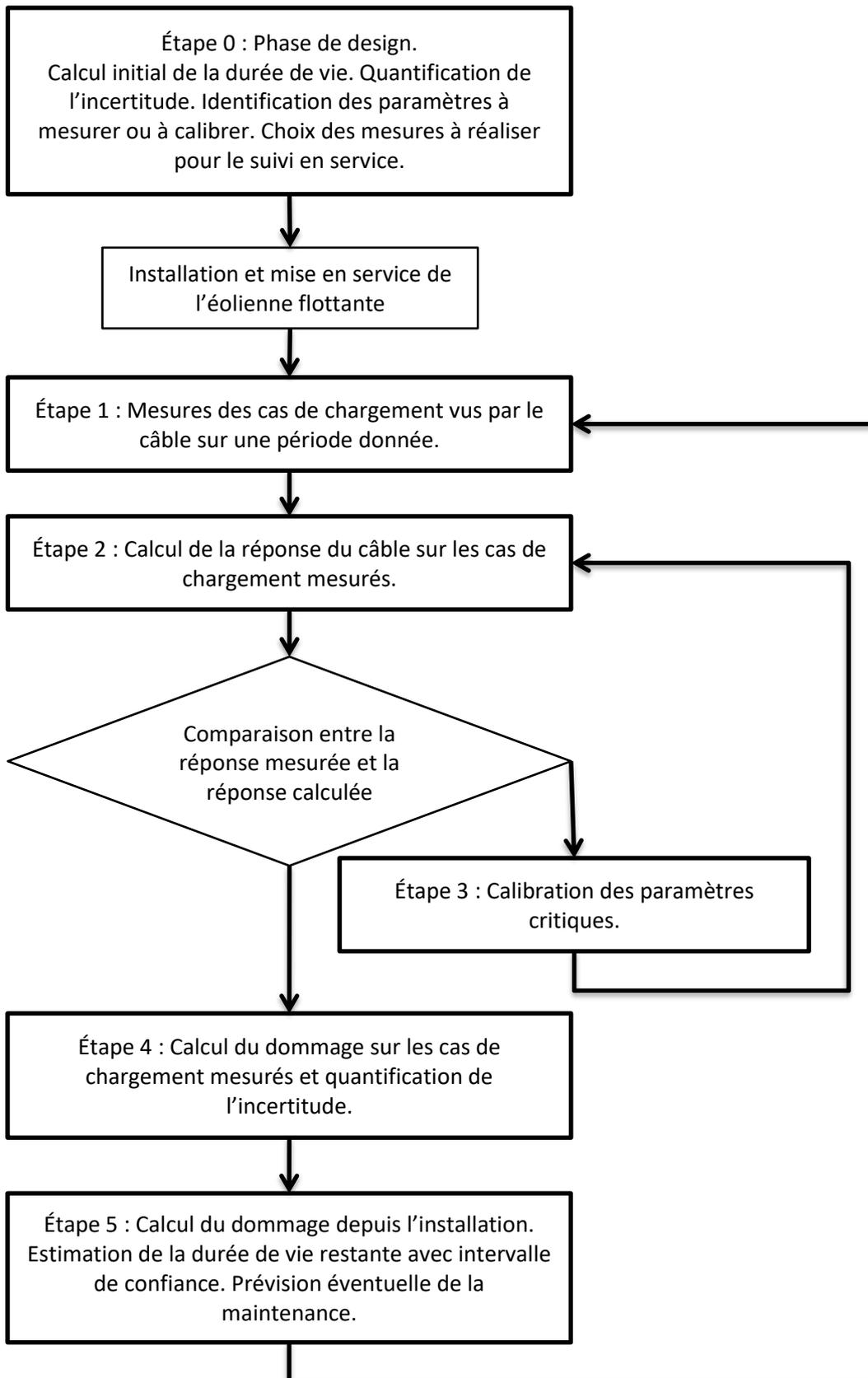


Figure 1.9 : Déroulé de la méthodologie proposée pour le suivi en service

Étape 2 : Calcul de la réponse du câble sur les cas de chargement mesurés.

La réponse de l'ombilical peut être calculée sur les différents cas de chargement observés en utilisant les mesures des conditions d'environnement et de la réponse du flotteur pour déterminer les entrées du modèle qui peuvent l'être. Dans les simulations numériques, les conditions d'environnement sont décrites par un jeu de paramètres dont il convient d'estimer les valeurs à partir des mesures.

Pour la réponse du flotteur différentes stratégies sont envisageables. Il est d'usage de distinguer la réponse aux fréquences de la houle de la réponse basse fréquence. Selon les cas la réponse basse fréquence peut être assimilée à une variation de la position moyenne de l'éolienne, en considérant par exemple uniquement les positions extrêmes considérées comme les plus critiques. La difficulté associée à la prise en compte du mouvement basse fréquence dans les simulations numériques est l'allongement significatif de la durée à simuler lorsque les simulations sont réalisées dans le domaine temporel. Pour la réponse aux fréquences de la houle il est important de tenir compte du déphasage entre les signaux de la houle et de la réponse du flotteur, or il est difficile de déterminer ce déphasage à partir des mesures qui fournissent plus facilement les spectres de puissance des différents signaux.

Le calcul de la réponse de l'ombilical est idéalement réalisé par simulation numérique dans le domaine temporel. Cependant la durée des simulations pouvant être relativement longue (typiquement de l'ordre du temps réel pour des durées simulées de l'ordre de l'heure), il peut être préférable d'utiliser des méthodes plus rapides. En particulier pour les cas de chargement peu sévères et plus fréquents, au comportement plus « linéaire » et dont la contribution au dommage est modérée, il peut être envisagé d'utiliser un méta-modèle (voir partie 3). L'utilisation de simulation dans le domaine fréquentiel est également à étudier.

Les valeurs des paramètres critiques étant susceptibles d'évoluer, la réponse du câble est dans un premier temps calculée en utilisant les dernières estimations de ces paramètres. Les mesures portant sur la réponse du câble peuvent alors être utilisées pour comparer, sur les sorties choisies lors de la phase de design, les résultats de la simulation aux quantités mesurées. Si l'écart est jugé trop grand il est alors possible de réaliser une calibration des paramètres critiques.

Étape 3 : Calibration des paramètres critiques.

Le processus de calibration doit permettre de déterminer des valeurs pour les paramètres critiques qui réduisent l'écart entre la réponse calculée et la réponse mesurée. Il convient néanmoins de considérer qu'en cherchant à réduire l'erreur sur une sélection d'observations il est possible que l'erreur augmente sur des sorties qui ne sont pas observées, en particulier si le nombre de points de

mesures sur l'ombilical est restreint. Il apparaît donc important de bien choisir les paramètres à calibrer ainsi que les mesures à utiliser. Par ailleurs il semble préférable d'utiliser un certain nombre de cas de chargement simultanément pour la calibration de façon à limiter le risque de sur-apprentissage.

Le choix des cas de chargement à utiliser pour la calibration pourrait en effet avoir une incidence importante. Dans un contexte où la majorité des états de mer observés auraient une contribution négligeable sur la consommation de durée de vie, il pourrait ainsi être préférable de limiter la calibration aux seuls états de mer ayant une contribution importante. Néanmoins si les probabilités d'occurrence de ces cas de chargement sont faibles, le nombre d'observations disponible pour effectuer les calibrations sera limité. Il conviendra donc dans la suite du manuscrit d'étudier différentes possibilités pour évaluer l'importance du nombre de cas de chargement utilisé pour réaliser une calibration (partie 6).

L'objectif du suivi en service est de réduire l'incertitude sur la durée de vie de l'ombilical. Il s'agit à cette fin de prendre en compte les cas de chargement réellement enduré, mais aussi les éventuelles évolutions de la configuration du système (arrêts pour maintenance, pannes, changements de composants, optimisation du contrôle, retours à terre ...). Le suivi de l'évolution d'une sélection de paramètres critiques s'inscrit également dans cette optique. Cependant, afin d'évaluer l'évolution de l'incertitude sur le dommage, il est nécessaire de quantifier l'incertitude restante sur les paramètres après calibration. Il est donc important que la méthode de calibration utilisée permette d'évaluer cette incertitude. Le choix de la méthode de calibration, et les choix concernant sa mise en œuvre sont donc cruciaux. L'objectif est en effet de réduire au maximum l'incertitude sur les valeurs calibrées des paramètres mais il est également important de s'assurer que l'incertitude n'est pas sous-estimée.

Étape 4 : Calcul du dommage sur les cas de chargement mesurés et quantification de l'incertitude.

Une fois l'accord modèle / mesures satisfaisant, il est possible de calculer le dommage. Le calcul du dommage est alors effectué sur chacun des cas de chargement observés à partir des résultats des simulations, en utilisant le cas échéant les paramètres nouvellement calibrés.

La calibration étant censée permettre de réduire l'incertitude sur les valeurs des paramètres calibrés, l'incertitude sur le dommage doit pouvoir être réduite en conséquence. L'objectif ici est donc d'adopter une approche fiabiliste pour le calcul du dommage afin d'estimer, à partir de distribution de probabilité des paramètres du modèle, la distribution de probabilité du dommage sur chacun des cas de chargement, puis en sommant sur l'ensemble des cas de chargement observés sur la période.

Cependant quantifier cette nouvelle incertitude pour chaque cas de chargement en utilisant directement des simulations numériques peut s'avérer très coûteux en temps de calcul. Selon les cas il peut être avantageux d'utiliser un méta-modèle, en particulier si un méta-modèle a déjà été construit pour la calibration des paramètres par exemple. Il peut également être envisagé de n'estimer l'incertitude que sur les cas de chargement les plus critiques, puis d'extrapoler aux cas les moins critiques.

Étape 5 : Estimation de la durée de vie restante.

Le dommage cumulé depuis l'installation est la somme du dommage sur les différentes périodes de mesures. La distribution de probabilité du dommage subi au cours de chacune des périodes ayant été calculée, il est possible d'estimer un intervalle de confiance sur la durée de vie consommée en termes de dommage cumulé, c'est-à-dire en pourcentage de la durée de vie totale.

Pour cela il convient également d'estimer la durée de vie consommée lors de l'installation qui peut être significative. Par ailleurs en fonction du suivi réalisé lors des opérations d'installation l'incertitude sur le dommage qui en résulte peut être importante et doit donc être prise en compte.

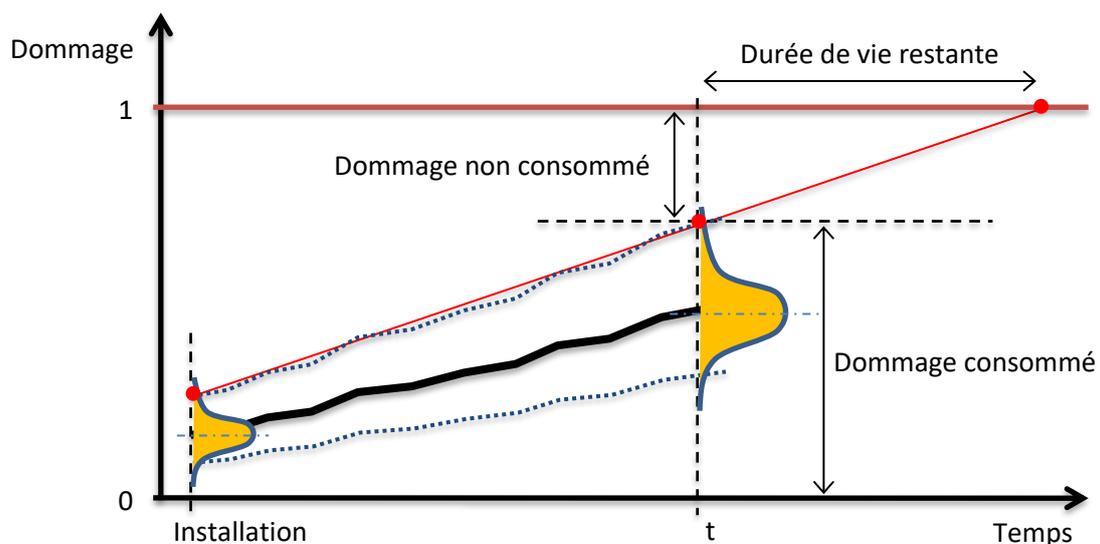


Figure 1.10 : Estimation de la durée de vie restante

Une fois la durée de vie consommée estimée, la durée de vie restante peut être quantifiée (Figure 1.10). Celle-ci correspond au dommage non consommé, mais selon les cas l'évolution du dommage dans le temps peut être plus ou moins linéaire localement. En particulier en fonction de l'importance de la contribution des événements à faible probabilité d'occurrence, l'estimation de la durée de vie restante peut s'avérer plus ou moins complexe.

1.5 Problématiques liées à la calibration

Les problématiques liées à la calibration des caractéristiques du câble pour le suivi en service de sa durée de vie sont ici résumées afin d'établir le plan du présent manuscrit.

Il est tout d'abord nécessaire de déterminer dans quelle mesure la calibration peut s'avérer utile dans la réduction de l'incertitude sur le dommage calculé. Pour ce faire l'incertitude liée aux paramètres susceptibles d'être calibrés doit être quantifiée et comparée aux autres sources d'incertitude. Quantifier l'incertitude due à chaque paramètre permet en outre de déterminer pour quels paramètres la calibration est intéressante ou non.

De nombreuses méthodes d'analyse de sensibilité existent et sont des outils adaptés à ce type de problème. La problématique ici se situe cependant dans le nombre de paramètres constituant les entrées du système. L'analyse de sensibilité doit en effet permettre de réduire le nombre de paramètres en entrée du modèle en négligeant les paramètres les moins influents, mais puisque l'objectif est de réduire l'incertitude, moins de paramètres peuvent être négligés.

En l'occurrence, les paramètres caractérisant les conditions d'environnement sont a priori les plus influents. Ceux-ci devant faire l'objet de mesures, les principales sources d'incertitude sont alors liées aux caractéristiques de l'ombilical dont les variations peuvent également affecter le dommage de façon importante. Or plus il y a de paramètres en entrée du système plus les analyses de sensibilité requièrent de grands nombres d'évaluations du modèle et sont donc difficiles à réaliser. Les éventuels couplages entre les paramètres constituent le principal facteur de complexité pour les analyses de sensibilité. Il convient donc de déterminer dans quelle mesure l'influence des paramètres étudiés dépend des valeurs des autres paramètres afin de choisir une approche adaptée.

La seconde étape importante dans la définition du processus de calibration est le choix des sorties du modèle à utiliser et des mesures qui y sont associées. Le problème est ici considéré d'un point de vue plus théorique que pratique et l'objectif est d'abord de déterminer les sorties les plus intéressantes pour la calibration avant d'étudier la mise en œuvre des mesures nécessaires. À nouveau une problématique importante est la dépendance des résultats aux cas de chargement considérés.

Enfin différentes méthodes de calibration peuvent être appliquées, et les choix de mises en œuvre sont nombreux. Sans pouvoir être exhaustif, l'objectif est ici de comparer les principales possibilités dans le but d'aboutir à des conclusions généralisables.

Aussi bien les analyses de sensibilité que les méthodes de calibration nécessitent un nombre élevé d'évaluations du modèle numérique. L'utilisation d'un méta-modèle apparaît donc pertinente, voire nécessaire dans le cas de la calibration. Il est cependant important d'évaluer l'influence de l'erreur du méta-modèle, en particulier pour la calibration. En outre le coût de construction des méta-modèles utilisés doit être évalué au regard de leur possibles utilisations. Il semble en cela pertinent d'adopter une approche permettant de réutiliser les jeux de données constitués pour la construction des méta-modèles. La construction d'un méta-modèle peut ainsi être envisagée et pour la calibration et pour l'évaluation de l'incertitude restante sur le dommage après calibration.

Dans la suite du manuscrit, dans un premier temps, au chapitre 2, les configurations étudiées sont présentées afin de préciser leurs spécificités par rapport aux différentes configurations envisageables pour les ombilicaux dynamiques d'éolienne flottante. Les hypothèses prises pour le calcul de la réponse dynamique globale de l'ombilical, de la contrainte locale et du dommage sont mises en avant ainsi que les limitations associées. Les hypothèses sur les statistiques environnementales du site (fictif) d'installation de ces configuration sont également présentées ainsi que les distributions a priori supposées des paramètres liés à la bio-colonisation de l'ombilical, qui feront l'objet de la calibration.

Différentes possibilités sont ensuite étudiées dans le chapitre 3 pour l'utilisation de méta-modèles en remplacement des simulations numériques. L'objectif est de disposer d'une méthode permettant une approximation rapide de la réponse de l'ombilical avec une erreur suffisamment faible pour permettre une calibration efficace des paramètres d'intérêt.

L'analyse préliminaire de la réponse de l'ombilical, présentée au chapitre 4, consiste à déterminer les régions du câble qui sont les plus sensibles au dommage, et qui gouvernent donc la durée de vie de l'ombilical. L'objectif est également d'identifier les régions les plus critiques dans l'espace des paramètres environnementaux afin de sélectionner des cas de chargement représentatifs de ces régions pour conduire les analyses de sensibilité. Différentes approches sont comparées et la sensibilité du dommage aux différents paramètres étudiés est évaluée.

Une seconde étape d'analyse consiste à utiliser l'analyse en composantes principales afin de déterminer les principaux modes de variation du dommage et de la réponse globale de l'ombilical en réponse aux variations des paramètres qui doivent faire l'objet de la calibration. Cette étape, qui fait l'objet du chapitre 5, permet en particulier de choisir un ensemble de mesures à des emplacements a priori pertinents pour la calibration.

Enfin, au chapitre 6, des essais de calibration sont réalisés avec différentes approches sur des mesures issues de simulations numériques. L'objectif en particulier est d'étudier l'importance de l'erreur entre le modèle et les mesures sur l'efficacité de ces approches. La pertinence du choix des mesures à employer pour la calibration est également discutée.

2 Configurations étudiées et modélisation

L'objectif de ce chapitre est de définir les spécificités des configurations étudiées et de préciser les modèles utilisés ainsi que leurs limitations.

Les différentes configurations envisageables pour l'ombilical dynamique sont dans un premier temps présentées. Le choix d'une configuration simplifiée mais représentative est ensuite expliqué, et les caractéristiques de la configuration retenue sont détaillées. Dans un second temps les modalités du calcul de la réponse du câble, de la contrainte locale et du dommage sont décrites. Enfin les distributions de probabilité utilisées pour les paramètres environnementaux et des paramètres liés à la bio-colonisation sont données. Pour les paramètres environnementaux il s'agit de décrire les statistiques environnementales supposées du site. Pour les paramètres liés à la bio-colonisation, cette distribution représente la variabilité attendue a priori sur les caractéristiques du câble. L'objectif de la calibration sera dans la suite de déterminer les valeurs optimales de ces paramètres, pour un intervalle de temps donné.

2.1 Configurations étudiées

Différentes configurations sont envisageables pour l'installation des ombilicaux dynamiques des éoliennes flottantes. Les figures 2.1 à 2.4 présentent 4 configurations classiques.



Figure 2.1 : Configuration caténaire

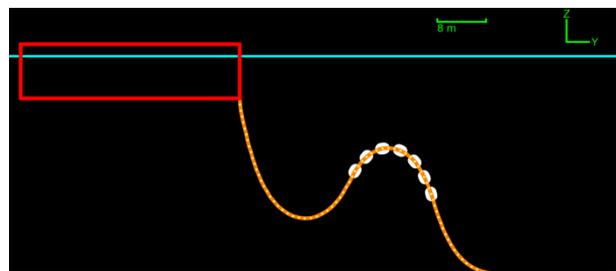


Figure 2.2 : Configuration "Lazy Wave"

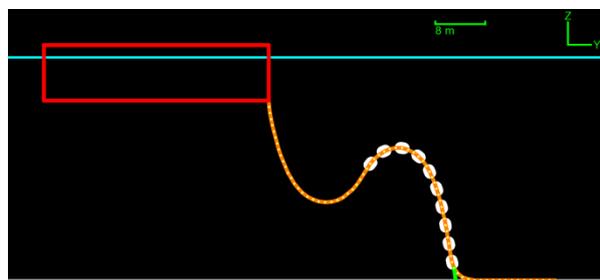


Figure 2.3 : configuration "Pliant Wave"

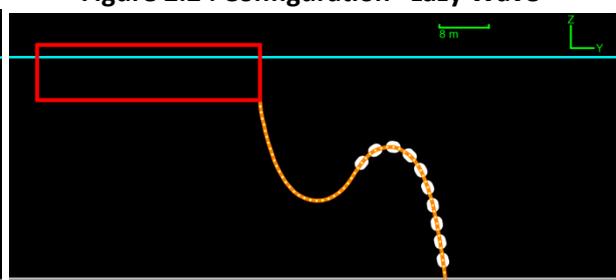


Figure 2.4 : Configuration "Steep Wave"

La configuration caténaire (Figure 2.1) est la plus simple et consiste à laisser le câble rejoindre le sol sous l'effet de son poids. Pour accommoder les déplacements extrêmes du flotteur une certaine longueur de câble dynamique repose sur le sol. Cette longueur garantit que les efforts sur le point

d'ancrage soient horizontaux. La configuration caténaire pose cependant un certain nombre de difficultés, en particulier dans la zone de contact avec le sol où le câble peut être soumis à des efforts de compression qui doivent être évités.

L'objectif de la configuration « lazy wave » (Figure 2.2) est de découpler la réponse du câble au niveau de la zone de contact au sol du mouvement du flotteur. Pour cela des modules de flottabilité sont ajoutés sur une section du câble afin de lui donner une forme en S. Cette forme en S permet d'accommoder la majorité des déplacements du flotteur. L'arrivée du câble sur le sol se fait cependant, après la section de flottabilité, de façon caténaire. La zone de contact avec le sol est donc relativement imprécise, tant en termes de position sur le sol que d'abscisse le long du câble.

La configuration « pliant wave » (Figure 2.3) permet de restreindre le mouvement du câble dans la zone de contact avec le sol par l'ajout d'un tendon. Ce dernier doit cependant reprendre un effort principalement vertical et nécessite donc un système d'ancrage plus complexe. Cette configuration permet alors en outre d'accroître le nombre de modules de flottabilité (et donc la composante verticale de la tension) et d'anticiper ainsi sur les effets de la bio-colonisation.

La configuration « steep wave » (Figure 2.4) suppose une connexion verticale avec le sol. Cette configuration est peu réaliste car ce type de connexion est difficile à réaliser en pratique. La configuration « steep wave » permet cependant de simplifier la configuration « pliant wave » de façon avantageuse en évitant de modéliser la zone de contact avec le sol.

Dans les travaux présentés, deux configurations sont étudiées à titre d'exemple. La première considère une profondeur d'eau de 36m, ce qui correspond à la profondeur moyenne sur le site d'essai en mer SEMREV. La seconde configuration considère 72m de profondeur d'eau, ce qui correspond davantage aux profondeurs où l'installation de fermes d'éoliennes flottantes est envisagée. En dehors des différentes profondeurs d'eau, les deux configurations sont prises aussi identiques que possible.

L'ombilical dynamique est placé dans la configuration « steep wave » grâce à l'ajout de modules de flottabilité répartis uniformément sur la seconde moitié du câble. La connexion au niveau du sol se fait ainsi verticalement ce qui évite de modéliser l'interaction avec le fond qui peut être très complexe (Elosta et al. 2013). En effet, l'usage d'une connexion horizontale en « lazy wave » est plus courant en pratique mais introduit des non-linéarités supplémentaires. En particulier il est difficile dans ce cas de définir l'emplacement exact où le câble vient toucher le sol (désigné par la suite par l'abréviation TDP pour « touch down point »). C'est ce qui a motivé l'usage de la configuration « steep wave ».

Pour la première configuration la distance horizontale entre le HOP (« hang off point », point où la câble quitte le flotteur) et le TDP lorsque le flotteur est en position nominale est fixée à 30m, et à 60m pour la deuxième configuration.

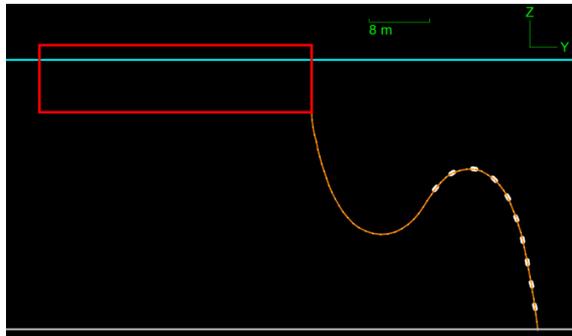


Figure 2.5 : Configuration 36m

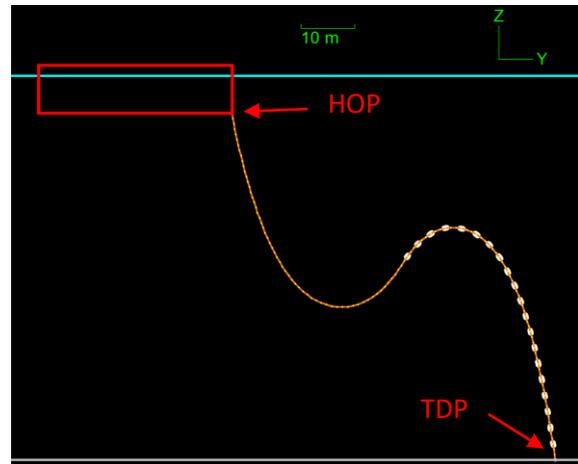


Figure 2.6 : Configuration 72m

Le même flotteur est considéré pour les deux configurations. Celui-ci est défini pour avoir un comportement représentatif du prototype d'éolienne flottante de 2MW qui doit être prochainement installé sur le site d'essai SEMREV dans le cadre du projet européen FLOATGEN. Les dimensions du flotteur sont donc similaires à celles du flotteur développé par l'entreprise IDEOL : un anneau carré de 36m de largeur et de 10m de hauteur avec un puits central de 21m de côté (Guignier et al. 2016). La masse combinée du flotteur et de son éolienne est prise égale à 5800T, avec un tirant d'eau de 7m.

L'ancrage considéré dans la première configuration (36m) est un ancrage semi-tendu comportant 7 lignes en Nylon. Cet ancrage est modélisé de manière simplifiée en considérant uniquement une raideur d'ancrage équivalente. Pour la seconde configuration la raideur d'ancrage est conservée identique malgré le changement de profondeur.

Les mêmes caractéristiques de câble et de modules sont utilisées pour les deux configurations mais la longueur totale de l'ombilical est doublée pour la seconde configuration, passant de 60m à 120m. Dans les deux cas, les modules de flottabilité sont régulièrement espacés de 3m. La première configuration comporte ainsi 10 modules quand la seconde en compte 20.

Table 2.1 : Caractéristiques du câble et des modules de flottabilité

Caractéristiques	Valeurs
Diamètre du câble	0,10 m
Masse par unité de longueur du câble	20 kg
Raideur axiale du câble	270 kN
Raideur en flexion du câble	3 kN.m ²
Masse des modules	50 kg
Volume des modules	0,128 m ³
Longueur des modules	0,50 m
Diamètre des modules	0,58 m

Table 2.2 : Différences entre les deux configurations étudiées

	Configuration 36 m	Configuration 72 m
Profondeur	36 m	72 m
Distance horizontale HOP-TDP	30 m	60 m
Longueur de câble	60 m	120 m
Nombre de modules	10	20

Il est ici supposé que le câble est encasté au niveau de la jonction avec le flotteur (HOP) et que ses rotations sont libres au niveau du TDP. L'influence de ce choix est discutée en annexe. Les équipements de protection (flexjoint, bend stiffener...) du câble ne sont pas modélisés.

2.2 Modèle numérique

La réponse dynamique globale de l'ombilical aux différents cas de chargement étudiés est calculée en utilisant le logiciel OrcaFlex développé par la société Orcina. Les simulations sont réalisées dans le domaine temporel sur une durée de 3600s en utilisant un schéma d'intégration implicite. Le pas de temps est fixé à 0.2s.

Il est considéré qu'il n'y a pas de couplage entre la réponse du flotteur et la réponse de l'ombilical. La position moyenne et les mouvements du flotteur sont donc calculés séparément dans un premier temps, puis imposés pour le calcul de la réponse de l'ombilical. Un gain de temps conséquent est ainsi réalisé sur chaque simulation.

Le calcul de la position moyenne du flotteur est réalisé par une routine externe et prend en compte les efforts du vent et du courant ainsi que la dérive de houle. La raideur hydrostatique et la raideur d'ancrage sont également prises en compte sous la forme d'efforts de réaction.

Le vent est uniquement pris en compte comme un effort constant sur l'éolienne. Les autres efforts aérodynamiques ne sont pas pris en compte en particulier la basse-fréquence. De même les efforts basse-fréquence de la houle ne sont pas considérés bien qu'ils puissent vraisemblablement être importants (Arnal et al. 2016).

Le mouvement du flotteur dépend alors uniquement du signal de la houle au niveau de sa position moyenne. Il est imposé par un opérateur fréquentiel (RAO pour « response amplitude operator ») qui fixe l'amplitude et le déphasage du mouvement du flotteur, sur ses 6 degrés de liberté, en fonction des amplitudes et phases du signal de houle.

Cet opérateur fréquentiel est obtenu en calculant dans un premier temps les efforts de la houle sur le flotteur à l'aide du solveur BEM (« boundary element method ») NEMOH (Babarit et Delhommeau 2015). Ce solveur fait l'hypothèse que les déplacements du flotteur sont petits, et permet d'obtenir les efforts de houle de premier ordre ainsi que la matrice de masse ajoutée et l'amortissement de radiation. Pour calculer la réponse du flotteur en termes de déplacements, les matrices de raideur hydrostatique et d'ancrage sont prises en compte et un coefficient d'amortissement visqueux est ajouté en pilonnement, roulis et tangage pour tenir compte de la présence de plaques antiroulis.

Finalement la simulation numérique de la réponse de l'ombilical est réalisée dans OrcaFlex. L'ombilical est discrétisé en éléments finis et les propriétés du câble sont définies aux nœuds du modèle. La torsion du câble n'est pas prise en compte et les raideurs axiale et en flexion sont supposées constantes. Tous les efforts, internes et externes, sont appliqués directement aux nœuds du modèle. Les efforts hydrodynamiques sont calculés en utilisant la formulation de Morison en vitesses relatives (équation ci-dessous). Les coefficients de trainée (C_d) et de masse ajoutée (C_a) du câble sont supposés constants au cours de la simulation et leur valeur est uniforme le long du câble. Le coefficient d'inertie C_m est supposé égal à $1+C_a$.

$$\vec{F}_{Ha} = \rho V \vec{a}_f + \rho V C_a (\vec{a}_f - \vec{a}) + \frac{1}{2} \rho C_d A \|\vec{v}_f - \vec{v}\| (\vec{v}_f - \vec{v})$$

Dans l'équation ci-dessus : ρ désigne la masse volumique du fluide, V le volume associé au nœud considéré, et A la surface de référence associée au nœud considéré. \vec{v} et \vec{a} désignent respectivement la vitesse et l'accélération du câble au nœud considéré, tandis que \vec{v}_f et \vec{a}_f désignent respectivement la vitesse et l'accélération du fluide, toujours au nœud considéré.

Les modules de flottabilité sont pris en compte de façon individuelle en ajoutant directement sur les nœuds concernés les propriétés de masse, de volume, de trainée et de masse ajoutée des modules.

Une étude de convergence a été conduite afin de fixer la discrétisation du câble (1m), le pas de temps (0.2s), la durée totale de simulation (3600s) et la période d'échantillonnage (2s). Les résultats de cette étude sont donnés en annexe.

2.3 Calcul de la contrainte locale

Le calcul de la contrainte locale est réalisé pour la couche externe de l'armure uniquement (voir figure 1.2). Ce choix est fait car les fils d'armure en acier sont censés reprendre la plus grande partie de la charge mécanique imposée au câble. En outre les sollicitations de flexion qui sont a priori importantes conduisent à des contraintes maximales au plus loin de la ligne moyenne. Le calcul de la contrainte est par ailleurs plus aisé pour ce composant situé à la périphérie du câble, pour lequel il est possible de ne prendre en compte que les frottements avec la couche d'armure interne. Il est cependant important de noter que les âmes conductrices en cuivre, bien qu'elles ne reprennent qu'une part limitée de la charge mécanique, peuvent être davantage sensibles à la fatigue (Karlsen 2010, Nasution 2014), avec en outre la nécessité de maintenir leur capacité à transporter le courant. Pour les travaux présentés dans ce manuscrit l'intérêt porte cependant principalement sur les variations relatives du dommage en fonction des valeurs prises par les paramètres du câble, il est donc considéré que le calcul du dommage dans la couche d'armure externe suffit a priori à satisfaire cet objectif.

Le calcul de la contrainte est fait pour chaque nœud du modèle numérique (tous les mètres) mais uniquement pour une position angulaire θ , fixe dans le repère local du câble pour rester sur le même fil d'armure. Celle-ci est déterminée selon la direction principale des variations de courbure au nœud considéré. La position angulaire retenue varie d'un cas de chargement à un autre, mais pour chaque cas de chargement il s'agit a priori de la position angulaire où le dommage sera le plus important.

Le calcul de la contrainte dans les fils d'armure est réalisé en utilisant une formulation analytique. Une revue bibliographique des méthodes analytiques existantes pour le calcul de la raideur en flexion des câbles à brins hélicoïdaux a été réalisée par (Cardou 2006). La difficulté principale dans ce problème est la prise en compte de la friction et du glissement des brins. Le calcul de la raideur d'ensemble passe alors généralement par une modélisation du comportement de chaque brin. Deux types de frictions peuvent être considérés : la friction circonférentielle, au sein

d'une même couche de fils, et la friction radiale entre des couches de fils adjacentes (Raouf 1995, Figure 2.7).

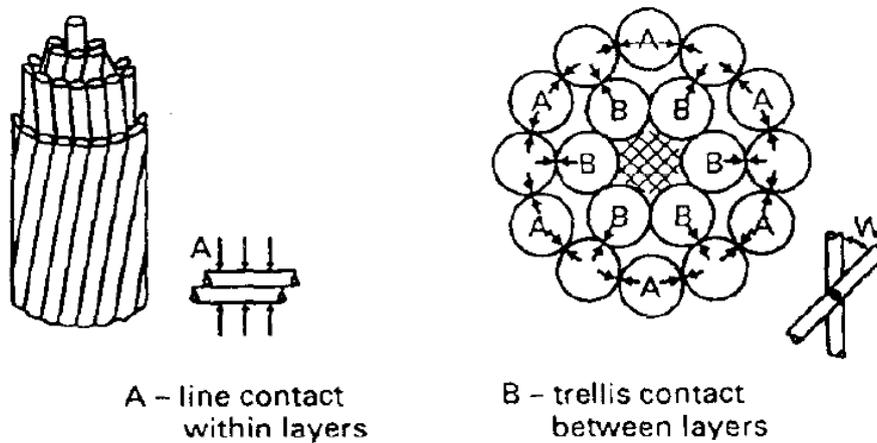


Figure 2.7 : Différents types de contacts (Raouf 1995)

Cardou relève qu'il est nécessaire de choisir un mode de friction dominant pour établir un modèle mathématique. Dans les cas des couches d'armure d'un ombilical dynamique, il semble que la friction radiale, entre couches, domine. Pour étudier la contrainte dans les couches internes il est cependant nécessaire de déterminer comment la pression se transmet entre les couches. À ce titre le cas de l'ombilical dynamique apparaît difficile à modéliser du fait de sa composition hétérogène. Le choix est donc fait ici de travailler uniquement sur la couche externe de l'armure, ce qui permet d'ignorer les phénomènes de transmission de pression vers les couches intérieures.

Dans la revue réalisée par Cardou, la formulation de (Papailiou 1997) est présentée comme la meilleure option disponible. Cette formulation considère le mode de friction radial uniquement et les contacts ponctuels entre les fils de couches adjacentes sont remplacés par un contact linéique (continu) entre chaque fil de la couche considérée et les couches adjacentes. Pour l'application au cas de la couche d'armure externe de l'ombilical, l'utilisation de contacts linéiques se justifie en outre par la présence d'une fine gaine entre les deux couches d'armure. Le comportement en friction est modélisé par la loi de Coulomb. L'hypothèse principale concernant la friction est que le glissement commence au niveau de l'axe neutre vis-à-vis de la courbure, ce qui permet d'établir que la contrainte des fils au niveau de l'axe neutre est égale à la contrainte due à la charge axiale uniquement (la contrainte en l'absence de flexion). En outre, la torsion des fils est négligée.

Dans les travaux présentés ici les équations suivantes sont utilisées pour le calcul de la contrainte en se basant sur la formulation de (Papailiou 1997). La contrainte totale σ dans le fil d'armure s'exprime comme la somme des contraintes liées au chargement axial σ_a , à la flexion propre du fil d'armure σ_b et à la friction avec la couche interne σ_f .

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_b + \sigma_f$$

Tout d'abord la déformation ϵ_a et la contrainte σ_a du fil d'armure dues uniquement à la charge axiale (en l'absence de flexion) sont calculées comme suit, où T est la tension du câble et EA la raideur axiale du câble. E représente le module d'Young du fil d'armure (acier) et β l'angle d'hélice.

$$\epsilon_a = \frac{T}{EA} \cdot \cos^2 \beta$$

$$\sigma_a(T) = \epsilon_a \cdot E$$

La contrainte σ_b due à la flexion du fil d'armure est calculée comme suit, sans tenir compte de la courbure liée à la disposition en hélice du fil autour du câble. La courbure du câble est notée C, le diamètre du fil d'armure δ , et l'angle entre la position angulaire où la contrainte est calculée et l'axe neutre vis-à-vis de la flexion φ (Figure 2.8). L'angle φ est positif du côté extérieur à la courbure (côté étiré) et est compris entre $-\frac{\pi}{2}$ et $\frac{\pi}{2}$. La contrainte de flexion du fil d'armure est calculée pour le point du fil d'armure le plus éloigné de l'axe du câble.

$$\sigma_b(C, \varphi) = C \cdot \frac{\delta}{2} \cdot \sin \varphi \cdot E$$

Pour la contrainte liée à la friction sur la couche interne, deux hypothèses peuvent être faite : avec ou sans glissement.

La contrainte sans glissement du fil d'armure due à la flexion d'ensemble du câble est notée σ_{stick} et est calculée selon l'équation suivante, avec r désignant le rayon de la couche d'armure. Contrairement à la contrainte σ_b il est supposé que cette contrainte s'applique uniformément sur la section du fil d'armure.

$$\sigma_{stick}(C, \varphi) = C \cdot r \cdot \sin \varphi \cdot \cos^2 \beta \cdot E$$

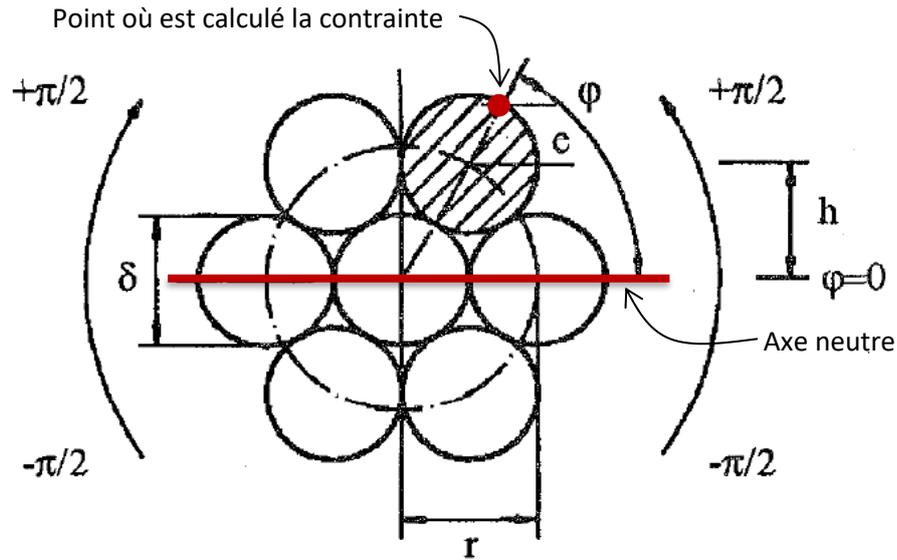


Figure 2.8 : Section d'un câble monocouche, définition des notations (Papailiou 1997)

La contrainte sans glissement suppose que la friction entre le fil d'armure et la couche interne suffit à empêcher le glissement. Néanmoins lorsque la courbure augmente la force de friction atteint une valeur limite calculée par la loi de Coulomb, le fil d'armure peut alors glisser sur la couche interne ce qui limite la contrainte. Papailiou obtient la formulation suivante pour la contrainte limite de glissement σ_{slip} (avec μ le coefficient de friction) :

$$\sigma_{slip}(\sigma_a, \varphi) = \sigma_a \cdot (e^{\mu \cdot \sin \beta \cdot \varphi} - 1)$$

Il est considéré dans cette formulation que la friction résulte uniquement de l'effort normal sur la couche interne due à la tension dans le fil d'armure externe. Pour $\varphi = 0$ on a bien $\sigma_{slip} = 0$ ce qui signifie que la contrainte axiale du fil d'armure est égale au niveau de l'axe neutre à σ_a .

Une difficulté qui survient pour implémenter cette formulation est que la direction de flexion varie au cours de la simulation. Afin de tenir compte de la direction de la flexion on utilise comme sorties des simulations les courbures par rapport aux axes X et Y du repère local du câble, notées respectivement C_x et C_y . La courbure du câble s'exprime alors :

$$C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$$

La position angulaire de l'axe neutre dans le référentiel local est notée φ_0 et varie au cours du temps. L'angle φ entre la position angulaire où la contrainte est calculée (notée θ) et l'axe neutre varie donc également au cours du temps.

$$\varphi(t) = \theta - \varphi_0(t)$$

Par définition l'angle φ varie uniquement entre $-\frac{\pi}{2}$ et $\frac{\pi}{2}$ et doit donc systématiquement être ramené à cet intervalle en utilisant la symétrie du problème.

L'objectif de Papailiou est de déterminer la raideur en flexion d'un câble, en particulier les valeurs extrêmes avec et sans glissement et la courbure à partir de laquelle la transition se réalise. Les phases de déchargement (diminution de la courbure) ne sont donc pas considérées. Or ici l'objectif est de déterminer la contrainte dans l'armure externe à partir des signaux temporels de tension et de courbures. Par ailleurs les courbures moyennes considérées ne sont a priori pas nulles et peuvent être supérieures à la limite de glissement. Il est donc apparu nécessaire de prendre en compte l'hystérésis liée au glissement afin que les variations de courbures affectent la contrainte de friction (Figure 2.9).

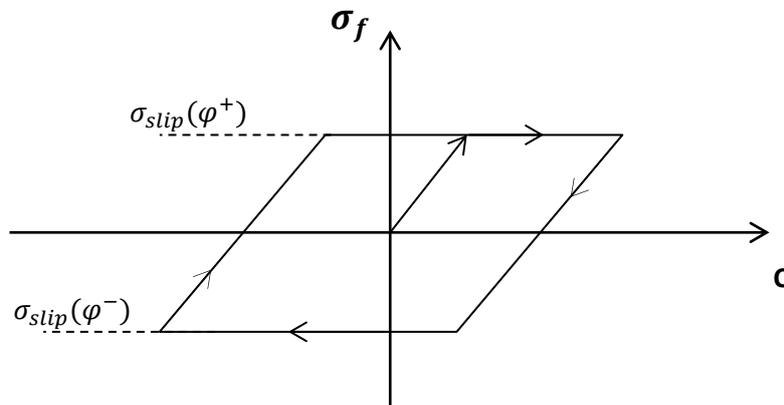


Figure 2.9 : Évolution de la contrainte de friction en réponse à un cycle de courbure

Il est tout d'abord supposé qu'à l'instant initial la contrainte de friction σ_f est nulle, c'est-à-dire que le fil d'armure a pu glisser librement.

$$\sigma_f(t_0) = 0$$

D'un pas de temps à l'autre il est en premier lieu supposé que la variation de la contrainte de friction est égale à la variation de la contrainte sans glissement sur l'intervalle de temps considéré. C'est-à-dire que la contrainte de friction varie comme si il n'y avait pas de glissement.

$$\sigma_f(t + dt) = \sigma_f(t) + \frac{d\sigma_{stick}(C, \varphi)}{dt} \cdot dt$$

Puis la contrainte de friction au nouveau pas de temps est comparée à la limite de glissement. À la différence de la formulation de Papailiou, il est ici nécessaire de considérer 2 limites de glissement : une en traction et une en compression. En effet suite au glissement lors d'une phase d'augmentation de la courbure, il est possible que les fils d'armure dans la zone étirée subissent de la

compression lors de la phase de déchargement sans que le sens de la courbure ne s'inverse, et inversement dans la zone comprimée (Figure 2.9). La formulation suivante est donc utilisée, l'hypothèse que le glissement commence au niveau de l'axe neutre y est conservée, mais il est considéré que le signe de φ peut s'inverser pour le calcul de la contrainte limite de glissement en fonction du signe de la contrainte de friction.

$$\sigma_{slip}(\sigma_a, -|\varphi|) \leq \sigma_f(t + dt) \leq \sigma_{slip}(\sigma_a, |\varphi|)$$

Lorsque la contrainte de friction est supérieure à la borne supérieure, celle-ci est fixée à la valeur de la borne supérieure.

$$\sigma_f(t + dt) = \sigma_{slip}(\sigma_a, |\varphi|)$$

Il en va de même si la limite inférieure est atteinte.

$$\sigma_f(t + dt) = \sigma_{slip}(\sigma_a, -|\varphi|)$$

Finalement la contrainte totale dans le fil d'armure est obtenue en sommant les contraintes liées au chargement axial, à la flexion propre du fil d'armure et à la friction avec la couche interne.

$$\sigma = \sigma_a + \sigma_b + \sigma_f$$

L'observation des résultats obtenus sur les cas de chargement simulés amène toutefois la remarque suivante : les variations de contraintes sont, dans le cas étudié, principalement liées à la flexion propre du fil d'armure (pour accompagner la flexion du câble), très peu à la flexion d'ensemble du câble car le glissement est important, et très peu aux variations de la tension du câble.

Les tables 2.3 et 2.4 détaillent, pour les 2 configurations, la contribution de chaque type de contrainte à la contrainte totale. Ces contributions sont calculées d'une part sur les valeurs de contrainte moyenne, et d'autre part sur les écart-type des signaux temporels. Ces valeurs d'écart-type quantifient l'amplitude des variations de contrainte et sont donc fortement liées au dommage. Les résultats sont donnés en moyenne sur 1000 cas de chargement représentatifs des statistiques environnementales considérées dans la suite. Les valeurs de contributions, exprimées en pourcentage, correspondent à l'espérance des rapports moyenne sur moyenne, ou écart-type sur écart-type, calculées cas de chargement par cas de chargement. Pour la configuration 36m, les contraintes sont calculées à 35m du HOP, et à 68m du HOP pour la configuration 72m.

Table 2.3 : Contributions à la contrainte totale, configuration 36m

	σ	σ_a	σ_b	σ_f
Moyenne	66 MPa	0,37 MPa	65 MPa	0,015 MPa
	100%	1,1%	99%	0,021%
Écart-type	4,4 MPa	0,024 MPa	4,4 MPa	0,10 MPa
	100%	0,60%	97%	5,4%

Table 2.4 : Contributions à la contrainte totale, configuration 72m

	σ	σ_a	σ_b	σ_f
Moyenne	34 MPa	0,84 MPa	33 MPa	0,035 MPa
	100%	5,5%	94%	0,091%
Écart-type	1,4 MPa	0,021 MPa	1,3 MPa	0,21 MPa
	100%	1,4%	84%	24%

Pour les 2 configurations la contribution de la contrainte de friction à l'écart-type de la contrainte totale est faible devant la contribution de la flexion propre du fil d'armure. Néanmoins pour la configuration 72m où la contrainte axiale représente une part plus importante de la contrainte totale moyenne, la contribution de la contrainte de friction n'est plus tout à fait négligeable.

Il convient enfin de remarquer que les sources extérieures de pression (radiale) sur le câble n'ont pas été prises en compte. En particulier la pression des colliers servant à fixer les modules de flottabilité qui est susceptible localement de fortement accroître les forces de friction.

Les limitations du modèle utilisé sont donc nombreuses et les résultats doivent en conséquence être considérés avec vigilance. Les variations de la contrainte locale des fils d'armure apparaissent ici essentiellement dues aux variations de la courbure du câble. Dans la mesure où les efforts de friction internes sont faibles la contrainte dans les fils d'armure risque de ne pas être très supérieure à celle dans les conducteurs en cuivre. Il semble donc probable que ces composants soient davantage critiques que la couche externe de l'armure. Toutefois les variations du dommage dans les différents composants devraient être relativement similaires ce qui apparaît satisfaisant dans le cadre présent.

2.4 Calcul du dommage

L'approche utilisée dans l'étude pour le calcul du dommage causé par un cas de chargement nécessite la donnée d'un signal temporel de la contrainte locale représentatif du cas de chargement considéré. Le signal temporel de la contrainte est obtenu en post-traitant les résultats d'une simulation numérique de la réponse dynamique de l'ombilical sur une durée d'une heure, selon les modalités décrites dans les parties précédentes.

À partir du signal temporel de la contrainte locale, les cycles de contrainte, caractérisés uniquement par leur amplitude, sont extraits en utilisant la version de l'algorithme de « rainflow counting » (RFC) décrite par (Amzallag 1994). Le dommage causé par chaque cycle est ensuite estimé à partir d'une courbe SN (du même type que celle illustrée Figure 1.3). Il s'agit en l'occurrence de la courbe B2 donnée par DNV pour l'acier dans l'eau de mer avec protection cathodique (DNV RP C203). La courbe en question correspond à l'équation suivante, avec N le nombre de cycles avant rupture en fonction de l'amplitude $\Delta\sigma$ du cycle. Le dommage d'un cycle vaut $\frac{1}{N}$, et le dommage total est égal à la somme du dommage de chaque cycle. Dans les travaux présentés l'influence de la contrainte moyenne sur le dommage n'a pas été considérée.

$$\begin{cases} N(\Delta\sigma) = 10^{(14,685-4,0\log_{10}\Delta\sigma)} & \text{si } \Delta\sigma \text{ tel que } N < 10^7 \\ N(\Delta\sigma) = 10^{(16,865-5,0\log_{10}\Delta\sigma)} & \text{si } \Delta\sigma \text{ tel que } N > 10^7 \end{cases}$$

Pour le calcul de la durée de vie, la méthode par blocs n'est pas appliquée. L'espérance du dommage est estimée par simulation de Monte Carlo, en faisant varier l'ensemble des paramètres environnement définis ci-après. L'incertitude associée à cette méthode d'estimation est quantifiée par bootstrap.

Pour estimer l'incertitude sur le dommage due à un paramètre donné ou à un jeu de paramètres, un tirage aléatoire est réalisé suivant la distribution du paramètre considéré (ou des paramètres considérés), les autres paramètres étant fixés, puis l'écart-type et la moyenne du dommage sont calculés sur ce tirage. Le coefficient de variation du dommage (écart-type divisé par la moyenne) est utilisé pour quantifier l'incertitude.

2.5 Modèle stochastique pour les conditions d'environnement

Comme indiqué précédemment, deux types de paramètres sont distingués dans les travaux présentés : les paramètres environnementaux présentés ici, et les paramètres liés à la bio-colonisation présentés dans la partie suivante. Ces paramètres constituent les entrées du modèle allant de la simulation numérique de la réponse de l'ombilical au calcul du dommage. La distinction

est faite entre ces deux types de paramètres car il est supposé que les paramètres environnementaux pourront être mesurés, tandis que les paramètres liés à la bio-colonisation devront être calibrés. Par ailleurs le suivi des conditions d'environnement sur site avant l'installation d'éolienne flottante permet de disposer de données sur les statistiques environnementales du site.

Dans la suite un cas de chargement est défini par le jeu de paramètres caractérisant les conditions d'environnement. 8 paramètres environnementaux sont utilisés pour décrire chaque cas de chargement : 3 pour la houle, 2 pour le vent, 2 pour le courant et 1 pour la marée. Les statistiques environnementales du site sont représentées, pour l'ensemble de cette étude, par une distribution paramétrique. Cette distribution donne pour chaque cas de chargement la probabilité d'occurrence associée. Les lois marginales de la distribution sont données ci-après pour chacun des paramètres. Afin que la distribution utilisée soit davantage réaliste, une corrélation non nulle est introduite entre certains paramètres comme décrit dans la suite. L'obtention de ce type de distribution jointe à partir de données météorologiques est discutée par exemple par (Horn et al. 2017).

La houle est modélisée par un spectre JONSWAP unidirectionnel. La valeur du paramètre gamma du spectre est fixée à 1.5, tandis que les paramètres Hs (hauteur significative) et Tp (période de pic) sont variables dans l'étude. Les autres paramètres du spectre sont déterminés automatiquement par le logiciel OrcaFlex utilisé pour les simulations. La direction de propagation de la houle (notée Dm) est également variable. Les 3 paramètres caractérisant la houle pour un cas de chargement donné, Hs, Tp et Dm suivent les lois marginales données dans la Table 2.5, et représentée Figure 2.10.

Table 2.5 : Distributions marginales des paramètres environnementaux

Paramètre	Loi suivie	
Hs	Weibull	Paramètre de forme : 2. Paramètre d'échelle : 1,6m.
Tp	Normale	Moyenne : 12s. Écart-type : 4s. Tronquée entre 2s et 22s.
Dm	Normale	Moyenne : -22,5°. Écart-type : 10°. Tronquée entre -45° et 0°.
Uw	Weibull	Paramètre de forme : 8. Paramètre d'échelle : 2m/s.
Dw	Normale	Moyenne : -22,5°. Écart-type : 20°. Tronquée entre -90° et +45°.
Uc	Normale	Moyenne : 0m/s. Écart-type : 0.3m/s. Tronquée entre -0,6m/s et 0,6m/s.
Dc	Normale	Moyenne : 0°. Écart-type : 5°. Tronquée entre -15° et +15°.
H	Normale	Moyenne : 0m. Écart-type : 1m. Tronquée entre -3m et +3m.

La modélisation stochastique des paramètres est réalisée en utilisant la librairie OpenTURNS (Baudin et al. 2016). Certaines distributions sont tronquées de façon à bien contrôler l'intervalle de

variation des paramètres étudiés. La troncature est réalisée par construction, ce qui assure que l'intégrale de leur densité de probabilité soit bien égale à 1.

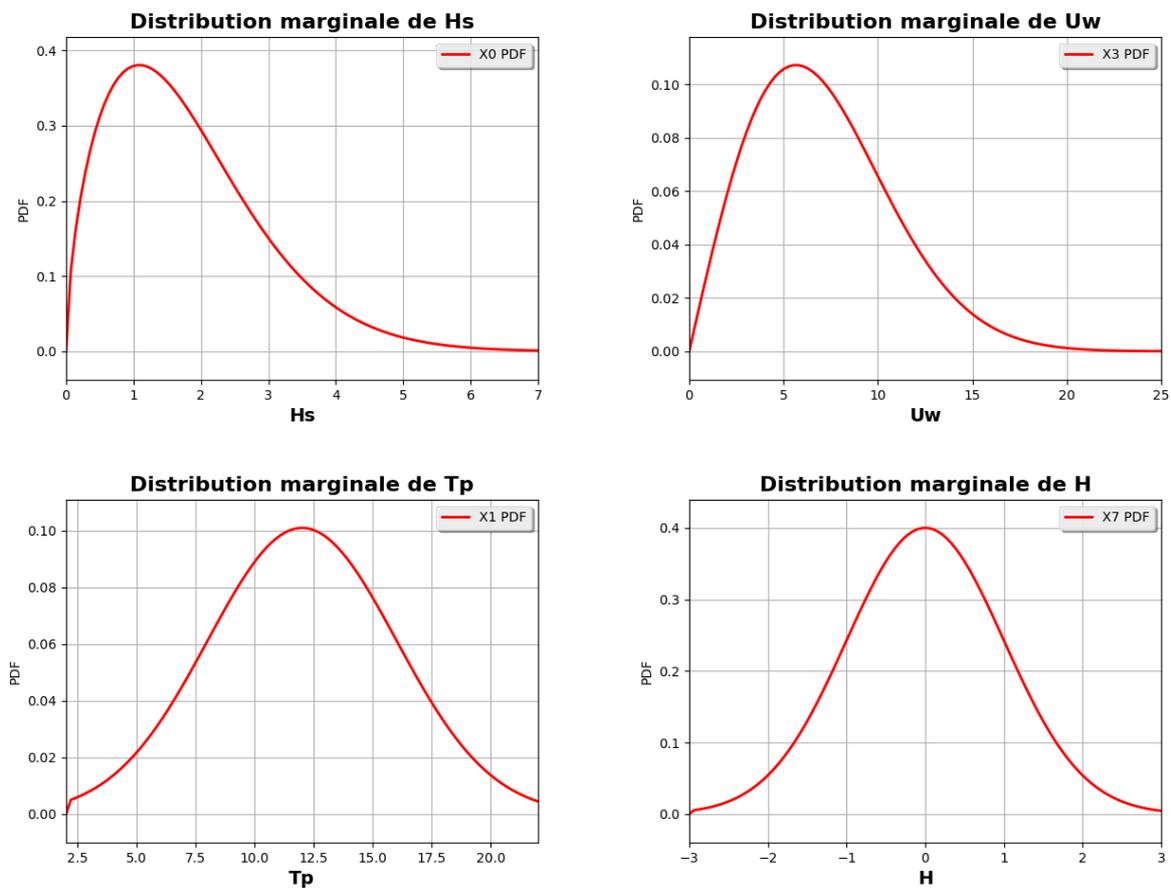


Figure 2.10 : Exemples de distributions des paramètres environnementaux

Le vent est supposé uniforme et constant au cours d'un cas de chargement. Il est caractérisé par sa vitesse U_w et sa direction D_w dont les lois marginales sont également données dans la Table 2.5.

La vitesse du courant est supposée nulle au niveau du fond. La vitesse dans la tranche d'eau suit une loi puissance d'exposant 7 définie par la valeur de la vitesse en surface donnée par le paramètre U_c . Le paramètre D_c donne la direction du courant. La direction du courant est la même dans toute la tranche d'eau.

Enfin le paramètre H fixe le niveau de la marée en terme de variation par rapport au niveau moyen. Le niveau de la marée est limité à $-3m$ pour la basse mer et $+3m$ pour la haute mer.

Comme indiqué précédemment, des valeurs de corrélations sont prises en compte entre certains paramètres. À cette fin les lois marginales des différents paramètres sont liées par une copule Gaussienne. La corrélation est fixée à 0.7 entre H_s et T_p , à 0.3 entre H_s et U_w , à 0.5 entre D_m et D_w et à 0 pour tous les autres couples de paramètres. Lorsque la corrélation est nulle, il est supposé que

les paramètres sont indépendants. Lorsque la corrélation est différente de 0 les deux paramètres sont liés. L'effet des corrélations plus ou moins importantes sur les distributions jointes des paramètres environnementaux peut être observé Figure 2.11.

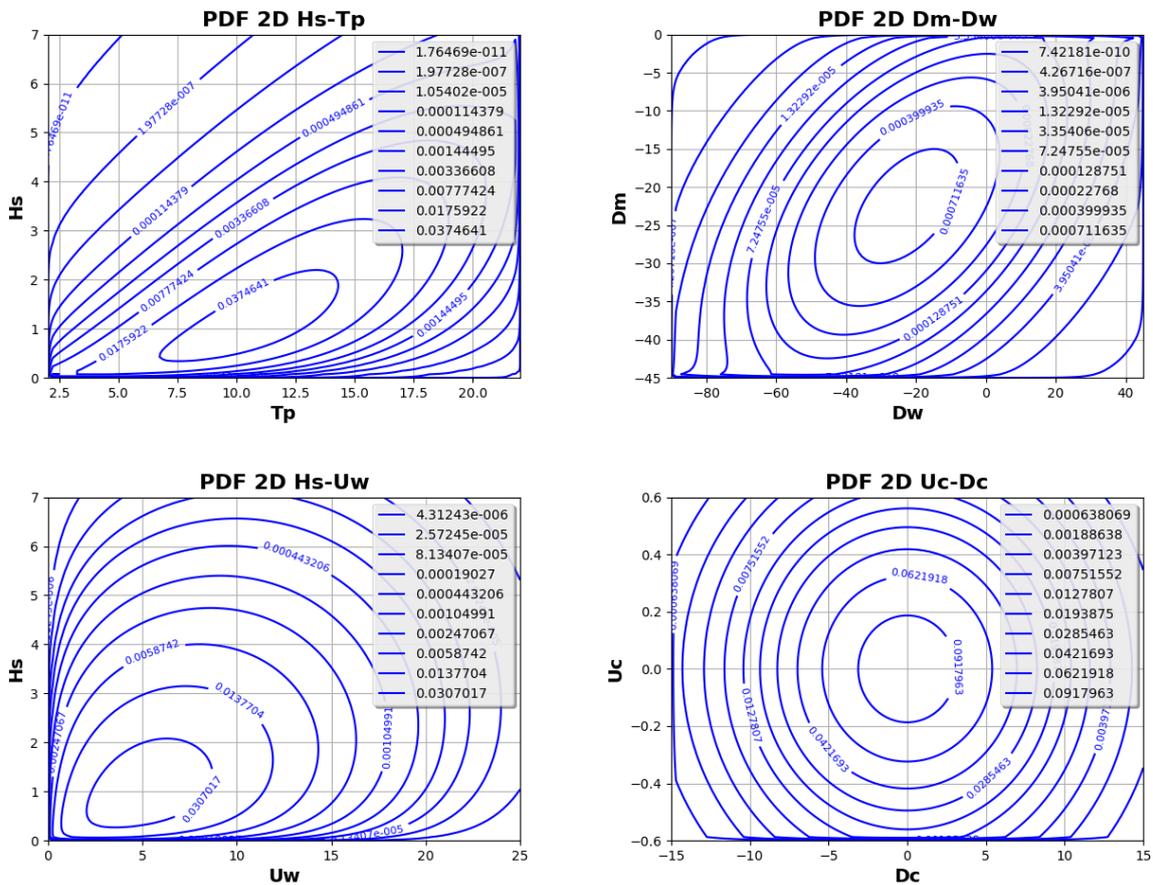


Figure 2.11 : Distributions 2D des paramètres environnementaux, effet de la corrélation

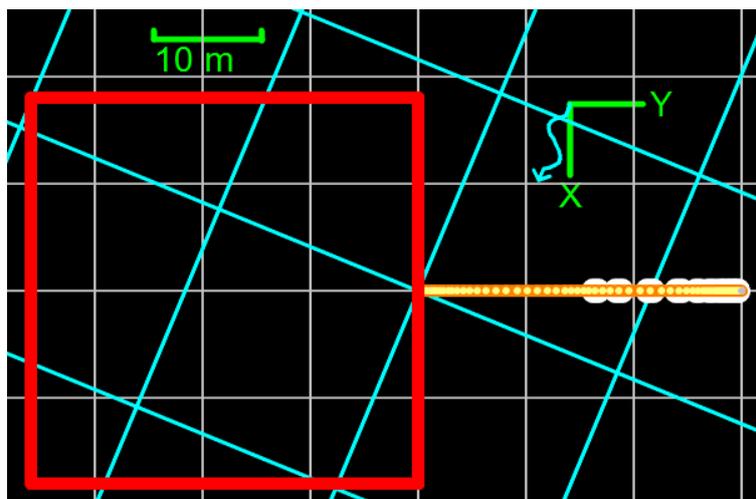


Figure 2.12 : Orientation des axes du repère global, propagation de la houle vers $-22,5^\circ$

Les directions de propagation de la houle, du vent et du courant sont données par rapport à l'axe X du repère global (voir Figure 2.12). L'axe X du repère global correspond à la direction moyenne du courant. L'ombilical est déployé dans le plan orthogonal à cet axe.

2.6 Paramétrisation des caractéristiques du câble liées à la bio-colonisation

Les paramètres associés à la structure du câble (raideurs, amortissements..) sont ici supposés connus (sans incertitude). De même l'incertitude sur les caractéristiques géométriques de la configuration (point d'ancrage, longueur de câble, localisation des modules..) n'est pas considérée.

Les caractéristiques du câble étudiées ici sont donc uniquement celles affectées par la bio-colonisation. La répartition de la bio-colonisation le long du câble est supposée uniforme (épaisseur et densité constantes sur toute la longueur). La bio-colonisation sur les modules de flottabilité est également prise en compte, et de manière différenciée par rapport au câble, mais de façon identique pour tous les modules (Figure 2.13).

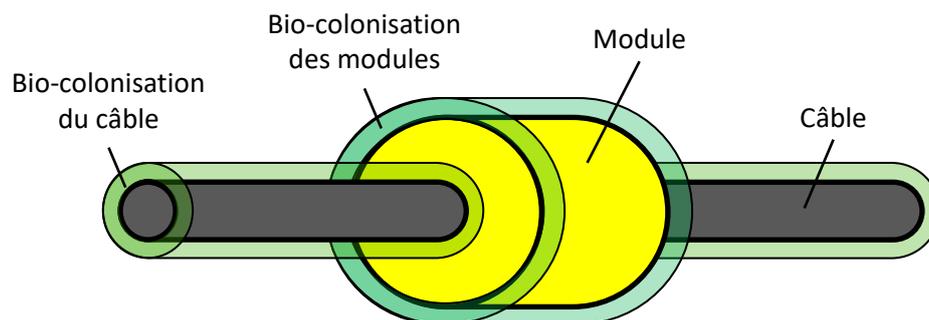


Figure 2.13 : Schéma de la répartition de la bio-colonisation sur le câble et les modules

Considérer des épaisseurs de bio-colonisation indépendantes entre le câble et les modules permet d'étudier dans une certaine mesure l'influence de la répartition de la bio-colonisation le long du câble, bien que les répartitions observables en pratique soient nettement plus complexes. L'effet de la répartition non-uniforme de la bio-colonisation a été étudié par (Spraul, Pham et al. 2017) pour des lignes d'ancrage synthétiques tendues et s'est révélé relativement faible. Il semble cependant que dans le cas d'un ombilical dynamique cet effet puisse être plus important.

Différentes paramétrisations sont envisageables pour décrire l'effet de la bio-colonisation sur les paramètres du câble. Les paramètres utilisés peuvent décrire directement les caractéristiques de la couche de bio-colonisation, ou bien ses effets sur les caractéristiques du câble.

La bio-colonisation sur le câble est classiquement décrite en termes d'épaisseur, de densité et de rugosité de la couche de bio-colonisation considérée. La rugosité de surface peut affecter fortement les caractéristiques hydrodynamiques du câble même pour des valeurs relativement faibles (Sarpkaya 1976). Ici la rugosité du câble peut être très grande car l'épaisseur de la couche de bio-colonisation est potentiellement du même ordre de grandeur que le diamètre du câble. Par ailleurs la relation entre la rugosité et les coefficients hydrodynamiques dépend également des nombres de Reynolds et Keulegan-Carpenter (Sarpkaya 1976). Il n'est donc pas aisé de modéliser cette relation dans les simulations numériques. Il a donc été jugé préférable de ne pas utiliser le paramètre rugosité pour décrire l'effet de la bio-colonisation sur les caractéristiques hydrodynamiques du câble, mais plutôt les coefficients de trainée C_d et de masse ajouté C_a . La bio-colonisation du câble est donc décrite par 4 paramètres : l'épaisseur e et la densité ρ de la couche de bio-colonisation, et les coefficients C_d et C_a du câble colonisé.

Une autre paramétrisation possible est celle utilisée par le logiciel OrcaFlex. La couche de bio-colonisation n'y est pas définie directement. Il est donc nécessaire de calculer les propriétés du câble équivalent. Le diamètre D et la masse M du câble sont donc modifiés en fonction de l'épaisseur et de la densité de la couche de bio-colonisation pour obtenir les valeurs effectives D_{eff} et M_{eff} de ces paramètres. Les coefficients hydrodynamiques C_d et C_a sont les mêmes que dans la paramétrisation précédente.

$$D_{eff} = D + 2e$$

$$M_{eff} = M + \rho \frac{\pi}{4} (D_{eff}^2 - D^2)$$

Le principal défaut de cette seconde paramétrisation est que la masse et le diamètre effectifs du câble colonisé sont très fortement corrélés lorsque sont considérées les variations dues à la bio-colonisation. En effet ces deux paramètres sont liés à l'épaisseur de la couche de bio-colonisation. En particulier la flottabilité nette du câble peut prendre des valeurs irréalistes si le diamètre de ce dernier est augmenté sans que sa masse ne soit accrue. Il n'est donc pas pertinent de supposer que les paramètres de la seconde distribution sont indépendants.

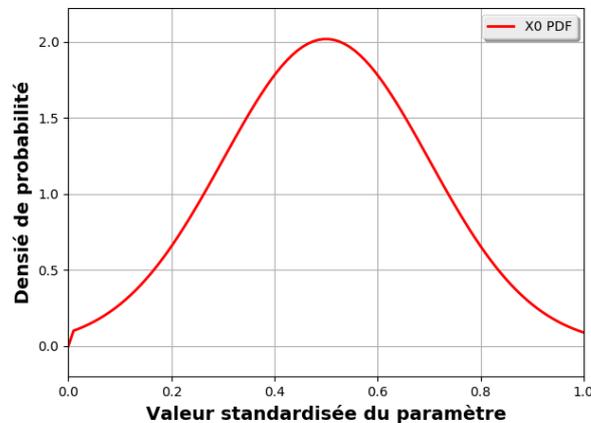
En revanche, avec la première paramétrisation l'hypothèse est faite, bien que cela soit discutable, que les paramètres d'épaisseurs, de densités et les coefficients C_d et C_a sont indépendants. Il est en effet préférable pour les analyses de sensibilité réalisées dans la suite de travailler avec des paramètres indépendants. Il est donc également supposé que les paramètres associés au câble sont indépendants de ceux associés aux modules.

Table 2.6 : Intervalles de variation des paramètres du câble liés à la bio-colonisation

Paramètre	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
Unité	m	kg/m ³	-	-	m	kg/m ³	-	-
Borne inférieure	0,00	1100	0,8	0,7	0,00	1100	0,8	0,7
Borne supérieure	0,05	1300	1,4	1,3	0,05	1300	1,4	1,3

Pour chacun des 8 paramètres retenus (4 pour le câble et 4 pour les modules), un intervalle de variation est défini et donné dans la Table 2.6. Il peut en particulier être noté que l'épaisseur maximale de la couche de bio-colonisation, aussi bien pour le câble que pour les modules, est fixée à 5cm. Cette valeur peut paraître faible au regard des observations réalisées et de l'espèce considérée (moule bleue). Il convient cependant de remarquer que cette épaisseur étant appliquée de façon uniforme sur toute la longueur du câble, la masse totale de la bio-colonisation varie de façon importante, dans un intervalle considéré raisonnable.

Pour chaque paramètre cet intervalle de variation est ramené à l'intervalle de 0 à 1. La distribution marginale a priori du paramètre est alors définie comme suivant une loi normale de moyenne 0,5 et d'écart-type 0,2 tronquée entre 0 et 1 (voir Figure 2.14).

**Figure 2.14 : Distribution marginale des paramètres liés à la bio-colonisation**

Dans les chapitres suivant les choix de modélisation décrits ici sont appliqués afin de calculer la réponse dynamique de l'ombilical, et pour estimer le dommage.

3 Utilisation d'un méta-modèle en remplacement de la simulation numérique

3.1 Principes et objectifs

L'utilisation d'un méta-modèle consiste à approximer la réponse d'un modèle dont l'évaluation est trop longue ou trop coûteuse en utilisant un autre modèle dont l'évaluation est plus rapide. Il s'agit donc d'un modèle du modèle. L'objectif est de réaliser un gain de temps lors de l'évaluation du modèle, cependant la construction du méta-modèle nécessite généralement elle-même un grand nombre d'évaluations du modèle initial. L'utilisation d'un méta-modèle ne s'avère donc avantageuse que dans des applications nécessitant un nombre élevé d'évaluations. C'est en particulier le cas des approches fiabilistes et des études de sensibilité globales qui doivent ici être réalisées avec un nombre important de paramètres en entrée du modèle.

Différentes sortes de méta-modèles peuvent être utilisés. La construction d'une surface de réponse consiste à déterminer les paramètres d'une fonction d'approximation relativement simple (par rapport au phénomène modélisé) en s'appuyant sur un plan d'expérience. La méthode du krigeage s'appuie par exemple sur une interpolation spatiale à partir des points du jeu d'apprentissage pour construire une telle approximation, mais permet en outre d'estimer l'incertitude sur ses prédictions. Des outils d'apprentissage automatique peuvent également être employés, comme par exemple les réseaux de neurones artificiels. Dans la littérature ce type d'approche a déjà été appliqué pour prédire la réponse de lignes d'ancrage (Wang 2014, de Pina 2013), ou encore de risers (Quéau 2015).

Selon les cas chaque approche peut s'avérer plus ou moins avantageuse. Le coût de construction (nombre d'évaluations du modèle nécessaires à constituer le jeu d'apprentissage) pour atteindre un niveau d'erreur donné peut varier selon la méthode retenue. Dans les applications où le nombre d'entrées du méta-modèle est important par exemple, les réseaux de neurones artificiels sont a priori intéressants, un de leurs principaux usages étant la reconnaissance de formes dans des images. Dans le cadre des analyses de sensibilité en revanche il peut être intéressant de disposer d'une formulation mathématique spécifique. À cette fin l'utilisation d'une surface de réponse basée sur un développement sur chaos polynomial a fait l'objet de nombreux travaux de recherche (Sudret 2008, Caniou 2012) et semble donc une option intéressante.

Différents types de méta-modèle sont donc comparés dans le cadre spécifique au cas d'application étudié. Par ailleurs le choix des entrées et sorties du méta-modèle, ainsi que du

domaine de validité recherché affecte grandement les performances obtenues. Différentes possibilités sont donc présentées dans la suite de ce chapitre.

Dans tous les cas l'utilisation d'un méta-modèle introduit une erreur vis-à-vis du modèle initial. Il convient donc de s'assurer que cette erreur est raisonnable par rapport à l'utilisation qui est faite du méta-modèle. La construction d'un méta-modèle est donc de manière générale basée sur 2 jeux de données. Un jeu d'apprentissage et un jeu d'évaluation. Le premier fournit l'information nécessaire à la construction de l'approximation. Le second permet de mesurer la qualité de l'approximation en des points du domaine qui n'ont pas servi à l'apprentissage.

3.2 Processus de construction

La première étape dans la construction d'un méta-modèle est de définir les entrées et les sorties de ce dernier. Les entrées et sorties du méta-modèle peuvent être les mêmes que celles du modèle initial, mais dans certains cas il peut être avantageux de réduire le nombre de variables d'entrées, et les sorties sont limitées aux seules variables d'intérêt selon l'application souhaitée.

Le domaine de validité du méta-modèle doit être défini. Il s'agit de fixer les limites de variation des entrées du modèle entre lesquelles il est souhaité que le méta-modèle soit valide. C'est-à-dire l'ensemble des points dans l'espace des paramètres d'entrées où il est prévu que le méta-modèle soit évalué.

Une pratique courante est de normaliser les entrées et les sorties afin de travailler sur des variables centrées réduites. L'intérêt est de se rapprocher des cas de référence pour lesquels des valeurs recommandées des paramètres de constructions des méta-modèles existent. La moyenne et l'écart-type de chaque variable doivent donc être estimés. Dans la suite cette estimation est réalisée à partir du jeu de données utilisé pour la construction du méta-modèle.

La constitution du jeu de données nécessaire à la construction du méta-modèle nécessite un plan d'expérience. L'objectif est de fournir une quantité suffisante d'informations à l'algorithme qui réalise l'apprentissage du méta-modèle pour atteindre un niveau d'erreur satisfaisant sur l'ensemble du domaine de validité. L'apprentissage consiste à calibrer les paramètres de l'approximation pour minimiser l'erreur sur les points fournis à l'algorithme. Le jeu de données utilisé pour l'apprentissage doit donc couvrir au mieux le domaine de validité. En particulier, il peut être souhaitable d'augmenter le nombre de points dans certaines régions spécifiques afin d'y diminuer davantage l'erreur. Il peut également être envisagé d'adapter le plan d'expérience pendant la phase

d'apprentissage afin d'augmenter le nombre de points là où l'erreur du méta-modèle est la plus grande (Kleijnen 2009).

Dans les applications présentées ici, le plan d'expérience consiste à réaliser un tirage aléatoire en fonction de la distribution supposée des variables d'entrées retenues pour le méta-modèle. L'objectif est de couvrir le domaine d'étude en minimisant l'erreur autour des points de fonctionnement considérés comme les plus probables.

Enfin il est nécessaire de quantifier l'erreur de l'approximation. L'erreur entre le méta-modèle et le modèle ayant été minimisée sur les points du jeu d'apprentissage il convient la mesurer sur des points qui n'ont pas servi à la phase d'apprentissage. Un second jeu de données appelé jeu de validation doit donc être constitué. Ici le choix est fait de construire un unique jeu de données à partir du plan d'expérience décrit précédemment et de partager celui-ci en deux : les trois-quarts servant à l'apprentissage et le dernier quart à la validation.

3.3 Mesure de l'erreur

L'erreur du méta-modèle par rapport au modèle initial (qui est ici la simulation numérique) est définie au sens des moindres carrés. Dans la suite cette mesure de l'erreur est appelée erreur RMSE. Celle-ci est estimée sur un échantillon de n évaluations du modèle initial en utilisant l'expression suivante.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - z_i)^2}$$

Où y_i désigne la sortie du modèle numérique pour le cas de chargement i , et z_i la sortie du méta-modèle.

L'erreur normalisée s'obtient en divisant l'erreur par l'écart-type obtenu sur les sorties du modèle initial (\bar{y} désigne la valeur moyenne de la sortie du modèle).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$
$$NRMSE = \frac{RMSE}{\sigma}$$

L'erreur normalisée permet notamment de comparer les erreurs obtenues sur différentes sorties dont les ordres de grandeur peuvent être très différents. Lorsque la sortie considérée est normalisée (moyenne nulle et écart-type unitaire) l'erreur l'est de façon automatique.

L'estimation de l'erreur d'un méta-modèle est réalisée sur un jeu de données de validation différent du jeu ayant servi à l'apprentissage. Cette mesure de l'erreur est utilisée dans la suite pour estimer l'incertitude sur les prédictions du méta-modèle. En particulier il est supposé que l'erreur entre le méta-modèle et la simulation numérique est indépendante des entrées du méta-modèle et suit une loi Normale de moyenne nulle et d'écart-type égale à l'erreur RMSE. L'hypothèse d'indépendance de l'erreur vis-à-vis des entrées est discutable puisque l'erreur sera probablement plus faible dans les zones concentrant le plus de points dans le jeu d'apprentissage. Le tirage de ces points est en effet réalisé ici suivant leurs probabilités d'occurrence supposées.

3.4 Sorties considérées

Les sorties du méta-modèle sont ici choisies parmi les sorties de la simulation numérique. La réponse de l'ombilical peut être décrite en termes de tension et de courbures (courbures autour des axes du repère local du câble), ou bien en termes de positions des points du câble dans le repère global. La torsion n'étant pas prise en compte dans les simulations réalisées, elle n'est pas non plus utilisée comme une sortie. Les sorties considérées ici sont donc la tension T , la courbure dans le plan de l'ombilical C_x , la courbure hors-plan C_y , et les positions X, Y, Z des nœuds dans le repère global. La simulation numérique renvoie pour chacune de ces sorties et en chaque nœud du modèle un signal temporel.

En pratique il n'est pas évident d'utiliser un signal temporel comme sortie d'un méta-modèle, sauf à utiliser également un signal temporel en entrée (de Pina 2013). Dans le contexte de la calibration des paramètres liés à la bio-colonisation cela supposerait cependant de disposer de mesures synchronisées entre les entrées et les sorties utilisées. Le choix est donc fait ici d'extraire des signaux temporels des différentes sorties, des statistiques descriptives tels que la moyenne $\mu_t(\cdot)$ et l'écart-type $\sigma_t(\cdot)$, calculés à partir des valeurs discrètes de ces sorties aux instants t_k . Pour une grandeur X donnée, la moyenne et l'écart-type temporels sont notée X_μ et X_σ . Ces sorties dépendent alors de la simulation sim_i considérée, mais également de l'abscisse curviligne x_j qu'il convient donc de fixer.

$$X_\mu(sim_i, x_j) = \mu_t(X) = \frac{1}{N_t} \sum_{k=0}^{N_t-1} X(sim_i, x_j, t_k)$$

$$X_\sigma(sim_i, x_j) = \sigma_t(X) = \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{k=0}^{N_t-1} (X(sim_i, x_j, t_k) - X_\mu(sim_i, x_j))^2}$$

Une autre possibilité étudiée est d'utiliser la densité spectrale de puissance des signaux, en calculant l'énergie du signal sur certaines plages de fréquence.

Le dommage est également utilisé dans la suite comme sortie des méta-modèles, en particulier pour les analyses de sensibilité.

Quelle que soit la sortie considérée, celle-ci est transformée pour obtenir une variable centrée-réduite en utilisant la moyenne et l'écart-type calculés sur le jeu de construction du méta-modèle. Il en va de même pour les entrées du modèle. Par exemple pour une sortie X_μ , la variable centrée-réduite \overline{X}_μ est calculée comme suit, où $\mu_{sim}(\cdot)$ réalise la moyenne sur l'ensemble des simulations du jeu de données.

$$\overline{X}_\mu(sim_i, x_j) = \frac{X_\mu(sim_i, x_j) - \mu_{sim}(X_\mu)}{\sigma_{sim}(X_\mu)}$$

3.5 Application pratique : développement sur chaos polynomial

Le développement sur chaos polynomial consiste à construire une surface de réponse à partir d'une famille de fonctions polynomiales. Le choix de la famille de polynômes qui constitue la base sur laquelle le développement est réalisé dépend de la distribution supposée des entrées du modèle. En effet il est important que la famille de polynômes choisie soit orthonormée pour la mesure correspondant à cette distribution. Dans le cas présent une distribution normale est supposée pour les variables d'entrée du modèle et ce sont par conséquent les polynômes d'Hermite qui sont employés. L'implémentation est réalisée en utilisant la librairie OpenTURNS.

En pratique le nombre de termes du développement polynômial doit être limité. Pour cela, dans le cas présent, le degré maximal des termes du développement est fixé à 4. Par ailleurs une stratégie de sélection est ici employée pour ne conserver au maximum que 50 termes en écartant les termes dont la contribution est négligeable. Les coefficients des termes polynômiaux sont alors déterminés en minimisant l'erreur au sens des moindres carrés sur les points du jeu d'apprentissage (régression).

Dans l'application présentée ici, le méta-modèle doit se substituer aux simulations numériques de la réponse dynamique de l'ombilical pour la configuration 36m. Les variables d'entrées considérées sont limitées aux seuls paramètres liés à la bio-colonisation du câble (les paramètres à

calibrer). Les paramètres liés à l’environnement sont donc fixés (cas CC1, voir Table 4.2). Deux sorties sont étudiées, la position moyenne sur l’axe Z (vertical) du point médian (à 30m du HOP), et le dommage à 35m du HOP.

Le jeu d’apprentissage est donc constitué en considérant que les paramètres environnementaux sont fixes et que les paramètres du câble varient. Le plan d’expérience employé consiste à réaliser un tirage aléatoire (méthode de Monte Carlo) suivant la distribution supposée de chacun des paramètres (voir partie 2.6), ces derniers étant supposés indépendants. Le jeu de validation est construit suivant le même plan d’expérience. En pratique un unique tirage est réalisé, et les simulations sont effectuées pour l’ensemble des échantillons afin d’évaluer les sorties du modèle. Puis le jeu de données ainsi constitué est partagé en deux, trois-quarts servant au jeu d’apprentissage et le quart restant au jeu de validation.

Le coût de construction du méta-modèle correspond au nombre de simulations réalisées pour constituer les jeux d’apprentissage et de validation. Le temps nécessaire au calcul des coefficients du développement polynômial apparaît relativement négligeable. L’erreur sur les sorties dépend toutefois du nombre de simulations utilisées dans le jeu de données. La Figure 3.1 présente l’évolution de l’erreur sur les deux sorties considérées ici en fonction du nombre de simulations utilisées.

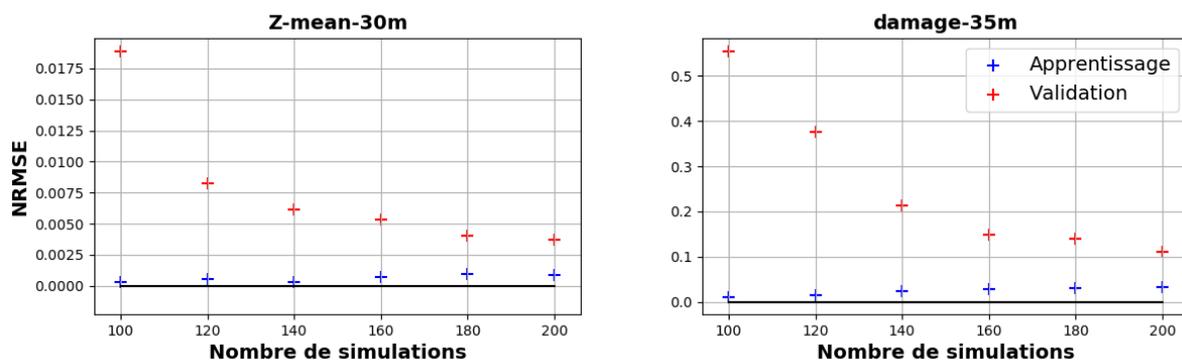


Figure 3.1 : Évolution de l'erreur du méta-modèle en fonction du nombre de simulations utilisées dans le jeu de données

Il apparaît que l’augmentation du nombre de simulations permet de diminuer l’erreur sur le jeu de validation tandis que l’erreur sur le jeu d’apprentissage augmente légèrement. En effet lorsque trop peu de simulations sont utilisées pour construire le méta-modèle il y a sur-apprentissage. C’est-à-dire que les paramètres de l’approximation s’adaptent aux spécificités du jeu d’apprentissage. Dans ces conditions l’erreur sur le jeu de validation est généralement importante. Lorsque le nombre de

simulations devient grand l'erreur sur le jeu de validation converge vers l'erreur sur le jeu d'apprentissage.

Pour déterminer le nombre de simulations nécessaires à la construction du méta-modèle le critère de convergence peut donc être basé sur le rapport entre l'erreur sur le jeu de validation et l'erreur sur le jeu d'apprentissage.

Ici avec 200 simulations (150 pour le jeu d'apprentissage), l'erreur sur le jeu de validation est encore relativement importante : environ 4 fois supérieure à celle sur le jeu d'apprentissage pour les deux sorties. Elle reste néanmoins acceptable, c'est pourquoi ce jeu d'apprentissage constitué de 200 simulations est utilisé dans la suite.

3.6 Application pratique : krigeage

Les méthodes de krigeage sont basées sur l'hypothèse que la sortie du modèle peut être considérée comme un processus gaussien, avec un modèle de covariance (variogramme) dont la forme est supposée connue mais dont les paramètres restent à déterminer. C'est-à-dire que pour tout point dans l'espace des variables d'entrée la sortie du modèle suit une loi normale, et que pour deux points donnés dans l'espaces des variables d'entrées, les sorties correspondantes suivent une loi normale multidimensionnelle et sont corrélées suivant le modèle de covariance choisi.

L'approche dite de krigeage universelle suppose une décomposition de la sortie entre une part déterministe correspondant à l'espérance, et une part aléatoire qui devient alors un processus gaussien d'espérance nulle (qui est donc défini par son modèle de covariance). L'objectif de la phase d'apprentissage est alors d'optimiser les paramètres de la fonction d'approximation de l'espérance d'une part, et du modèle de covariance d'autre part de façon à maximiser leur vraisemblance au vu des données du jeu d'apprentissage.

En pratique le krigeage permet de réaliser une interpolation spatiale entre les points du jeu d'apprentissage. La particularité du krigeage est toutefois de permettre d'estimer l'incertitude sur les prédictions. L'incertitude est liée à la fonction de corrélation et dépend principalement de la distance aux points du jeu d'apprentissage : plus le point où le méta-modèle est évalué est éloigné des points du jeu d'apprentissage plus l'incertitude est forte.

Dans l'application présente un modèle linéaire est employé pour l'approximation de l'espérance de la sortie, et la fonction de corrélation utilisée est une gaussienne centrée. Cette implémentation est réalisée en utilisant la librairie OpenTURNS.

Afin de comparer les performances de ce type de méta-modèle avec le développement sur chaos polynomial (PCE) employé précédemment, les mêmes jeux d'apprentissage et de validation (200 simulations en tout), avec les mêmes entrées et sorties, sont utilisés. L'erreur mesurée sur le jeu de validation pour les deux approches est donnée dans la Table 3.1 pour les deux sorties étudiées.

Table 3.1 : Comparaison de l'erreur NRMSE entre le krigeage et le développement sur chaos polynomial

Sortie	Position Z moyenne à 30m	Domage à 35m
PCE	0,37%	11%
Krigeage	0,50%	3,4%

Il apparaît que le krigeage fournit une meilleure approximation pour le dommage à coût de construction égal. L'erreur sur la position verticale moyenne est très faible et comparable entre les deux méthodes. La Figure 3.2 permet de visualiser l'erreur sur le dommage des méta-modèles, pour les deux méthodes, en comparant point par point la sortie du méta-modèle avec la sortie du modèle. L'erreur est mesurée sur le jeu de validation représenté en rouge. Pour le krigeage l'erreur sur les points du jeu d'apprentissage est nulle par construction.

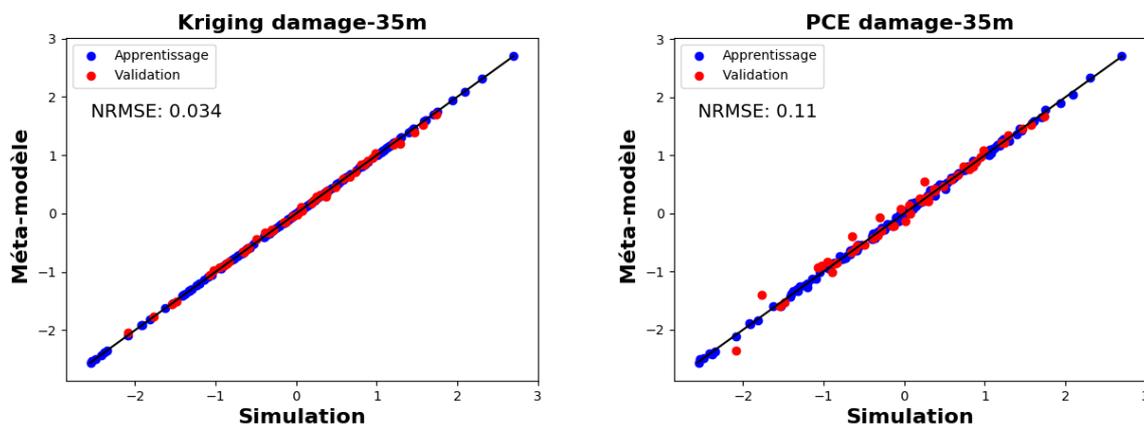


Figure 3.2 : Erreur des méta-modèles krigeage et chaos polynomial sur le dommage

Le principal intérêt du krigeage est en outre de permettre une estimation de l'incertitude en fonction du point où le méta-modèle est évalué. Par rapport à la mesure NRMSE de l'erreur qui est fixe, l'incertitude renvoyée par le krigeage varie ainsi de 20% à 480% sur le jeu de validation (soit de 0,07% à 16% de l'écart-type sur le dommage). Il est constaté néanmoins que les valeurs moyennes des incertitudes annoncées par le krigeage sur ses prédictions (sur le jeu de validation) correspondent pour les deux sorties aux erreurs NRMSE mesurées.

Un histogramme de l'erreur réduite (erreur de prédiction divisée par l'incertitude annoncée) est donné sur la Figure 3.3 pour la sortie « dommage ». L'écart-type de l'erreur réduite est proche de 1 pour les deux sorties (0,98 et 1,3), l'estimation de l'incertitude par le méta-modèle apparaît donc ici satisfaisante.

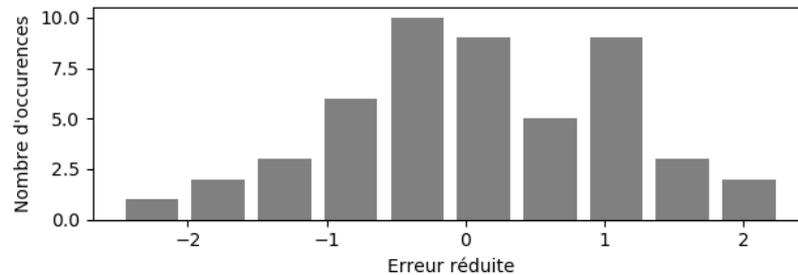


Figure 3.3 : Histogramme de l'erreur réduite sur le dommage estimé par krigeage

Les avantages du krigeage par rapport au développement sur chaos polynomial sont donc d'une part une précision accrue sur la prédiction du dommage (à coût de construction égal), et d'autre part la possibilité d'estimer l'erreur en fonction du point où le méta-modèle est évalué, ce qui semble intéressant dans le cadre de l'approche bayésienne pour la calibration. Le développement sur chaos polynomial présente néanmoins un intérêt dans le cadre des analyses de sensibilité qui sont réalisées dans la suite.

3.7 Application pratique : réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels sont composés de couches de neurones. Le fonctionnement d'un neurone artificiel est basé sur un schéma simplifié du fonctionnement d'un neurone biologique : de multiples entrées (dendrites) et une unique sortie (axone), des poids sont associés à chaque entrée et la sortie est obtenue en appliquant une fonction d'activation (avec l'idée d'un seuil) à la combinaison linéaire des entrées (Figure 3.4). Des fonctions d'activation typiques sont la tangente hyperbolique ($\mathbb{R} \mapsto [-1; 1]$) ou la fonction sigmoïde ($\mathbb{R} \mapsto [0; 1]$). Il est également possible d'utiliser la fonction identité, dans ce cas la sortie du neurone est une combinaison linéaire des entrées.

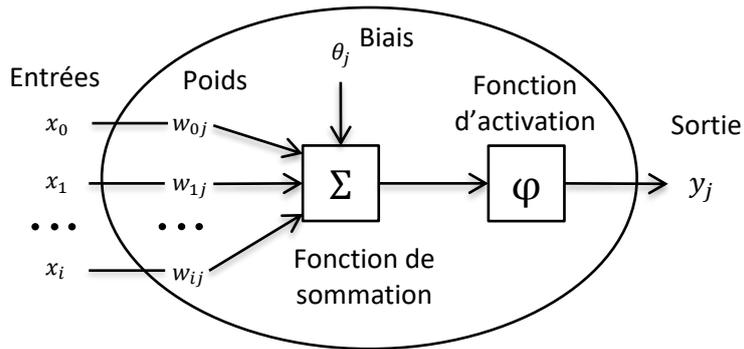


Figure 3.4 : Fonctionnement d'un neurone artificiel

Chaque neurone d'une couche donnée prend comme entrées l'ensemble des sorties de la couche précédente, ou dans le cas de la première couche l'ensemble des entrées du modèle. Les sorties de la dernière couche sont les sorties du modèle. L'architecture du réseau décrit le nombre de couches, le nombre de neurones par couche et la façon dont les couches sont reliées entre elles. Le cas le plus simple consiste en un modèle séquentiel où les sorties de chaque couche constituent les entrées de la couche suivante. La Figure 3.5 donne l'exemple d'un réseau de neurones comportant une seule couche intermédiaire et une couche de sorties.

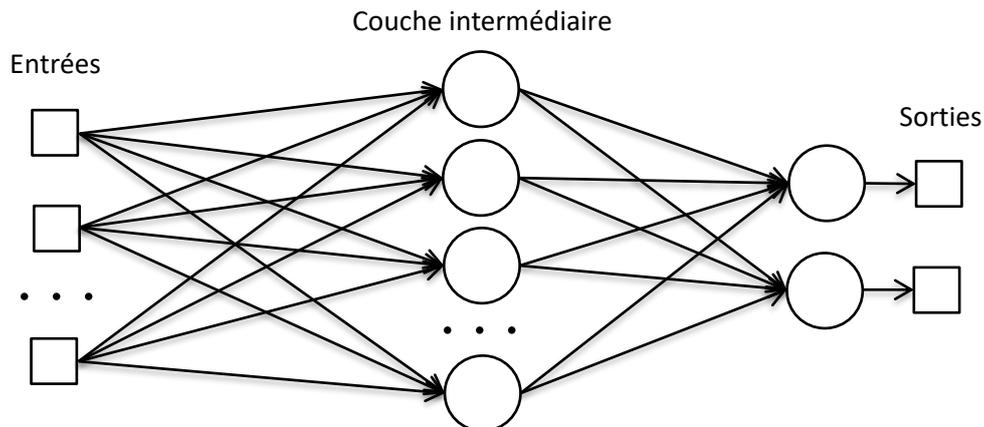


Figure 3.5 : Architecture d'un réseau de neurone avec une seule couche intermédiaire

L'apprentissage du réseau de neurone est fait par rétro-propagation du gradient de l'erreur (LeCun 1985). Pour chaque point du jeu d'apprentissage la sortie du méta-modèle est calculée puis comparée à la sortie du modèle. En utilisant la dérivée de la fonction d'activation, l'erreur est propagée aux neurones de la couche précédente jusqu'à arriver à la première couche. Les paramètres du réseau de neurones (poids et biais de chaque neurone) sont alors corrigés en fonction de leur influence sur l'erreur. Le processus est itératif et le jeu d'apprentissage est parcouru à plusieurs reprises. Le risque de sur-apprentissage est important. Il est donc d'usage d'arrêter l'apprentissage lorsque l'erreur sur le jeu de validation ne diminue plus.

Dans l'application présente, une couche intermédiaire unique avec 64 neurones est utilisée avec une seule sortie. La fonction d'activation des neurones de la couche intermédiaire est la fonction sigmoïde (choix classique), et l'identité pour le neurone de la couche de sortie. L'augmentation du nombre de neurones (toujours sur une seule couche) n'a pas permis d'améliorer les résultats. Cette implémentation est réalisée en utilisant la librairie Keras (Chollet 2015).

Le réseau de neurones est entraîné pour chacune des deux sorties étudiées et son erreur est comparée à l'erreur du méta-modèle de type chaos polynomial (Table 3.2).

Table 3.2 : Comparaison de l'erreur NRMSE entre le réseau de neurones artificiels et le développement sur chaos polynomial

Sortie	Position Z moyenne à 30m	Domage à 35m
PCE	0,37%	11%
ANN	3,5%	6,5%

L'erreur sur le dommage est plus faible en utilisant le réseau de neurones, mais pour la position verticale moyenne le développement sur chaos polynomial est plus performant. Il est intéressant de noter que l'erreur obtenue est relativement similaire avec le réseau de neurones artificiels sur les deux sorties étudiées, alors que les méthodes précédentes (PCE et krigeage) sont nettement plus performantes sur la sortie position verticale moyenne que sur le dommage.

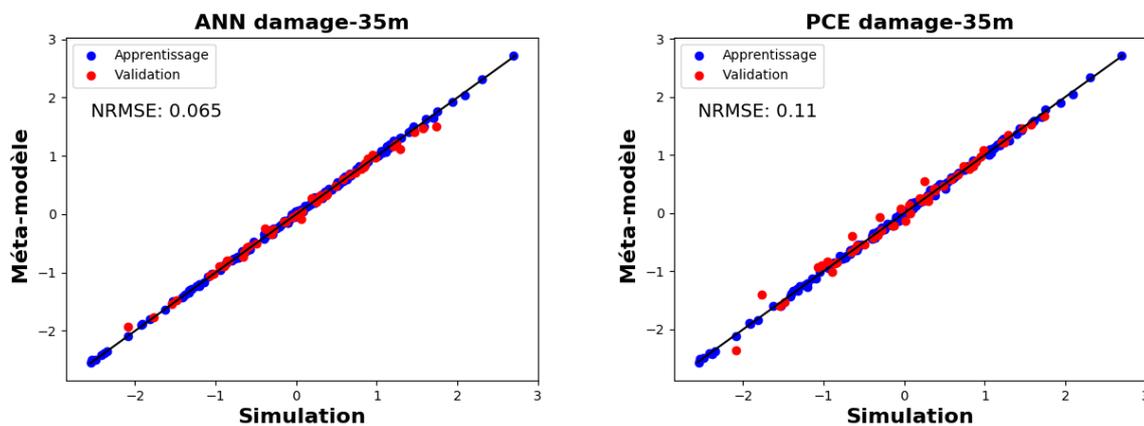


Figure 3.6 : Erreur des méta-modèles réseau de neurones et chaos polynomial sur le dommage

La Figure 3.6 compare, pour le dommage, la réponse des deux méta-modèles aux résultats issus des simulations. Il semble pour le réseau de neurones que l'erreur sur le jeu de validation soit plus importante pour les valeurs extrêmes du dommage, qui apparaissent « bornées ». Il est possible que cette observation soit liée à l'utilisation de la fonction sigmoïde comme fonction d'activation. Sur le jeu d'apprentissage en revanche l'erreur est faible sur les valeurs extrêmes du dommage, ce qui traduit peut-être du sur-apprentissage dans les régions où les observations sont moins nombreuses.

Pour la calibration, il est en premier lieu important de disposer d'une erreur faible sur les sorties décrivant la réponse du câble. Les réseaux de neurones artificiels ne semblent donc pas ici être une option intéressante en comparaison aux méthodes précédentes (PCE et krigeage).

3.8 Prise en compte des paramètres environnement

Le choix des entrées du méta-modèle est particulièrement important et doit donc être pertinent vis-à-vis de l'utilisation souhaitée. En particulier le nombre de paramètres en entrée du modèle peut avoir une influence forte sur le coût de construction du méta-modèle. En effet plus le nombre d'entrées est important plus la complexité du méta-modèle augmente et l'apprentissage requiert alors généralement davantage d'évaluations du modèle à approximer pour atteindre un niveau de précision donné.

Pour réduire le nombre de paramètres d'entrée pris en compte par le méta-modèle, les paramètres les moins influents sont en premier lieu écartés. Ce faisant l'erreur structurelle du méta-modèle augmente puisque les variations dues aux paramètres écartés ne peuvent plus être expliquées. Néanmoins l'erreur du méta-modèle liée aux limitations du jeu d'apprentissage peut à l'inverse diminuer puisque la complexité du méta-modèle est moindre.

Dans le cas présent un certain nombre de paramètres ont déjà été écartés puisque le choix a été fait de limiter l'étude aux paramètres de l'environnement et aux paramètres liés à la bio-colonisation tels que décrit dans les parties 2.5 et 2.6. L'erreur liée à ces paramètres écartés n'est toutefois pas estimée.

Une autre possibilité pour faciliter la construction du méta-modèle est de limiter son domaine de validité. Les intervalles de variation de certains paramètres peuvent ainsi être réduits, quitte à construire plusieurs méta-modèles pour couvrir l'ensemble des variations attendues. Il est ici envisagé de fixer complètement les valeurs d'une partie des paramètres : ceux qui feront l'objet de mesures.

La première option étudiée a en effet consisté à construire un méta-modèle valide pour des conditions d'environnement fixes. Il est alors supposé que les paramètres environnementaux sont connus et que leur valeur est fixée en fonction des mesures. Les entrées du méta-modèle sont ainsi réduites aux seuls paramètres à calibrer (les paramètres liées à la bio-colonisation), comme illustré sur la Figure 3.7. Toutefois, bien que le coût de construction du méta-modèle soit relativement faible, il doit être répété à chaque calibration, pour chacun des cas de chargement utilisés.

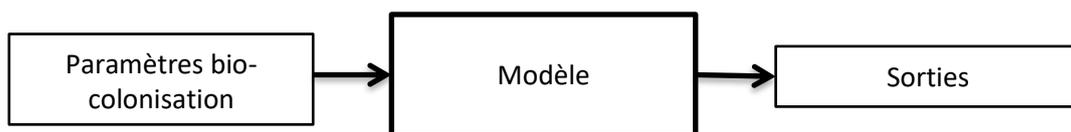


Figure 3.7 : Modèle pour un cas de chargement fixe

La seconde option consiste maintenant à construire un méta-modèle valide pour l'ensemble des cas de chargement. Les paramètres environnementaux sont alors également utilisés comme entrées du modèle (Figure 3.8). L'avantage est que le méta-modèle n'est construit qu'une seule fois. Le même jeu d'apprentissage peut également être utilisé pour construire un méta-modèle pour l'estimation de l'espérance du dommage a priori. Cependant le coût de construction du méta-modèle pour atteindre un niveau d'erreur comparable au cas précédent risque d'être nettement plus élevé. C'est l'objet de l'étude présentée ci-après.

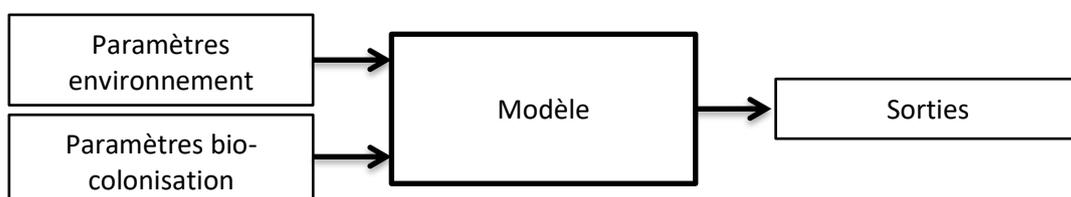


Figure 3.8 : Modèle incluant les paramètres environnementaux

La construction de ce méta-modèle, valide pour l'ensemble des cas de chargement, nécessite de constituer un nouveau jeu de données pour son apprentissage et sa validation. Le plan d'expérience est le même que précédemment : un tirage aléatoire selon les densités de probabilité supposées des paramètres. Comme précédemment une étude de convergence est menée pour déterminer le nombre de simulations dans le jeu de données. Pour cette étude de convergence un méta-modèle de type PCE est utilisé (degré max fixé à 4, nombre de termes limité à 50). La Figure 3.9 présente les résultats de cette étude.

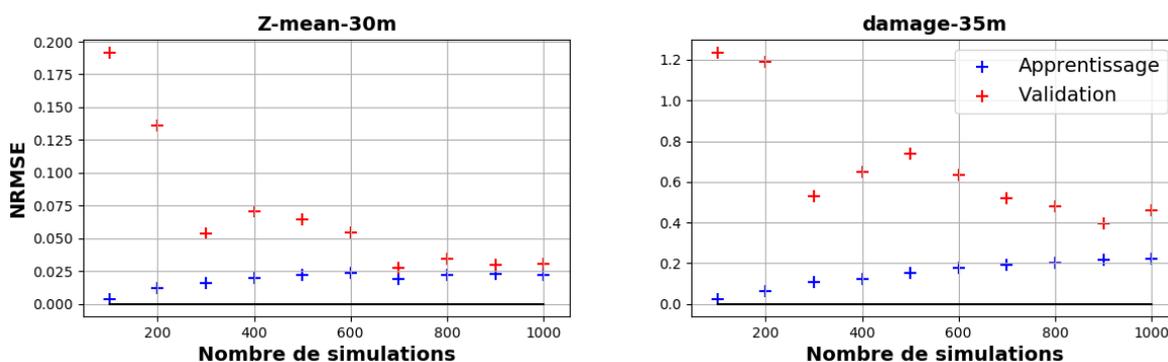


Figure 3.9 : Évolution de l'erreur du méta-modèle en fonction du nombre de simulations utilisées dans le jeu de données, modèle complet

Il apparaît nécessaire d'employer un nombre de simulations plus important. Dans la suite 1000 simulations sont utilisées (contre 200 dans le cas où le cas de chargement est fixe). En particulier, l'erreur sur le jeu d'apprentissage apparaît nettement plus élevée, un niveau de convergence plus avancé a donc été recherché. L'erreur NRMSE sur le dommage sur le jeu de validation reste cependant très importante (environ 4 fois la valeur obtenue pour le cas de chargement fixe).

L'erreur sur le jeu d'apprentissage étant importante, l'influence du degré maximal fixé, ainsi que du nombre de termes, a également été étudiée. Les résultats sont donnés Table 3.3 et Table 3.4.

Table 3.3 : Influence du degré maximal des termes du développement sur l'erreur

Degré maximal		2	3	4	5
Position Z moyenne à 30m	Err. App.	0,035	0,028	0,022	0,023
	Err. Val.	0,039	0,036	0,031	0,035
	Ratio	1,1	1,3	1,4	1,5
Dommage à 35m	Err. App.	0,42	0,27	0,22	0,21
	Err. Val.	0,71	0,63	0,46	0,58
	Ratio	1,7	2,3	2,1	2,8

Table 3.4 : Influence du nombre maximal de termes dans le développement sur l'erreur

Nombre de termes		25	50	75	100
Position Z moyenne à 30m	Err. App.	0,035	0,022	0,017	0,014
	Err. Val.	0,037	0,031	0,030	0,027
	Ratio	1,1	1,4	1,7	1,9
Dommage à 35m	Err. App.	0,30	0,22	0,18	0,14
	Err. Val.	0,53	0,46	0,63	0,52
	Ratio	1,8	2,1	3,6	3,7

Il apparaît qu'à nombre de simulations fixe dans le jeu d'apprentissage augmenter le degré max au-delà de 4 ne permet pas de diminuer significativement l'erreur. La durée nécessaire au calcul des coefficients du développement est en revanche fortement augmentée. L'augmentation du nombre de termes conservés dans le développement (en fixant le degré maximal à 4) permet en revanche de diminuer l'erreur sur le jeu d'apprentissage. Celle-ci reste cependant relativement importante et il apparaît surtout que l'erreur sur le jeu de validation ne diminue pas. Il semble donc que la convergence soit plus lente. Le nombre de simulations nécessaire pour atteindre un niveau d'erreur acceptable est donc a priori nettement supérieur aux 1000 utilisées.

L'erreur obtenue par les deux approches est comparée sur différentes sorties. Il doit cependant être considéré que les domaines de validité ne sont pas les mêmes, et que les jeux de validations sur lesquels ont été mesurées les erreurs des deux méta-modèles sont différents, avec un effet parfois très important sur l'écart-type des sorties étudiées (noté σ dans la Table 3.5).

Table 3.5 : Comparaison de l'erreur sur différentes sorties selon que le méta-modèle prend en compte ou non les paramètres environnementaux

Sorties - Distance du HOP			Tous les paramètres			Cas de chargement fixe		
			σ	RMSE	NRMSE	σ	RMSE	NRMSE
Tension	0 m	Moyenne	2,6E-01	7,2E-03	2,7%	2,6E-01	2,2E-04	0,1%
		Écart-type	4,9E-02	1,0E-02	21%	2,9E-02	1,3E-04	0,5%
Courbure X	30 m	Moyenne	1,9E-02	4,2E-03	22%	1,2E-02	7,0E-05	0,6%
		Écart-type	3,3E-03	9,3E-04	29%	9,2E-04	4,2E-05	4,5%
Courbure Y	30 m	Moyenne	3,7E-02	5,2E-03	14%	1,9E-03	1,3E-05	0,7%
		Écart-type	4,4E-03	1,4E-03	32%	1,3E-03	4,2E-05	3,3%
Position X	30 m	Moyenne	3,5	7,6E-01	22%	1,3E-01	1,0E-03	0,8%
		Écart-type	3,7E-01	2,5E-02	6,9%	5,2E-02	1,2E-03	2,3%
Position Y	30 m	Moyenne	9,7E-01	3,4E-01	35%	7,1E-01	2,0E-03	0,3%
		Écart-type	2,1E-01	1,7E-02	7,8%	1,4E-02	1,3E-03	9,0%
Position Z	30 m	Moyenne	1,3	3,8E-02	3,1%	1,2	4,3E-03	0,4%
		Écart-type	1,5E-01	1,8E-02	13%	4,1E-02	1,2E-03	3,0%
Domage	35 m		5,1E-08	2,3E-08	46%	7,9E-09	8,7E-10	11%

Il apparaît tout d'abord que l'influence des paramètres environnementaux est plus ou moins grande selon les sorties. En effet pour la tension moyenne du câble au niveau du HOP, ou la position verticale (Z) moyenne à 30m, l'écart-type évolue très peu en dépit de la prise en compte des variations des paramètres environnementaux. Les variations de ces 2 sorties sont donc principalement dues aux variations des paramètres liés à la bio-colonisation du câble. En revanche pour une majorité des sorties étudiées, dont le dommage et plus généralement les sorties liées aux variations temporelles de la réponse de l'ombilical (écarts-types), l'influence des paramètres environnementaux apparaît largement supérieure à celle des paramètres à calibrer.

L'erreur NRMSE du méta-modèle censé couvrir l'ensemble des cas de chargement est de manière générale largement supérieure à l'erreur du méta-modèle valide pour un cas de chargement spécifique. Dans le cas des 2 sorties où l'influence des paramètres liés à la bio-colonisation apparaît dominante, l'augmentation de l'erreur consécutive à la prise en compte des variations des paramètres environnementaux apparaît plus limitée mais néanmoins importante. En particulier l'erreur RMSE reste largement inférieure à l'ordre de grandeur des variations liées aux seuls paramètres de la bio-colonisation. Sur les sorties de type « valeurs moyennes des signaux

temporels » où l'influence des paramètres environnementaux est plus importante, l'erreur NRMSE est très forte (supérieure à 20%), et l'erreur RMSE est de l'ordre de l'écart-type des variations liées à la bio-colonisation.

Pour les sorties de type « écarts-types », les variations dues aux paramètres liés à la bio-colonisation apparaissent faibles, et l'erreur NRMSE du méta-modèle « cas de chargement fixe » y est plus forte que pour les sorties « valeurs moyennes ». Avec la prise en compte des paramètres environnementaux les variations sur ces sorties augmentent fortement. Selon les sorties l'erreur NRMSE est cependant assez variable. Pour les tensions et courbures l'erreur est de l'ordre de 20% à 30%, tandis que des niveaux d'erreur plus faibles (environ 10%) sont atteints pour les sorties de type positions. Dans la plupart des cas l'erreur RMSE lorsque tous les paramètres sont pris en compte par le modèle est de l'ordre de grandeur des variations liées aux paramètres environnement. L'usage d'un tel méta-modèle pour la calibration n'apparaît donc pas pertinent. Il est en effet probable que l'influence des paramètres liés à la bio-colonisation ne soit pas, ou mal, identifiée par le méta-modèle.

Pour le dommage l'erreur NRMSE, bien que déjà forte, augmente également passant de 11% à 46%. L'usage d'un méta-modèle pour prédire le dommage en fonction des paramètres environnement apparaît donc difficile.

L'utilisation d'un méta-modèle unique pour l'ensemble des cas de chargement n'est donc pas probante au vu des résultats obtenus avec le développement sur chaos polynomial.

Les méthodes basées sur le krigeage et sur les réseaux de neurones artificiels sont comparées au développement sur chaos polynomial dans la Table 3.6. Dans certains cas l'approximation polynomiale ne semble pas pertinente puisque de meilleurs résultats sont obtenus avec les autres méthodes. Cependant dans l'ensemble les niveaux d'erreur obtenus sont assez similaires.

Table 3.6 : Erreur NRMSE des différents types de méta-modèle

Sorties - Distance du HOP			PCE	Krigeage	ANN
Tension	0 m	Moyenne	2,7%	2,6%	5,6%
		Écart-type	21%	4,4%	9,9%
Courbure X	30 m	Moyenne	22%	20%	21%
		Écart-type	29%	12%	31%
Courbure Y	30 m	Moyenne	14%	7,7%	16%
		Écart-type	32%	11%	21%
Position X	30 m	Moyenne	22%	14%	19%
		Écart-type	6,9%	9,9%	14%
Position Y	30 m	Moyenne	35%	39%	47%
		Écart-type	7,8%	11%	14%
Position Z	30 m	Moyenne	3,1%	3,0%	7,9%
		Écart-type	13%	15%	14%
Domage	35 m		46%	38%	89%

De meilleurs résultats sont obtenus avec le krigeage, mais la durée d'apprentissage est nettement supérieure en comparaison avec le développement sur chaos polynomial, et de même la durée nécessaire à l'évaluation du modèle est nettement supérieure (35 fois plus longue). En effet les durées d'apprentissage et d'évaluation du méta-modèle de type krigeage sont liées au nombre de simulations dans le jeu d'apprentissage qui augmente les dimensions de la matrice de corrélation.

L'utilisation des réseaux de neurones artificiels donne dans certains cas de meilleurs résultats que le développement sur chaos polynomial, mais ne semble pas préférable dans l'ensemble. À nouveau la durée de l'apprentissage est sensiblement plus importante. La simplicité de l'approche polynomiale est ainsi préférée dans la suite des travaux présentés.

L'utilisation d'un méta-modèle unique tenant compte des différentes conditions d'environnement semble alors difficile dans ces conditions pour la majorité des sorties.

En effet pour la calibration des paramètres du câble, outre l'intérêt de disposer d'un méta-modèle précis, il est important que la relation entre les paramètres à calibrer et les sorties utilisées soit bien capturée. Or dans le cas où les paramètres environnementaux ont une influence très supérieure à celle des paramètres du câble, il est difficile de bien capturer la relation entre ces derniers et les sorties.

Dans la suite l'approche consistant à construire un nouveau méta-modèle pour chaque cas de chargement considéré est donc privilégiée.

3.9 Conclusions

L'approche envisagée pour le suivi en service de la durée de vie de l'ombilical nécessite l'utilisation de méta-modèles, en particulier pour la calibration des paramètres liés à la bio-colonisation du câble et des modules de flottabilité. L'utilisation de méta-modèles peut également être envisagée pour les analyses de sensibilité conduites a priori pour déterminer quels sont les paramètres les plus critiques et quelles sorties utiliser pour leur calibration. Enfin l'utilisation d'un méta-modèle peut également être intéressante suite aux étapes de calibration pour estimer l'incertitude restante sur le dommage.

Pour ces différentes applications, différents types de méta-modèles peuvent être envisagés. Dans ce chapitre, 3 types de méta-modèles ont été comparés : le développement sur chaos polynomial (PCE), le krigeage, et les réseaux de neurones artificiels (ANN). La comparaison a été réalisée à coût de construction constant, puisque le même jeu d'apprentissage a été employé dans les 3 cas. L'erreur NRMSE obtenue pour les 3 approches sur un jeu de validation, distinct du jeu d'apprentissage, a été comparée pour différentes sorties : le dommage, et différentes sorties pouvant éventuellement faire l'objet de mesures et être utilisées pour la calibration. Il a été observé en général que le krigeage permet d'obtenir des niveaux d'erreur plus faibles. Le développement sur chaos polynomial permet également sur un certain nombre de sorties d'obtenir des erreurs assez faibles. L'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels est apparue moins précise dans l'ensemble.

Le méta-modèle basé sur le krigeage présente en outre l'intérêt de fournir une estimation de l'incertitude sur ses prédictions. Pour les autres approches l'estimation de l'incertitude est donnée par la mesure de l'erreur RMSE sur le jeu de validation et ne dépend donc pas du point où le méta-modèle est évalué. Cette possibilité apportée par le krigeage pourrait être en particulier utile pour la calibration basée sur l'approche bayésienne.

Néanmoins dans la suite c'est l'approche basée sur le développement sur chaos polynomial qui est utilisée. Ce choix est motivé en premier lieu par la plus grande rapidité d'évaluation du méta-modèle, intéressante ici dans la mesure où un grand nombre de calibrations doit être effectué.

La possibilité de construire un méta-modèle unique pour couvrir l'ensemble des cas de chargement a également été étudiée. Néanmoins le choix a été fait pour la suite de construire les méta-modèles pour des conditions d'environnement fixes. En effet pour la majorité des sorties l'influence des paramètres environnementaux apparaît très supérieure à l'influence des paramètres liés à la bio-colonisation. L'erreur du méta-modèle tenant compte des paramètres environnementaux

apparaît dans ces cas-là supérieure ou comparable aux variations induites par les paramètres d'intérêt. Il semble donc préférable dans le cadre de la calibration de construire les méta-modèles pour des conditions d'environnement fixes. Cette approche présente toutefois un inconvénient majeur qui est la répétition du coup de construction pour chacun des cas de chargement qui seront utilisés pour la calibration. Selon les sorties utilisées pour la calibration, l'utilisation d'un méta-modèle tenant compte des conditions d'environnement peut donc tout de même s'avérer intéressante. Une alternative qui n'a pas été étudiée ici serait par ailleurs de construire plusieurs méta-modèles en découpant le domaine de variation des paramètres environnementaux.

4 Analyse préliminaire de la réponse de l'ombilical

4.1 Estimation de la durée de vie a priori

Dans cette partie la durée de vie de l'ombilical est estimée pour les deux configurations. Ce calcul est fait en utilisant les valeurs a priori des paramètres liés à la bio-colonisation. C'est-à-dire leur valeur avant toute calibration, en utilisant la moyenne de la distribution supposée de ces paramètres. Les objectifs de cette étude préliminaire pour la calibration sont multiples. Premièrement il s'agit de déterminer la localisation la plus critique le long du câble : celle où la durée de vie estimée est la plus courte. Il s'agit également de déterminer les états de mer contribuant le plus au dommage, c'est-à-dire ceux pour lesquels le produit de la probabilité d'occurrence par la valeur du dommage causé est le plus fort. En effet ces cas de chargements correspondent à des situations où la quantité d'intérêt (le dommage) évolue de façon importante. C'est donc précisément ces situations que le modèle doit pouvoir reproduire pour estimer aux mieux la durée de vie. Il est donc particulièrement intéressant d'identifier ces conditions environnementales afin de pouvoir choisir de calibrer le modèle, en priorité, autour de ces états de mer.

Pour estimer la durée de vie de l'ombilical, les paramètres de la bio-colonisation sont ici fixés à leur valeur moyenne a priori, et seuls les paramètres environnement varient. 1000 simulations sont réalisées pour des cas de chargement tirés aléatoirement selon la distribution définie pour les paramètres environnement (partie 2.5). Le calcul du dommage est réalisé tout le long du câble pour les sections correspondant aux nœuds du modèle, et pour chaque simulation. L'espérance du dommage est estimée en réalisant une moyenne non pondérée sur l'ensemble des cas de chargement simulés. En effet le tirage de ces derniers est effectué directement selon les probabilités d'occurrence. La localisation la plus critique peut ainsi être déterminée pour les deux configurations comme étant celle où l'espérance du dommage est la plus grande. L'estimation de la durée de vie est obtenue en multipliant la durée des simulations par l'inverse du dommage au point critique.

L'incertitude sur l'estimation de l'espérance du dommage au point critique est évaluée par bootstrap. C'est-à-dire que le tirage initial est ré-échantillonné plusieurs fois avec remise, de façon à pouvoir estimer l'espérance du dommage pour les différents échantillons ainsi constitués sans réaliser de nouvelles simulations. L'écart-type de l'espérance du dommage sur l'ensemble des échantillons bootstrap permet de quantifier l'incertitude. Il s'agit uniquement ici d'évaluer l'incertitude liée aux limitations du jeu de données utilisé, c'est-à-dire en particulier au nombre de cas de chargement simulés.

Table 4.1 : Estimation du dommage sur les configurations étudiées

	Configuration 36 m	Configuration 72 m
Point critique (distance du HOP)	35 m	68 m
Espérance du dommage	$2,0 \cdot 10^{-8}$	$7,3 \cdot 10^{-11}$
Incertitude sur l'espérance du dommage	$2,1 \cdot 10^{-9}$ (11%)	$8,4 \cdot 10^{-12}$ (12%)
Durée de vie estimée	5 800 ans	1 500 000 ans

Les résultats obtenus pour les deux configurations sont présentés dans la Table 4.1. Les durées de vie estimées sont très grandes et il apparaît que le risque de rupture en fatigue est négligeable pour les fils de la couche d'armure externe, les durées de service envisagées étant de l'ordre de 20 ans. Il semble ici que le câble soit surdimensionné, toutefois le design de la section, qui détermine les caractéristiques considérées, a été réalisé pour une configuration différente de celles étudiées. Comme expliqué dans la section 2.3 cependant, d'autres composants du câble pourraient en outre présenter des durées de vie en fatigue plus courtes (notamment les âmes conductrices).

Par ailleurs des sections connues pour être sensibles au dommage, comme les zones à proximité du HOP et du TDP, ont été modélisées de façon très simplifiée. Les équipements de protections qui n'ont pas été modélisés doivent en pratique permettre de distribuer la contrainte sur une zone plus large. Il en résulte que les contraintes aux extrémités sont mal évaluées. C'est pourquoi les résultats dans ces zones ont été écartés de l'analyse.

Comme indiqué auparavant, l'objectif ici est simplement d'étudier les variations relatives du dommage en fonction des cas de chargement. Dans la suite, sauf mention contraire, le dommage est exprimé pour le point critique, c'est-à-dire à 35m du HOP pour la configuration dans 36m de profondeur, et à 68m du HOP pour la configuration dans 72m d'eau. Pour les deux configurations le point critique est donc situé dans la même zone, au niveau des premiers modules de flottabilité en partant du HOP. Pour rappel, les longueurs totales des ombilicaux sont respectivement de 60m et 120m pour les deux configurations, avec les modules répartis sur la seconde moitié.

Pour les deux configurations, l'incertitude relative est de l'ordre de 10% de l'espérance du dommage (aux points critiques). Ce niveau d'incertitude a été atteint dans les deux cas en simulant 1000 cas de chargement. L'objectif n'étant pas de calculer l'espérance du dommage mais d'identifier les localisations et les cas de chargement les plus critiques, ce niveau d'incertitude est jugé satisfaisant.

Un des principaux intérêts de cette étude est d'identifier les cas de chargement contribuant le plus au dommage. Pour chacun des 1000 cas de chargement simulés, la contribution au dommage

est donc calculée. Celle-ci est définie comme le produit de la probabilité d'occurrence par le dommage causé. La Figure 4.1 montre la répartition des cas de chargement simulés (points noirs) en fonction des paramètres Hs et Tp de la houle (pour la configuration dans 36m d'eau). À gauche, des points bleu sont superposés aux noirs pour les 10% de cas de chargement ayant la probabilité d'occurrence la plus élevée. Au centre, les points rouges représentent les 10% causant le plus de dommage, et à droite les points verts représentent les 10% contribuant le plus au dommage. Il est donc possible d'y visualiser dans le plan Hs-Tp la localisation des états de mer les plus probables, de ceux qui causent le plus de dommage, et de ceux dont la contribution à l'espérance du dommage est la plus grande.

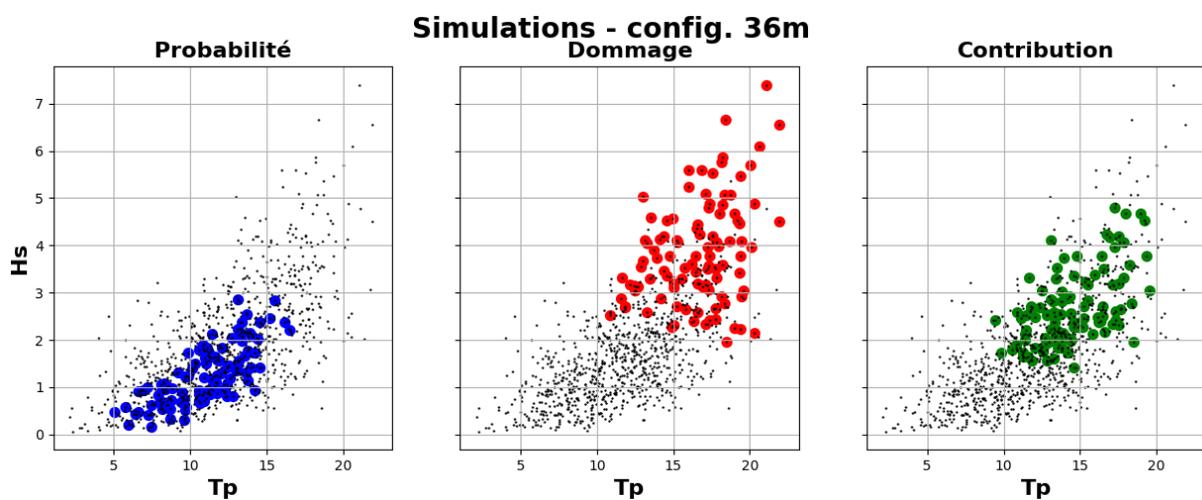


Figure 4.1 : Répartition des simulations réalisées, localisation des 10% supérieurs en probabilité, dommage et contribution

En particulier il est constaté que les états de mer les plus contributeurs sont relativement sévères ($1,5\text{m} < H_s < 5\text{m}$), et pour certains ont des probabilités d'occurrence assez faibles. En observant la répartition des cas de chargement à forte contribution selon les autres paramètres environnementaux, il est également intéressant d'observer que ceux-ci sont généralement caractérisés par des vitesses de courant faibles, en particulier pour la configuration dans 36m de profondeur. L'analyse de la contribution des différents cas de chargement est davantage développée en annexe.

4.2 Sélection de cas de chargement critiques

3 cas de chargement critiques sont ici sélectionnés parmi ceux contribuant le plus au dommage. L'objectif est d'utiliser ces cas de chargement comme références pour conduire les analyses de sensibilité et évaluer l'incertitude sur le dommage liée aux paramètres identifiés comme critiques. Il est donc important que les cas critiques sélectionnés soient représentatifs des cas de chargement ayant une forte contribution au dommage. Le nombre de cas de chargement sélectionnés est ici fixé

arbitrairement, il aurait néanmoins été intéressant de déterminer le nombre de cas de chargement qui permettrait une bonne représentativité, et donc de quantifier cette notion de représentativité en étudiant, par exemple, les différents modes de réponses de l'ombilical selon les cas de chargement.

Afin de sélectionner 3 cas de chargement, un algorithme de partitionnement de données, en l'occurrence l'algorithme « agglomerative clustering » (classification ascendante hiérarchique) de la librairie Scikit-Learn (Pedregosa et al. 2011), est utilisé pour définir 3 classes parmi les 10% de cas de chargement ayant la plus forte contribution. Ces 10% correspondent ici à 100 cas puisque 1000 simulations ont été réalisées. Les classes rassemblent les cas de chargement en fonction des valeurs des paramètres environnementaux de façon à regrouper au sein de chaque classe les cas de chargement similaires.

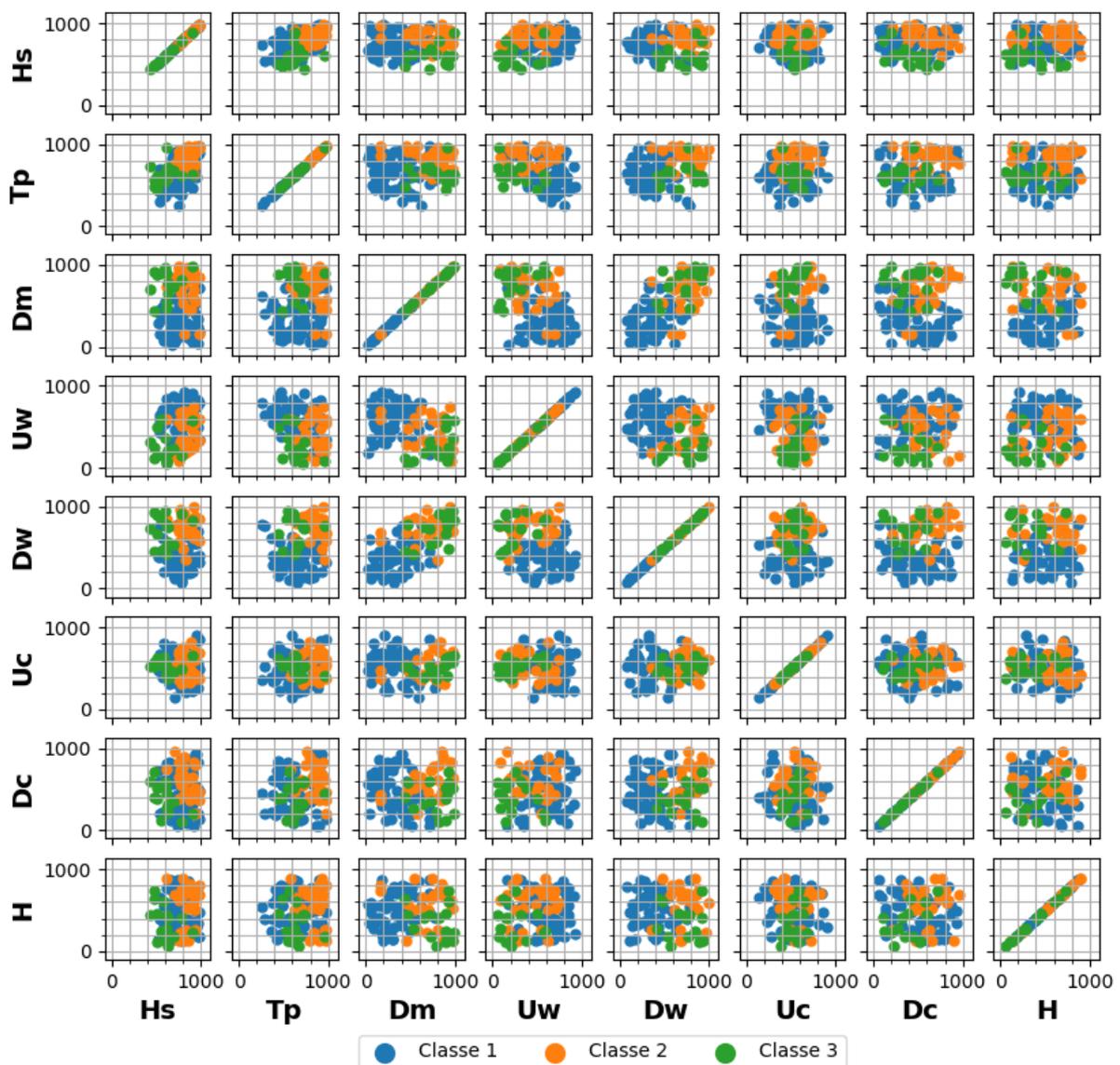


Figure 4.2 : Partitionnement des 10% de cas les plus critiques en fonction des paramètres environnementaux

La Figure 4.2 permet de visualiser les classes obtenues pour la configuration 36m. Chaque cas de chargement y est représenté par un point dans l'espace des paramètres environnementaux, et 3 couleurs permettent de distinguer les 3 classes : bleu, orange et vert. Les coordonnées dans l'espace des paramètres environnementaux sont exprimées en termes de rang (valeurs de 0 à 1000 obtenues en classant l'ensemble des cas de chargement selon la valeur du paramètre considéré). La distance entre deux cas de chargement est mesurée en utilisant la norme euclidienne.

Les cas critiques étudiés dans la suite sont les barycentres de chacune des classes obtenues (pour le calcul des barycentres, les coordonnées ne sont plus exprimées en termes de rang mais selon les valeurs réelles des paramètres). De cette façon les cas critiques retenus sont relativement différents les uns des autres, tout en étant tous situés dans la zone ayant la plus forte contribution au dommage. Les tables 4.2 et 4.3 ci-après donnent les caractéristiques des 3 cas de chargement critiques retenus pour chacune des deux configurations. Pour bien différencier dans la suite les cas critiques propres aux 2 configurations, le nom de ceux de la configuration 72m se termine par une astérisque (*).

Table 4.2 : Cas de chargement critiques, configuration 36m

Cas	Hs	Tp	Dm	Uw	Dw	Uc	Dc	H
CC1	2,71 m	13,8 s	-27,4°	8,21 m/s	-28,4°	0,02 m/s	-0,51°	-0,01 m
CC2	3,04 m	16,4 s	-16,0°	6,10 m/s	-5,82°	0,03 m/s	1,10°	0,17 m
CC3	1,95 m	13,6 s	-13,5°	4,14 m/s	-7,93°	0,01 m/s	-1,71°	-0,47 m

Table 4.3 : Cas de chargement critiques, configuration 72m

Cas	Hs	Tp	Dm	Uw	Dw	Uc	Dc	H
CC1*	2,56 m	14,8 s	-14,0°	5,25 m/s	-6,96°	0,03 m/s	0,00°	-0,11 m
CC2*	3,19 m	14,2 s	-26,0°	9,13 m/s	-24,0°	-0,2 m/s	-0,58°	0,04 m
CC3*	2,49 m	12,6 s	-27,2°	8,44 m/s	-30,9°	0,08 m/s	-0,54°	0,13 m

Cette approche présente un certain nombre d'avantages. Tout d'abord l'ensemble des paramètres environnementaux est pris en compte pour définir les cas critiques. Le partitionnement de données permet ensuite de découper la région critique en sous-domaines présentant des caractéristiques différentes du point de vue des paramètres environnementaux. Enfin il est possible de définir de cette façon un nombre arbitraire de cas critiques (ici 3). Pour augmenter a posteriori le nombre de cas critiques sélectionnés il est cependant nécessaire de renouveler l'ensemble des points critiques.

Une difficulté consiste cependant à déterminer s'il est nécessaire d'attribuer des poids relatifs plus ou moins importants aux différents paramètres environnementaux. Ici le même poids est attribué à tous les paramètres, mais d'une part certains paramètres sont corrélés entre eux, et d'autre part le partitionnement est réalisé uniquement sur les 10% de cas les plus critiques. Ceci réduit de fait les domaines de variation de certains paramètres et peut également introduire ou gommer certaines corrélations. L'intérêt de l'approche dans la mise en œuvre présentée est donc justement de déterminer ce qui caractérise la région des 10% les plus critiques par rapport à l'ensemble des cas de chargement simulés.

4.3 Estimation de l'incertitude sur le dommage

L'incertitude sur le dommage due aux paramètres du câble est maintenant estimée sur les 3 cas critiques précédemment définis pour les 2 configurations. À cette fin une série de 200 simulations est réalisée pour chacun des cas critiques. Les paramètres environnementaux sont à présent fixés et seuls les paramètres du câble sont variés. Un tirage aléatoire est réalisé selon la distribution a priori de ces paramètres. Les variations du dommage, mesuré au point critique de chacune des configurations, sont donc uniquement le résultat de la variabilité des paramètres critiques étudiés. L'incertitude est alors quantifiée sur les différentes séries de simulations par la valeur du coefficient de variation (CoV) du dommage. Celui-ci s'obtient en divisant l'écart-type σ par la moyenne μ de la grandeur considérée, et est ici exprimé en pourcentage.

$$CoV = \frac{\sigma}{\mu}$$

Les résultats obtenus sur les 3 cas critiques pour chacune des 2 configurations sont présentés dans la Table 4.4.

Table 4.4 : Dommage et incertitude sur les cas critiques

Cas	Configuration 36m			Configuration 72m		
	μ	σ	CoV	μ	σ	CoV
CC1	$2.6 \cdot 10^{-8}$	$0.8 \cdot 10^{-8}$	31%	$2.5 \cdot 10^{-10}$	$1.6 \cdot 10^{-10}$	65%
CC2	$7.5 \cdot 10^{-8}$	$3.1 \cdot 10^{-8}$	41%	$2.1 \cdot 10^{-10}$	$0.5 \cdot 10^{-10}$	24%
CC3	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$1.2 \cdot 10^{-8}$	43%	$0.9 \cdot 10^{-10}$	$0.3 \cdot 10^{-10}$	37%

L'incertitude liée aux paramètres du câble apparaît importante, de l'ordre de 40% du dommage moyen selon les cas. Pour la configuration dans 36m d'eau, le coefficient de variation varie assez peu d'un cas critique à l'autre, de 31% à 43%. Pour la configuration dans 72m en revanche, la mesure de

l'incertitude varie davantage, de 24% à 65%, ce qui montre que l'influence des paramètres étudiés peut varier de façon importante en fonction des cas de chargement considérés.

Les cas critiques étudiés ont cependant été sélectionnés de façon à être représentatifs des cas de chargement contribuant le plus au dommage à long terme. Dans cette mesure il est considéré que l'estimation de l'incertitude sur ces cas de chargement est un indicateur pertinent pour évaluer l'influence des paramètres étudiés sur la durée de vie.

L'estimation de l'incertitude liée aux paramètres critiques directement sur l'espérance du dommage à long terme est également possible, mais nécessite cependant un plan d'expérience où les paramètres environnementaux et les paramètres du câble sont variés simultanément. Le nombre de simulations nécessaires pour obtenir une estimation correcte est alors très important, notamment du fait de la forte influence de certains paramètres environnementaux (Spraul et al. 2017, Juin). C'est pourquoi dans ce travail, l'approche avec les paramètres environnementaux fixes a été privilégiée. Une analyse de sensibilité portant sur les paramètres environnementaux d'une part et sur certains paramètres structurels du câble est présentée en annexe.

L'incertitude sur le dommage calculée dans cette partie pour les 3 cas critiques servira pour la suite de référence. Il s'agit de l'incertitude a priori, c'est-à-dire avant calibration. Suite aux essais de calibration, l'incertitude pourra à nouveau être estimée et sera alors comparée à la valeur a priori.

4.4 Choix d'une approche pour les analyses de sensibilité

L'objectif à la fin de ce chapitre est d'évaluer la sensibilité du dommage à chacun des différents paramètres étudiés, afin notamment de déterminer ceux à calibrer en priorité. Différentes méthodes d'analyse de sensibilité sont, dans un premier temps, présentées et comparées sur le cas CC1 (profondeur 36m). Les résultats sont ensuite présentés pour chacun des cas critiques (partie 0) et pour les deux configurations (partie 4.6).

Les différentes méthodes d'analyse de sensibilité comparées sont brièvement présentées dans la suite de ce paragraphe. L'analyse paramètre par paramètre, désignée dans la suite par OAT (« One At a Time »), constitue une approche simple. Son principal inconvénient est son caractère local : la sensibilité n'est évaluée qu'au voisinage d'un point de référence. Le calcul des indices de Sobol, méthode dite ANOVA (« ANalysis Of VAriance »), permet en revanche une analyse globale de la sensibilité (Sobol 1993). Enfin la méthode ANCOVA (« ANalysis of COVAriance ») est une généralisation de la méthode précédente prenant en compte la covariance entre les paramètres étudiés, et apparaît moins coûteuse à mettre en œuvre.

L'objectif à partir des différentes méthodes est de calculer l'incertitude relative sur le dommage due à chacun des paramètres étudiés. Comme dans la partie précédente, l'incertitude relative liée à chaque paramètre est quantifiée par le calcul d'un coefficient de variation. L'ordre de grandeur des variations dues à chaque paramètre doit donc être estimé.

Approche OAT

La méthode OAT consiste à faire varier les paramètres un à un en utilisant un plan d'expérience radial, centré autour d'un point de référence. Il s'agit donc d'une analyse locale de la sensibilité, c'est-à-dire que les éventuelles interactions entre les paramètres étudiés ne sont pas considérées. L'avantage principal est la simplicité du plan d'expérience qui nécessite un nombre d'évaluations du modèle relativement faible, proportionnel au nombre de paramètres étudiés. Cependant la sensibilité de la sortie est étudiée uniquement autour du point de référence dans le domaine de variation des paramètres étudiés, alors que cette sensibilité peut varier en fonction du point de référence choisi.

Dans le cas présent, le point de référence correspond à la valeur moyenne de la distribution a priori de chacun des paramètres du câble. Les variations des paramètres sont centrées autour de ce point de référence. Les paramètres environnementaux sont eux fixés en fonction du cas critique considéré, seuls les paramètres du câble étant ici étudiés.

Pour chaque paramètre une série de 25 simulations est réalisée, ce qui fait en tout 200 simulations. Pour chacune des séries, tous les paramètres à l'exception de celui étudié sont fixes. Pour le paramètre étudié un tirage aléatoire est réalisé selon sa distribution a priori, définie dans la partie 2.6.

L'indice de sensibilité OAT est défini ici pour chacun des paramètres comme le rapport entre l'écart-type du dommage obtenu en faisant varier le paramètre considéré, et le dommage au point de référence. Cet indice est donc comparable à un coefficient de variation et mesure l'incertitude sur le dommage imputable au paramètre considéré.

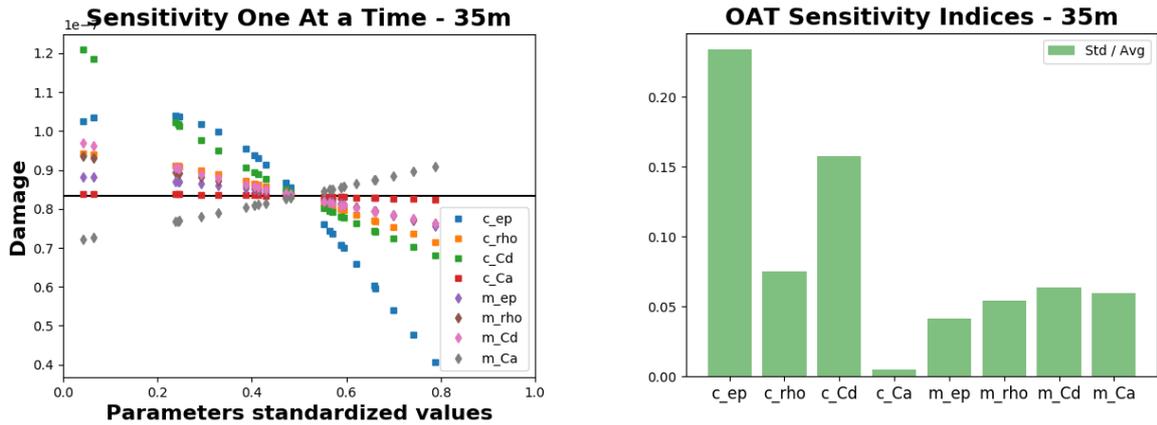


Figure 4.3 : Analyse OAT, cas critique CC1

La figure de gauche ci-dessus donne la valeur du dommage calculé pour les différentes valeurs de chaque paramètre. Les intervalles de variations des paramètres (définis Table 2.6) sont tous ramenés à l'intervalle de 0 à 1, ce qui permet ici de comparer les variations causées par les différents paramètres. La valeur de référence du dommage, c'est-à-dire le dommage au point de référence, est indiquée par le trait noir horizontal. Il apparaît en particulier que la majorité des paramètres présentent une relation relativement linéaire avec le dommage. Ce n'est cependant pas le cas du paramètre d'épaisseur de la bio-colonisation sur le câble (c_{ep}), qui est ici le paramètre le plus influent. L'augmentation de cette épaisseur tend dans un premier temps à augmenter le dommage, mais rapidement l'augmentation de l'épaisseur a davantage pour effet de diminuer le dommage.

La figure de droite donne les valeurs des indices de sensibilité obtenus avec la méthode OAT pour le cas critique CC1. Ces indices sont représentatifs de l'incertitude sur le dommage due à chacun des paramètres étudiés.

Méthode ANOVA

La méthode ANOVA conduit au calcul des indices de Sobol (Sobol 1993). La méthode se base sur une décomposition de la variance sous l'hypothèse de paramètres indépendants. Les différents indices donnent une mesure de la part de variance imputable aux différents paramètres. Deux types d'indices sont considérés ici : les indices de premier ordre S_i et les indices d'ordre total S_i^T . L'indice de premier ordre donne une mesure de l'influence moyenne du paramètre considéré indépendamment des autres paramètres. L'indice d'ordre total inclut l'influence des interactions avec les autres paramètres. Dans les équations ci-dessous, $V(Y)$ désigne la variance de la sortie, $E(Y|X_i)$ désigne l'espérance de la sortie pour une valeur fixée du paramètre X_i , et $V(Y|X_{\sim i})$ désigne la variance de la sortie lorsque tous les paramètres à l'exception de X_i sont fixes.

$$S_i = \frac{V(E(Y|X_i))}{V(Y)}$$

$$S_i^T = \frac{E(V(Y|X_{\sim i}))}{V(Y)}$$

Plusieurs estimateurs peuvent être employés pour évaluer les indices de Sobol. Différentes formulations ont par exemple été comparées par (Saltelli 2010). L'approche employée ici est celle décrite par (Martinez 2011).

Le plan d'expérience nécessaire au calcul des indices de Sobol est plus complexe et nécessite davantage d'évaluations du modèle que dans l'approche OAT. Deux séries indépendantes de points de référence doivent être construites. Puis pour chaque paramètre, une nouvelle série est construite à partir des deux premières en prenant les valeurs du paramètre considéré dans l'une des deux séries, et les valeurs de tous les autres paramètres dans l'autre. Le nombre de simulations par série pour obtenir une estimation convenable des indices peut être relativement élevé.

Ici 200 simulations ont été réalisées pour chacune des 10 séries, soit en tout 2000 simulations. L'avantage de cette approche est d'évaluer la sensibilité aux paramètres étudiés, non pas autour d'un seul point de référence, mais de façon moyennée sur l'ensemble du domaine de variation de ces derniers. En comparant les indices de premier ordre et d'ordre total, il est de plus possible d'évaluer l'importance des interactions entre les paramètres.

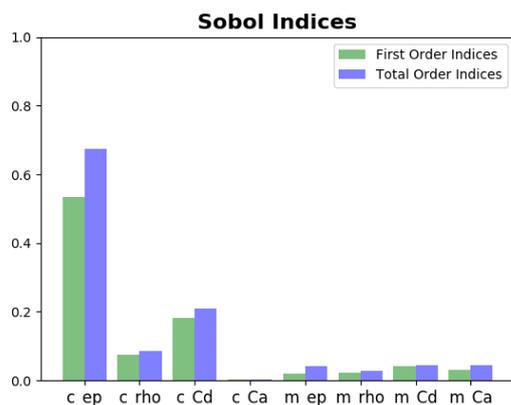


Figure 4.4 : Indices de Sobol cas critique CC1

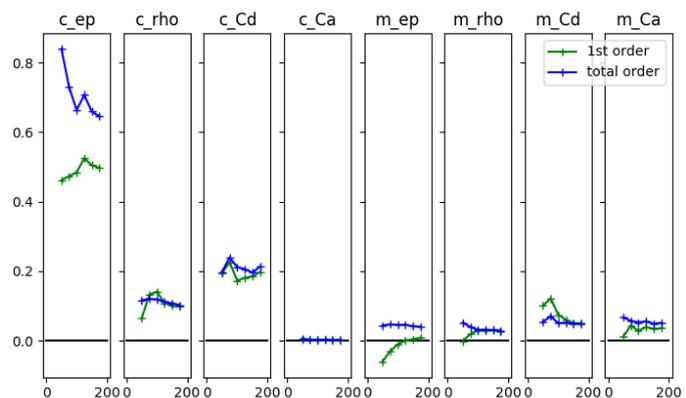


Figure 4.5 : Convergence du calcul des indices de Sobol

La figure ci-dessus à gauche donne les valeurs des indices de Sobol calculés pour le cas critique CC1. La figure de droite montre la convergence de l'estimation des indices de premier ordre (vert) et d'ordre total (bleu) en fonction du nombre de simulations dans chaque série (de 0 à 200). Les 200 simulations utilisées apparaissent à peine suffisantes considérant les 3 paramètres les plus influents.

Pour d'autres paramètres, en particulier les coefficients de masse ajoutée du câble et des modules (c_Ca et m_Ca) il apparaît que le nombre de simulations aurait pu être réduit. Il n'est en effet pas nécessaire d'utiliser le même nombre de simulations pour tous les paramètres.

Par ailleurs il est intéressant de remarquer que les différences entre les indices de Sobol de premier ordre et d'ordre total sont dans l'ensemble assez faibles. Les effets d'interactions entre les paramètres sont donc relativement limités, ou du moins secondaires devant l'effet des paramètres dominants pris de façon indépendante. Ceci peut paraître surprenant étant donné qu'il est attendu que les épaisseurs de bio-colonisation, sur le câble ou sur les modules, affectent l'effet des autres paramètres en modifiant les diamètres effectifs. Toutefois les résultats de l'analyse ANOVA sont en ce sens cohérents, puisque c'est justement pour les deux paramètres réglant les épaisseurs des couches de bio-colonisation (c_ep et m_ep) que la différence entre indices de premier ordre et d'ordre total est la plus grande.

L'indice de Sobol de premier ordre mesure la fraction de la variance imputable à un paramètre donné. La racine carrée de cet indice mesure donc la fraction de l'écart-type imputable au paramètre considéré. L'incertitude sur la sortie due au paramètre i , notée U_i , peut alors être estimée en multipliant l'incertitude due à l'ensemble des paramètres CoV , telle que calculée dans la partie précédente, par la racine carrée de l'indice de Sobol.

$$U_i = \frac{\sigma_i}{\mu} = CoV \cdot \frac{\sigma_i}{\sigma} = CoV \cdot \sqrt{S_i}$$

Il est donc possible de comparer la part d'incertitude due à chaque paramètre selon les différentes méthodes utilisées, ici les approches OAT et ANOVA.

Table 4.5 : Comparaison des méthodes OAT et ANOVA pour estimer l'incertitude sur le dommage dues aux différents paramètres, cas CC1

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
OAT	22%	8%	16%	0%	4%	5%	6%	6%
Sobol (1^{er} ordre)	22%	9%	14%	0%	4%	5%	6%	6%
Sobol (total)	25%	9%	14%	1%	6%	5%	7%	7%

Il apparaît que les résultats obtenus suivant les deux approches sont très similaires. L'approche ANOVA qui permet une analyse globale apporte donc ici peu d'information supplémentaire par rapport à l'approche locale OAT. L'effet moyen des différents paramètres sur leur domaine de variation est en effet très proche de l'effet autour du point de référence utilisé dans l'approche OAT.

Compte tenu des coûts respectifs d'application des deux méthodes, il semble donc ici suffisant de se limiter à l'approche OAT.

Méthode ANCOVA

L'approche ANCOVA est une généralisation de l'approche ANOVA dans le but de l'étendre au cas où les paramètres considérés ne sont pas indépendants. Cette méthode est décrite par (Caniou 2012) qui propose d'utiliser un méta-modèle de type développement sur chaos polynomial pour réaliser le calcul des indices. Cette approche est utilisée ici via son implémentation dans la librairie OpenTURNS (Baudin et al. 2016). L'utilisation de cette méthode requiert donc la construction d'un méta-modèle. La décomposition polynomiale permet en particulier de distinguer les contributions de chaque paramètre.

Pour construire les méta-modèles, les jeux de données utilisés dans la partie précédente pour l'estimation de l'incertitude sur le dommage sur les cas critiques sont réutilisés. Pour chaque cas critique, le jeu de données est constitué de 200 simulations. Pour le cas critique CC1, l'erreur du méta-modèle est d'environ 10% de l'écart-type mesuré sur le jeu de données. Le nombre de simulations nécessaires pour atteindre un niveau d'erreur donné varie cependant selon les cas d'application (voir chapitre 3).

Deux types d'indices sont calculés : les indices « sans corrélation », et les indices corrigés pour tenir compte de la corrélation. Les indices « sans corrélation » mesurent le rapport entre la variance des termes de la décomposition dépendants uniquement du paramètre étudié d'une part, et la variance totale du polynôme d'approximation d'autre part. Cette définition correspond aux indices de Sobol du premier ordre, mais l'estimation est basée sur une approximation polynomiale du modèle dont il convient donc de vérifier l'erreur (Figure 4.6, gauche).

Les indices corrigés sont obtenus en divisant la covariance entre l'approximation totale et les termes dépendants uniquement du paramètre étudié, par la variance de l'approximation totale. Les effets dus à la corrélation du paramètre étudié avec les autres paramètres sont alors pris en compte. Il est à noter que les valeurs des indices corrigés peuvent être négatives, en cas de corrélation positive avec un paramètre ayant un effet fort et opposé à celui du paramètre étudié par exemple.

Ici le jeu de données utilisé pour la construction du méta-modèle convient également pour le calcul des indices puisqu'il est basé sur la distribution supposée des paramètres étudiés. Le même jeu de données est donc utilisé pour la construction des méta-modèles et le calcul des indices dans les applications qui suivent. Toutefois le calcul des indices de sensibilités étant basé sur l'utilisation d'un

méta-modèle il eut été possible d'utiliser un nombre de points bien plus élevé sans changer le plan d'expérience.

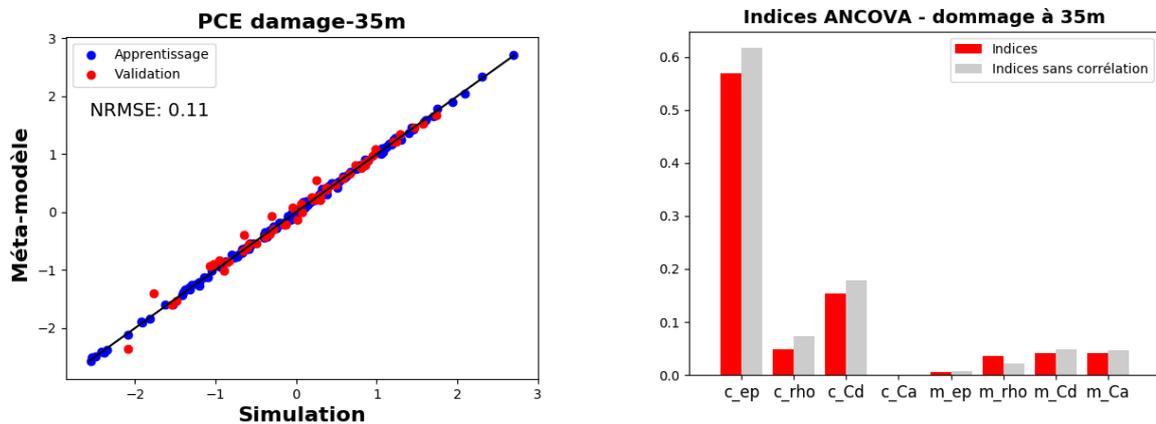


Figure 4.6 : Analyse ANCOVA cas critique CC1, erreur du méta-modèle (gauche) et indices (droite)

La Figure 4.6 illustre dans sa partie gauche l'erreur du méta-modèle, et donne les valeurs des indices obtenus dans la partie droite. Ici les paramètres étudiés sont supposés indépendants, les indices corrigés ne devraient donc pas être différents des indices sans corrélation. Cependant l'estimation des indices étant basée sur un jeu de données constitué d'un nombre limité d'observations, de légères différences apparaissent.

L'incertitude sur le dommage due à chaque paramètre est calculée de la même façon à partir des indices de la méthode ANCOVA qu'à partir des indices de Sobol : en multipliant la racine carrée de l'indice par le coefficient de variation. Ceci permet à nouveau de comparer les résultats obtenus avec les autres méthodes.

Table 4.6 : Comparaison de la méthode ANCOVA aux méthodes OAT et ANOVA pour estimer l'incertitude sur le dommage dues aux différents paramètres, cas CC1

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
OAT	22%	8%	16%	0%	4%	5%	6%	6%
Sobol (1^{er} ordre)	22%	9%	14%	0%	4%	5%	6%	6%
ANCOVA (corrigé)	23%	7%	12%	0%	2%	6%	6%	6%

La particularité de l'approche ANCOVA étant l'utilisation d'un méta-modèle, il est nécessaire de comparer l'erreur du méta-modèle utilisé avec les estimations d'incertitude qui sont réalisées. Il convient pour cela de considérer que l'erreur NRMSE du méta-modèle est donnée en pourcentage de l'écart-type de la sortie σ , quand l'incertitude relative due aux différents paramètres est donnée en pourcentage de la valeur moyenne de la sortie μ . Pour effectuer la comparaison l'erreur NRMSE doit donc être multipliée par le coefficient de variation du dommage. Les valeurs moyennes, écart-types

et coefficients de variations sont propres à chaque cas de chargement, ici l'erreur du méta-modèle est de l'ordre de 10% et le coefficient de variation de l'ordre de 30%. L'erreur du méta-modèle en termes d'incertitude est donc d'environ 3%. Cette valeur comparée aux résultats de l'analyse de sensibilité est loin d'être négligeable, mais permet toutefois de distinguer les paramètres les plus influents.

La comparaison des trois méthodes dans la Table 4.6, permet de constater la cohérence des différentes approches puisque l'ordre d'importance des différents paramètres est inchangé. De même l'estimation de la part d'incertitude liée à chaque paramètre apparaît équivalente entre les 3 approches compte tenu des incertitudes. Celles-ci sont liées notamment à l'erreur du méta-modèle pour l'approche ANCOVA, mais aussi aux limitations des jeux de données utilisés pour les 3 approches.

Il est difficile de conclure précisément sur le coût d'application de l'approche ANCOVA puisque celui-ci dépend du cas d'application et du niveau de précision attendu. Ici le calcul des indices de Sobol a montré que l'effet des interactions entre les paramètres est relativement faible ce qui est un cas favorable pour la construction du méta-modèle.

La comparaison des coûts d'application des différentes méthodes pousse à rejeter l'approche ANOVA. Le calcul des indices de Sobol demande en effet un très grand nombre d'évaluations du modèle et n'est donc pas appliqué pour les autres cas étudiés. Par ailleurs pour un coût d'application comparable à celui de la méthode OAT, la méthode ANCOVA renvoie ici des résultats satisfaisants. Ceux-ci sont en effet comparables à ceux de la méthode ANOVA bien que l'incertitude associée à l'erreur du méta-modèle soit assez forte.

L'avantage de l'approche ANCOVA est en outre de permettre sans surcoût la construction des méta-modèles pour les différentes sorties de la simulation. La méthode ANCOVA est donc privilégiée dans la suite des travaux présentés.

Dans la partie suivante l'approche OAT est néanmoins à nouveau utilisée, ce qui permet de comparer les deux approches sur différents cas de chargement.

4.5 Sensibilité du dommage aux paramètres du câble

La sensibilité du dommage aux paramètres du câble est quantifiée dans cette partie sur les 3 cas critiques pour la profondeur 36m, et dans la partie suivante pour la configuration dans 72m d'eau. L'objectif est de déterminer quels sont les paramètres les plus influents, et en particulier si les paramètres dominants sont les mêmes pour les 3 cas ou si l'influence de certains paramètres varie d'un cas de chargement à l'autre. En effet les analyses de sensibilité sont ici conduites pour des conditions d'environnement fixes, aussi il semble important de voir dans quelle mesure les conditions d'environnement affectent l'influence des paramètres étudiés.

L'analyse OAT présente l'avantage de permettre une visualisation simple de la relation entre les différents paramètres et le dommage. Elle a donc à nouveau été appliquée ici afin d'observer d'éventuelles différences entre les 3 cas critiques.

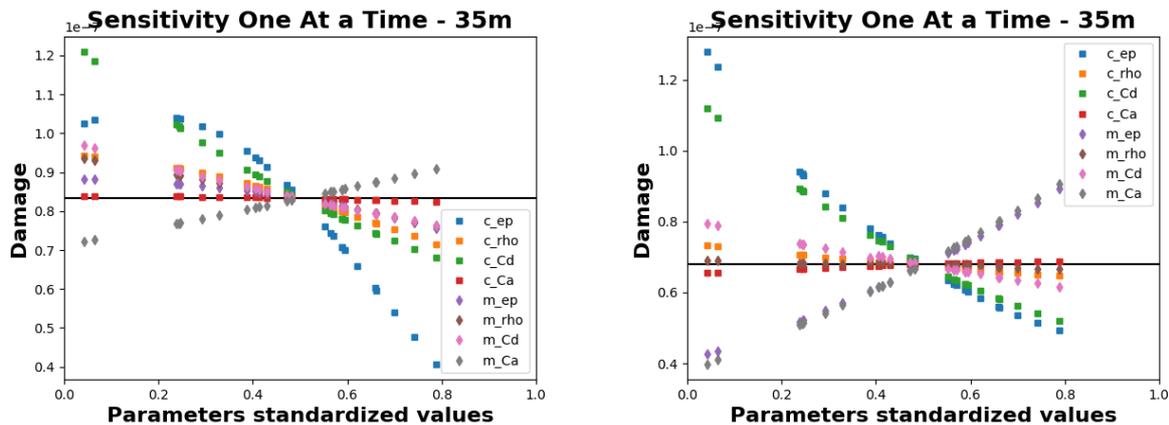


Figure 4.7 : Analyse OAT, différences selon les cas critiques (CC1 à gauche, CC2 à droite)

Certaines différences notables apparaissent en effet entre les cas critiques CC1 et CC2 sur la Figure 4.7 (la figure de gauche reprise de la Figure 4.3). En particulier dans le cas CC1, le dommage diminue avec l'augmentation de l'épaisseur de bio-colonisation sur les modules de flottabilité (m_{ep}), alors qu'il augmente dans les mêmes conditions pour le cas CC2. La relation entre l'épaisseur de bio-colonisation sur le câble (c_{ep}) et le dommage est également fortement modifiée : dans le cas CC2, même pour de faibles valeurs de c_{ep} , l'augmentation de ce paramètre entraîne une forte diminution du dommage. Sur le cas CC2, il est ainsi constaté que les effets des augmentations des paramètres c_{ep} et m_{ep} sont respectivement très similaires aux effets des paramètres c_{Cd} et m_{Ca} , ce qui n'est pas le cas pour le cas CC1.

Les cas CC2 et CC3 sont relativement similaires, le cas CC3 n'est donc pas présenté sur la figure.

Les résultats quantitatifs des analyses de sensibilité OAT et ANCOVA sont donnés respectivement Table 4.7 et Table 4.8 pour les 3 cas critiques, en termes d'incertitude relative sur le dommage (configuration 36m).

Table 4.7 : Résultats OAT pour les différents cas critiques

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
CC1	22%	8%	16%	0%	4%	5%	6%	6%
CC2	27%	3%	22%	1%	19%	1%	7%	20%
CC3	30%	2%	20%	2%	21%	0%	6%	20%

Table 4.8 : Résultats ANCOVA pour les différents cas critiques

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
CC1	23%	7%	12%	0%	2%	6%	6%	6%
CC2	22%	3%	18%	3%	17%	2%	5%	21%
CC3	25%	3%	17%	2%	19%	0%	5%	20%

(Erreur NRMSE des méta-modèles : 11% pour CC1, 10% pour CC2, 9% pour CC3.)

La concordance entre les deux méthodes peut ainsi à nouveau être vérifiée. Une différence notable apparaît néanmoins. Suivant les résultats de l'approche ANCOVA l'épaisseur de la couche de bio-colonisation sur le câble (c_ep) a une influence relativement stable sur les 3 cas de chargement, tandis que selon la méthode OAT l'influence de ce paramètre augmente sensiblement entre le cas CC1 et les 2 autres. Ceci peut être dû à la relation non-linéaire observée sur la Figure 4.7.

L'erreur NRMSE des méta-modèles utilisés étant de l'ordre de 10%, et les coefficients de variation de l'ordre de 40%, l'incertitude liée à l'utilisation des méta-modèles sur les résultats de l'approche ANCOVA est donc ici de l'ordre de 4%.

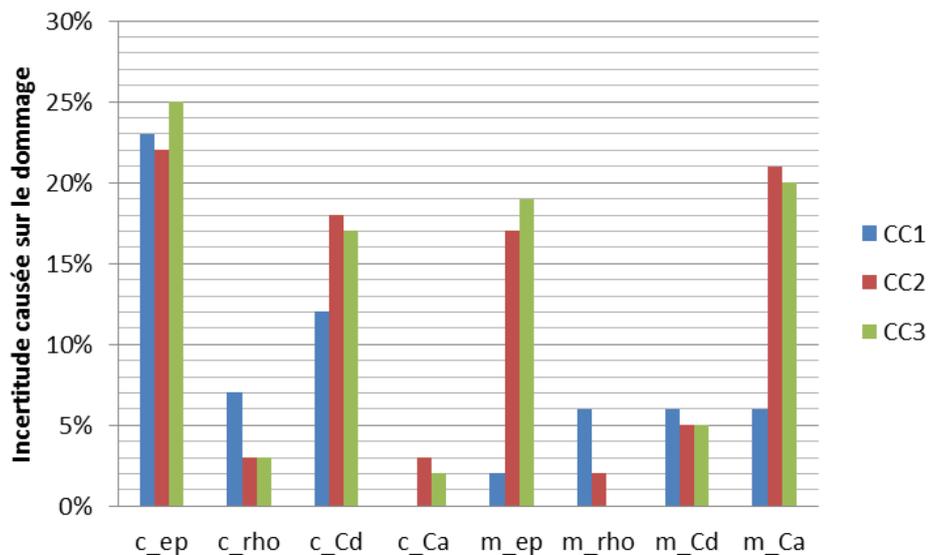


Figure 4.8 : Comparaison des indices ANCOVA du dommage sur les 3 cas critiques

Les résultats de la Table 4.8 sont représentés sur la Figure 4.8.

Pour le cas CC1, il apparaît que l'épaisseur de la bio-colonisation sur le câble (c_{ep}) est le paramètre dominant, suivi du coefficient de trainée du câble (c_{Cd}). Les autres paramètres, et en particulier les caractéristiques des modules de flottabilités, ont une influence plus faible sur le dommage.

En revanche pour les cas CC2 et CC3 les influences de l'épaisseur de bio-colonisation et du coefficient de masse ajoutée des modules (m_{ep} et m_{Ca}) deviennent fortes. L'influence du coefficient de trainée du câble (c_{Cd}) augmente également de façon notable de sorte que ces 3 paramètres ont une influence comparable à celle de l'épaisseur de la bio-colonisation sur le câble (c_{ep}).

Dans le même temps, l'effet de la densité des couches de bio-colonisation sur le câble et sur les modules (c_{rho} et m_{rho}), déjà relativement faible sur le cas CC1 diminue encore sur les cas CC2 et CC3. L'influence du coefficient de trainée des modules de flottabilité (m_{Cd}) est faible mais stable sur les 3 cas de chargement. Enfin le coefficient de masse ajoutée du câble (c_{Ca}) a lui, pour les 3 cas étudiés, une influence très faible sur le dommage.

Il apparaît donc que les paramètres dominants, pour la configuration dans 36m de profondeur, sont les épaisseurs de bio-colonisation sur le câble et sur les modules (c_{ep} et m_{ep}), ainsi que le coefficient de trainée du câble (c_{Cd}) et le coefficient de masse ajoutée des modules (m_{Ca}).

Des différences importantes étant observées entre les résultats obtenus sur les 3 cas critiques étudiés, il apparaît nécessaire de tenir compte de la variété des cas de chargement auxquels peut être soumis l'ombilical dans ce type d'analyse de sensibilité.

4.6 Analyse de sensibilité pour la configuration 72m

L'analyse de sensibilité est également conduite pour la configuration dans 72m de profondeur, sur les 3 cas critiques sélectionnés pour cette configuration. Les résultats sont donnés Table 4.9 et peuvent être visualisés Figure 4.9. Là encore il apparaît que les conditions d'environnement ont une forte influence sur la propagation de l'incertitude des paramètres du câble sur le dommage.

Table 4.9 : Résultats ANCOVA pour les différents cas critiques, configuration 72m

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
CC1*	12%	16%	23%	6%	41%	8%	4%	29%
CC2*	16%	7%	5%	0%	3%	4%	3%	8%
CC3*	24%	3%	6%	1%	9%	2%	3%	7%

(Erreur NRMSE des méta-modèles : 23%, 21%, 27%.)

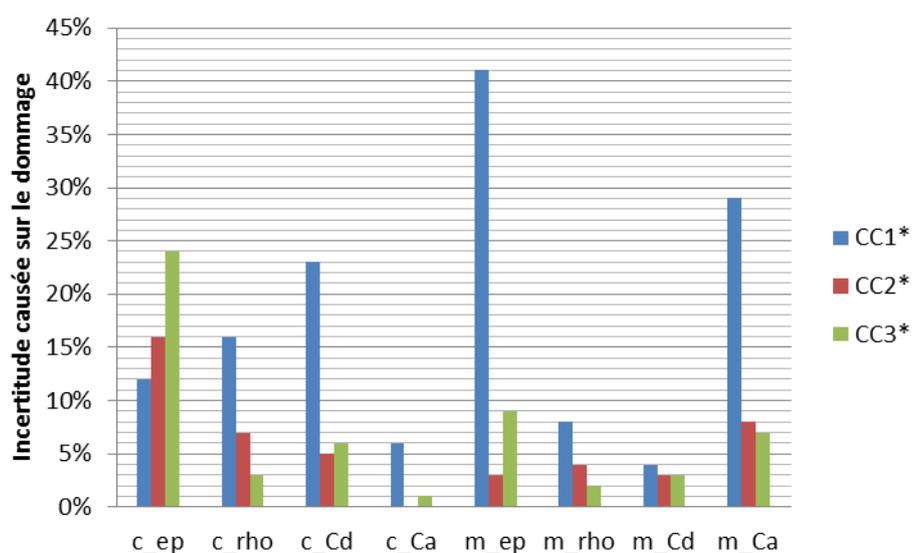


Figure 4.9 : Comparaison des indices ANCOVA du dommage sur les cas critiques, configuration 72m

Les paramètres les plus critiques sont globalement les mêmes que pour la configuration 36m (c_ep, c_Cd, m_ep et m_Ca). Sur le cas critique CC1* l'incertitude, très importante, provient majoritairement de l'épaisseur de la bio-colonisation sur les modules (m_ep) et du coefficient de masse ajoutée de ces derniers (m_Ca). Pour les cas CC2* et CC3*, l'incertitude totale est plus faible et est principalement liée à l'épaisseur de la bio-colonisation sur le câble (c_ep).

Il est important de noter que l'erreur des méta-modèles est ici élevée (de l'ordre de 20% à 30%) pour les 3 cas critiques étudiés. En effet les méta-modèles employés ont été construits suivant le

même plan d'expérience que pour la configuration 36m, avec 200 simulations par jeu de données. L'utilisation de davantage de simulations dans les jeux de données aurait éventuellement permis de réduire l'erreur du méta-modèle, ce qui aurait été préférable pour l'application de l'approche ANCOVA et l'interprétation de ses résultats.

Il peut tout de même être conclu que l'influence relative des caractéristiques du câble par rapport aux modules de flottabilité dépend ici très fortement du cas de chargement considéré. Il avait de même été observé que l'incertitude totale variait davantage selon les cas de chargement pour cette configuration que pour la configuration 36m. Le faible nombre de cas de chargement étudiés ici pour les deux configurations peut donc être remis en cause.

Il est toutefois intéressant de constater que pour les deux configurations, 2 des 3 cas critiques étudiés s'avèrent relativement similaires en termes d'influence des paramètres du câble et des modules sur le dommage. Pour les deux configurations, les 2 cas de chargement présentant des similarités se distinguent du 3e suivant les valeurs de la direction de propagation de la houle et de la direction du vent, ces deux directions étant corrélées. Dans les deux cas, lorsque ces directions se rapprochent de la perpendiculaire au plan dans lequel est déployé l'ombilical (CC2, CC3 et CC1*) l'influence des caractéristiques hydrodynamiques du câble, et en particulier des modules, augmente fortement.

4.7 Conclusions

Les analyses de sensibilité présentées dans ce chapitre ont été conduites sur 3 cas critiques pour chacune des 2 configurations. L'objectif est d'identifier les paramètres les plus influents sur le dommage parmi les 8 paramètres d'intérêt, qui sont ceux liés à la bio-colonisation du câble et des modules de flottabilité. La sélection des cas critiques doit permettre d'étudier des cas de chargement divers mais contribuant tous de façon importante dans le calcul de la durée de vie de l'ombilical dynamique.

Dans un premier temps l'incertitude liée à l'ensemble des paramètres à calibrer a été estimée à environ 40% de l'espérance du dommage sur les 3 cas critiques. Pour déterminer la contribution de chaque paramètre à cette incertitude l'approche ANCOVA basée sur la construction d'un méta-modèle de type développement sur chaos polynomial a été employée. Il est apparu que les paramètres dominants sont les épaisseurs de bio-colonisation, sur le câble et sur les modules, le coefficient de traînée du câble et le coefficient de masse ajoutée des modules.

Selon les cas de chargement étudiés cependant les résultats sont assez variables. Il apparait en particulier que l'importance des paramètres liés à la masse ajoutée des modules de flottabilité est ici fortement liée à la direction de propagation de la houle. La comparaison avec la configuration dans 72m de profondeur d'eau confirme cette observation.

5 Analyse en composantes principales de la réponse de l'ombilical

5.1 Présentation de l'analyse en composantes principales

Dans le chapitre précédent une analyse de sensibilité a été conduite en observant le dommage causé par des cas de chargement critiques en un point le long du câble. L'analyse en composantes principales (PCA) est appliquée ici afin d'étudier la réponse de l'ombilical dans son ensemble, tout en limitant le nombre de variables à observer. La PCA permet en effet de réduire fortement le nombre de variables nécessaires à la description des variations de la réponse du câble. En particulier l'objectif de ce chapitre est de déterminer les modes de variation de la réponse de l'ombilical qui sont spécifiquement liés aux variations des paramètres à calibrer.

La PCA constitue une décomposition modale a posteriori de la réponse de l'ombilical. Cette réponse doit donc être calculée au préalable et les modes sont déterminés en observant la corrélation entre les différentes sorties. Les modes obtenus sont appelés composantes principales.

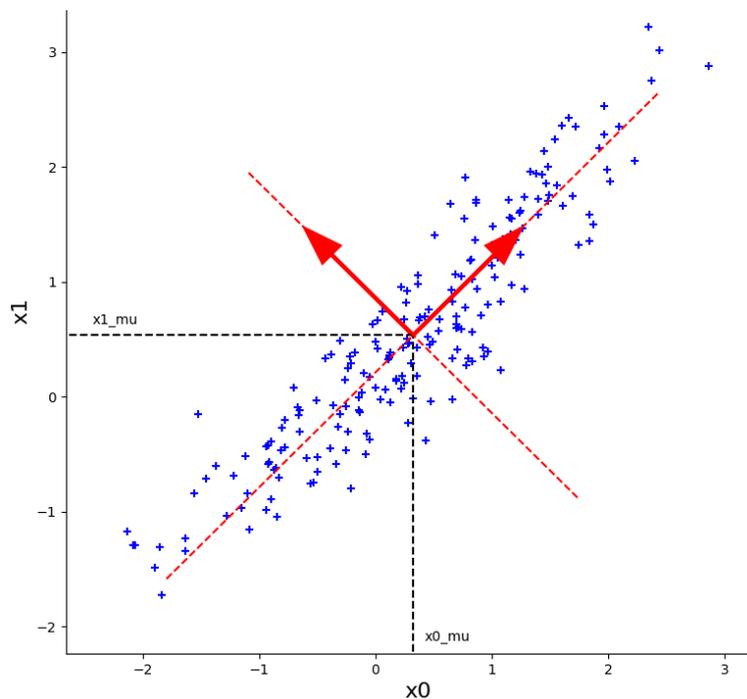


Figure 5.1 : Exemple d'application de la PCA

Les modes de la PCA constituent une matrice orthonormée W opérant une rotation dans l'espace des variables de sorties X de façon à aligner les axes du repère avec les directions principales des variations observables dans le jeu de données utilisé, ce qui est illustré Figure 5.1 où le nouveau repère est tracé en rouge. Les coordonnées de chaque point dans le nouveau repère constituent de

nouvelles sorties Y donnant l'amplitude de la réponse aux différents modes. Par construction, la variance de la réponse à chaque mode décroît en s'éloignant des premiers modes, ce qui amène en pratique à n'observer la réponse que sur les premiers modes.

$$Y = W^t \cdot (X - X_\mu)$$

$$X = W \cdot Y + X_\mu$$

La matrice en question est en effet construite de sorte que le premier mode soit porteur d'un maximum de la variance observée dans la réponse. Les modes suivants sont obtenus séquentiellement, en cherchant pour chacun à maximiser la part de variance dont il est responsable tout en respectant la condition d'orthogonalité avec les modes précédents. Ainsi les premiers modes portent davantage d'information sur la réponse que les derniers. Ceci permet en pratique de négliger les modes passé un certain rang car leur contribution devient négligeable. Le nombre de variables observées en sortie peut donc être fortement réduit.

La PCA peut être appliquée, pour une simulation donnée, aux signaux temporels des différentes sorties décrivant la réponse de l'ombilical. Les modes obtenus sont alors basés sur les variations temporelles des sorties observées et peuvent être comparés aux modes propres de l'ombilical. Cependant, tout comme les modes propres, les modes obtenus dépendent du cas de chargement simulé, et en particulier des caractéristiques de l'ombilical (Spraul et al. 2016).

L'objectif pour la calibration est cependant d'utiliser la PCA pour décrire les variations de la réponse du câble liées spécifiquement aux paramètres à calibrer. Les modes PCA doivent donc être indépendants des paramètres à calibrer, tandis que l'amplitude de la réponse sur les différents modes doit, elle, dépendre exclusivement de ces paramètres. La PCA est donc appliquée à des sorties indépendantes du temps (valeurs moyennes et écart-types des signaux temporels) sur un jeu de simulations où seuls sont variés les paramètres à calibrer. Les paramètres environnement sont donc à nouveau fixés, et la PCA n'est valide que pour le cas de chargement particulier pour lequel elle a été construite. Il convient alors de répéter l'analyse pour différents cas de chargement afin de déterminer l'impact qu'ont les conditions d'environnement sur les résultats. Ici l'analyse en composantes principales est appliquée sur les 3 cas critiques identifiés dans le chapitre précédent, pour les 2 configurations (36m et 72m).

Dans la suite l'implémentation de la PCA dans la librairie Scikit-Learn (Pedregosa et al. 2011) pour Python est utilisée pour déterminer les premiers modes de la réponse de l'ombilical.

5.2 Application au dommage

Dans un premier temps la PCA est appliquée au dommage. L'analyse de sensibilité présentée précédemment peut donc être conduite en considérant cette fois les réponses sur les premiers modes de la PCA comme les sorties d'intérêt. Les variations du dommage peuvent alors être étudiées sur toute la longueur de l'ombilical. L'application de la PCA permet de visualiser l'impact des paramètres du câble sur la répartition du dommage, et en particulier de distinguer, en fonction de la corrélation qui les relie, les différents effets liés aux variations de ces paramètres. Dans un second temps la PCA sera appliquée aux sorties de la simulation (tension, courbures, positions).

L'analyse est réalisée sur les 3 cas de chargement critiques présentés dans le chapitre précédent. La première étape consiste à déterminer les modes de la PCA, ce qui nécessite un jeu de simulations dans lequel, comme indiqué précédemment, seuls les paramètres à calibrer varient. Les sorties observées pour chaque simulation sont les valeurs du dommage calculées en chacun des nœuds du modèle. Ici les sorties ne sont pas normalisées avant l'application de la PCA. Les points où la variance est la plus grande ont donc un poids plus important dans la détermination des modes, ce qui est souhaitable. La PCA est en revanche toujours appliquée sur des variables centrées (de moyenne nulle) puisqu'il s'agit de n'étudier que les variations.

Les valeurs des paramètres d'entrée du modèle ne sont pas prises en compte directement dans le calcul des modes, mais le plan d'expérience utilisé pour constituer le jeu de simulations est déterminant. Le plan d'expérience utilisé ici consiste à nouveau en un tirage aléatoire de 200 points suivant la distribution des paramètres du câble. Les jeux de simulations utilisés pour la construction des méta-modèles pour les analyses de sensibilité ANCOVA dans le chapitre précédent sont réutilisés.

Observation de la forme des modes PCA

Pour visualiser la forme des modes de la PCA obtenus pour un cas de chargement donné, ceux-ci sont représentés par les variations qu'ils produisent sur le dommage en fonction de l'abscisse curviligne du câble. L'amplitude représentée pour chaque mode correspond à la valeur de l'écart-type de la réponse au mode sur l'ensemble des simulations utilisées (par construction la réponse moyenne sur chaque mode est nulle). Le dommage moyen pour chacun des cas critiques est représenté Figure 5.2, tandis que les formes des 3 premiers modes PCA obtenus apparaissent Figure 5.3, Figure 5.4 et Figure 5.5 respectivement pour chacun des 3 cas critiques.

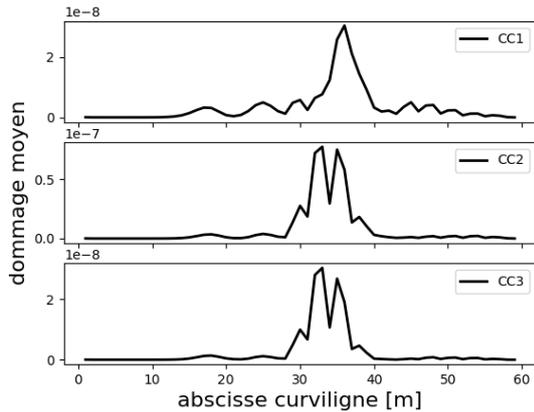


Figure 5.2 : Dommage moyen sur les cas CC1, CC2 et CC3

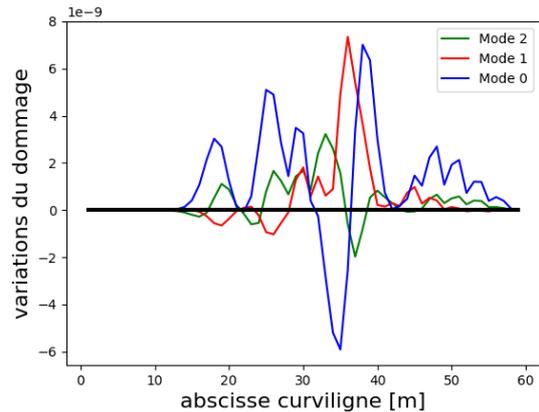


Figure 5.3 : Modes PCA du dommage sur le cas CC1

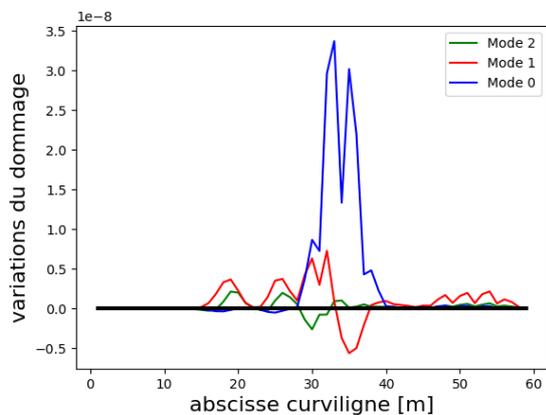


Figure 5.4 : Modes PCA du dommage sur le cas CC2

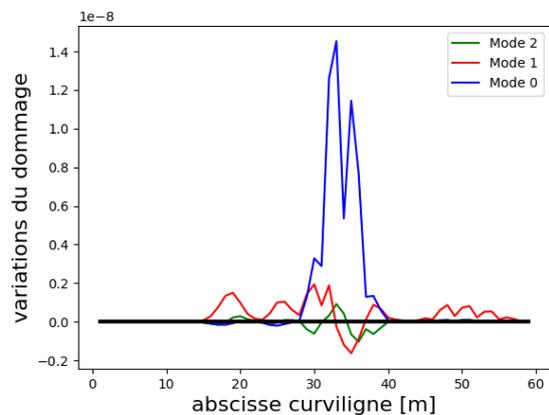


Figure 5.5 : Modes PCA du dommage sur le cas CC3

La répartition du dommage moyen le long du câble apparaît tout d'abord différente entre les cas CC1 et les cas CC2 et CC3. Le cas CC1 présente un unique pic principal aux alentours du point critique quand les cas CC2 et CC3 présentent deux pics, distants de quelques mètres.

Les modes PCA obtenus sur les différents cas critiques sont également comparés. Comme précédemment, il est constaté que les cas CC2 et CC3 présentent de fortes similarités. En particulier pour ces 2 cas de chargement le mode 0 est très dominant. En revanche les modes obtenus apparaissent différents pour le cas CC1 où l'importance relative du mode 0 est moindre. Le mode 1 en particulier est d'importance comparable avec celle du mode 0 à proximité du pic principal du dommage moyen, et l'influence du mode 2 n'est pas non plus négligeable dans cette zone.

Des similarités peuvent cependant être remarquées. Pour le cas CC1 le mode 0 fait varier la localisation du dommage maximal et le mode 1 fait varier l'amplitude du pic associé. Pour les cas CC2 et CC3 l'ordre des modes est inversé. Le mode 0 fait varier simultanément l'amplitude des deux pics principaux tandis que le mode 1 modifie l'amplitude relative des deux pics. Pour les 3 cas étudiés les

deux premiers modes affectent donc l'amplitude du dommage maximal pour l'un et sa localisation pour l'autre, mais l'ordre d'importance des deux modes est inversé entre les cas CC1 et les cas CC2 et CC3.

Erreur des méta-modèles sur la réponse aux premiers modes

Les amplitudes de réponse sur les différents modes constituent de nouvelles sorties sur lesquelles une analyse de sensibilité peut être conduite. Comme dans le chapitre précédent l'approche ANCOVA est utilisée. Le jeu de simulations utilisé pour construire le méta-modèle est toujours le même.

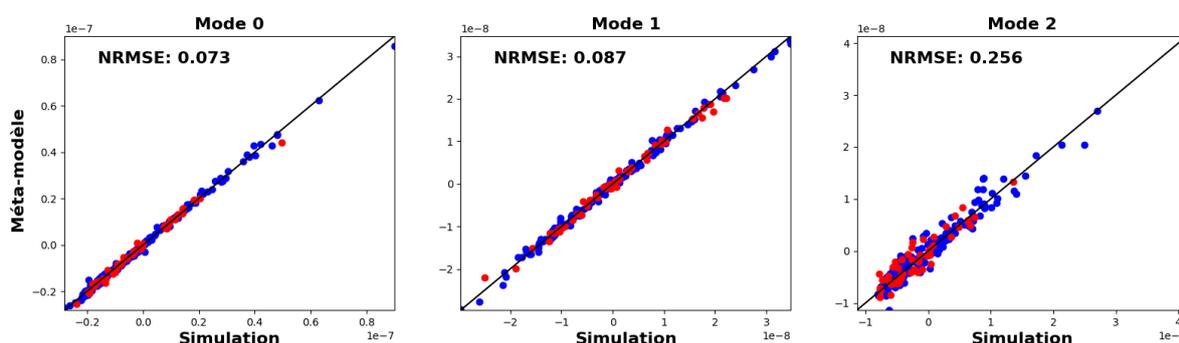


Figure 5.6 : Erreur des méta-modèles pour les trois premiers modes PCA du dommage, cas CC1

Il est tout d'abord intéressant d'observer l'erreur des méta-modèles utilisés pour prédire l'amplitude de la réponse sur chaque mode (Figure 5.6). Celle-ci apparaît relativement faible sur les premiers modes pour chacun des cas critiques, puis croît rapidement après les premiers modes. Il est tout d'abord important de remarquer que l'erreur s'exprime ici en pourcentage de l'écart-type, or la variance de la réponse sur chaque mode est décroissante. Par ailleurs les modes, passés les premiers, semblent de plus en plus être des termes de corrections, qui dépendent davantage des particularités du jeu de données utilisé. La prédiction de la réponse sur ces modes par le méta-modèle présente donc peu d'intérêt. Elle est en outre plus difficile lorsque, par exemple, une grande partie de la variance est due à un petit nombre d'échantillons dans le jeu de données.

Table 5.1 : Erreur des méta-modèles sur les premiers modes PCA du dommage

	CC1	CC2	CC3
Dommage à 35m	11%	10%	9%
Mode 0 de la PCA	7%	7%	9%
Mode 1 de la PCA	9%	9%	15%
Mode 2 de la PCA	26%	32%	48%

Il est également intéressant de comparer les erreurs normalisées sur les premiers modes à l'erreur sur le dommage au point critique (à 35m du HOP pour la configuration 36m). Les erreurs en

question sont données Table 5.1. Le même type de méta-modèle a été utilisé dans les deux cas, et avec les mêmes jeux d'apprentissage et de validation.

Pour les 3 cas de chargement étudiés, il apparaît que l'erreur sur le mode 0 est inférieure à l'erreur sur le dommage à 35m. C'est encore le cas pour le mode 1 pour les cas CC1 et CC2 mais pas pour le cas CC3, ce qui peut notamment s'expliquer par la faible importance du mode 1 par rapport au mode 0 pour ce cas de chargement. Enfin pour le mode 2 l'erreur est largement supérieure à l'erreur obtenue sur le dommage au point critique. L'influence du mode 2 est toutefois apparue très limitée pour les cas CC2 et CC3, et pour le cas CC1 elle reste bien inférieure à l'influence des deux premiers modes. Il ressort de cette analyse que l'erreur des méta-modèles utilisés est inférieure ou égale pour les premiers modes de la PCA, ceux qui présentent le plus d'intérêt, à l'erreur du méta-modèle prédisant l'erreur uniquement au point le plus critique.

Analyse de sensibilité

Les indices ANCOVA sont calculés pour les deux premiers modes (Table 5.2 et Table 5.3) et apportent un éclairage intéressant sur la conclusion précédente. Une distinction nette apparaît entre les paramètres influents des deux modes, et ce pour les 3 cas de chargement considérés (voir Figure 5.7). Les paramètres c_{Cd} , m_{Cd} et m_{Ca} ont en effet une influence faible voire nulle pour l'un des modes et une influence importante sur l'autre mode. La même observation peut également être faite, dans le sens opposé et dans une moindre mesure, pour les densités c_{rho} et m_{rho} . Le nombre de paramètres influents sur chaque mode est par conséquent réduit par rapport au cas où le dommage est directement prédit en un point. La relation entre les entrées et sorties du méta-modèle est donc vraisemblablement simplifiée, ce qui peut expliquer que l'erreur soit plus faible.

Pour le cas CC1, le premier mode dépend presque exclusivement des épaisseurs et densités des couches de bio-colonisation sur le câble et sur les modules, tandis que le deuxième mode dépend fortement des coefficients de traînée du câble et de masse ajoutée des modules, ainsi que des épaisseurs des couches de bio-colonisation mais pas des densités. Il apparaît donc que le mode 0 varie avec les variations de la masse et de la flottabilité du câble alors que le mode 1 varie en fonction des caractéristiques hydrodynamiques du câble et des modules. Ceci apparaît en outre cohérent avec l'analyse de la forme des modes puisque le mode 0 affecte principalement pour le cas CC1 la localisation du dommage maximal quand le mode 1 affecte plutôt l'intensité de ce dommage maximal.

La même analyse peut être faite pour les cas CC2 et CC3 en inversant l'ordre d'importance des deux modes. La figure 5.6 permet de visualiser cette ressemblance entre les modes obtenus pour les différents cas critiques.

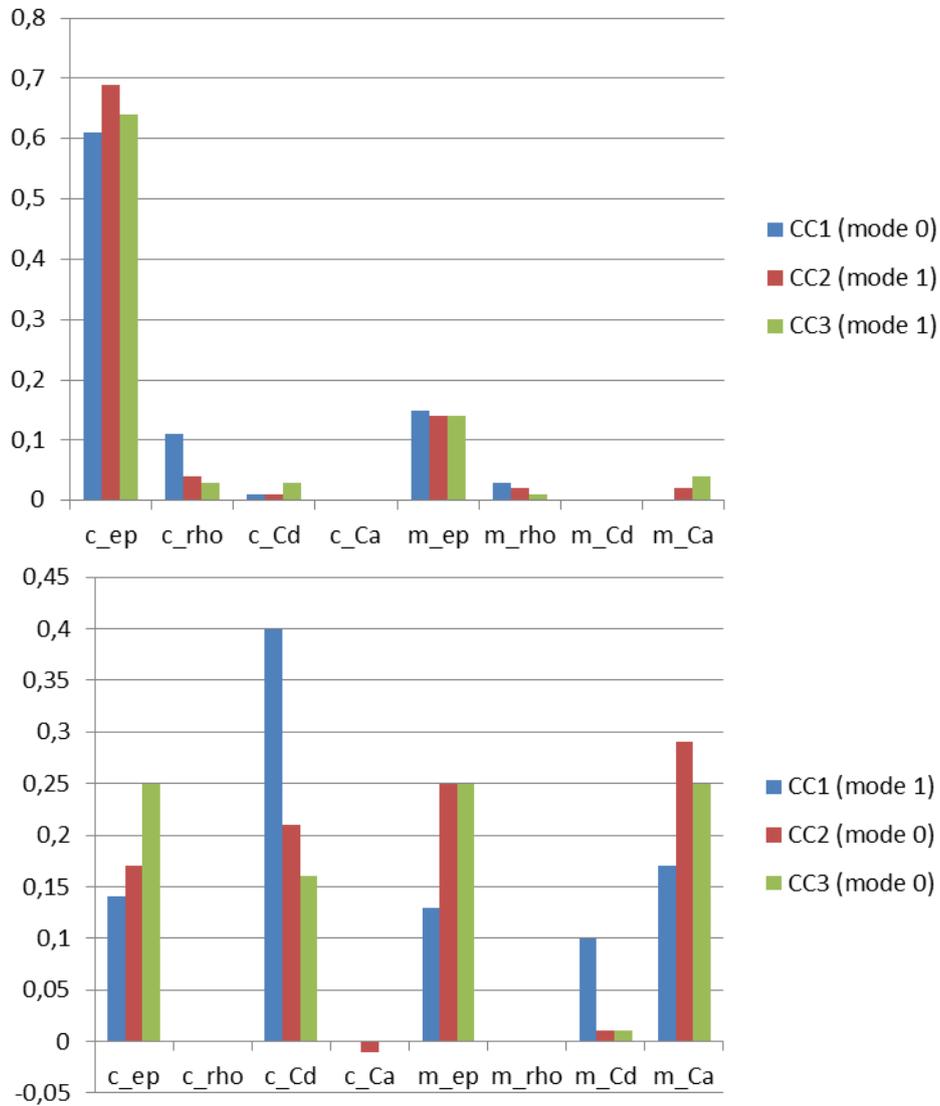


Figure 5.7 : Indices ANCOVA pour les modes PCA du dommage

Table 5.2 : Indices ANCOVA pour le mode 0 de la PCA sur le dommage

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
CC1	0,61	0,11	0,01	0,00	0,15	0,03	0,00	0,00
CC2	0,17	0,00	0,21	-0,01	0,25	0,00	0,01	0,29
CC3	0,25	0,00	0,16	0,00	0,25	0,00	0,01	0,25

Table 5.3 : Indices ANCOVA pour le mode 1 de la PCA sur le dommage

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
CC1	0,14	0,00	0,40	0,00	0,13	0,00	0,10	0,17
CC2	0,69	0,04	0,01	0,00	0,14	0,02	0,00	0,02
CC3	0,64	0,03	0,03	0,00	0,14	0,01	0,00	0,04

L'utilisation de la PCA pour l'analyse de sensibilité du dommage sur les cas critiques apparaît donc pertinente dans le sens où elle apporte davantage d'information qu'une analyse de sensibilité conduite en un seul point. En particulier, en décomposant la réponse en modes, des similitudes apparaissent entre les cas de chargement qui permettent d'expliquer les différences précédemment observées. Les modes de variation du dommage peuvent en effet être les mêmes tandis que l'importance relative de chaque mode varie d'un cas de chargement à l'autre. Par ailleurs, le plan d'expérience utilisé pour cette analyse étant le même que celui utilisé pour la construction du méta-modèle dans le chapitre précédent, l'utilisation de la PCA n'entraîne pas de surcoût en terme de nombre de simulations numériques à réaliser.

5.3 Choix de mesures pertinentes pour la calibration

L'objectif est maintenant d'analyser la réponse du câble pour identifier des sorties de la simulation numérique qui soient pertinentes pour la calibration des paramètres critiques.

Comme précédemment la PCA est ici utilisée pour analyser la réponse de l'ombilical de façon globale, tout le long de l'ombilical. Les sorties considérées sont les valeurs moyennes et les écarts-types des signaux de tension, courbures et positions.

Afin que les différentes sorties aient une influence comparable sur la détermination des modes de la PCA il est nécessaire de normaliser les différentes grandeurs. Cependant l'objectif est aussi de tenir compte des différences d'amplitude de variation de chaque sortie le long du câble, comme cela a été fait pour le dommage. Les sorties ne sont donc pas normalisées une à une mais en considérant pour chacune des grandeurs X observées la moyenne le long du câble $\mu_x(\cdot)$ de son écart-type sur l'ensemble des simulations du jeu de données $\sigma_{sim}(\cdot)$.

$$\bar{X}(sim_i, x_j) = \frac{X(sim_i, x_j) - \mu_{sim}(X)}{\mu_x(\sigma_{sim}(X))}$$

Il y a ici une certaine redondance à considérer simultanément la réponse de l'ombilical en termes de tension et de courbures et en termes de positions des nœuds. Toutefois l'intérêt d'appliquer la PCA est justement d'observer ces redondances, et d'identifier dans la mesure du possible un

ensemble de mesures non redondantes. C'est-à-dire des mesures permettant d'identifier les principaux modes de variations de la réponse de l'ombilical puisque ces modes sont en principe indépendants les uns des autres. En pratique deux modes distincts ont simplement une covariance nulle entre eux, ce qui ne garantit pas qu'ils soient indépendants.

La Figure 5.8 présente les 6 premiers modes de la PCA obtenus sur le cas CC1. Pour plus de lisibilité les différentes sorties sont observées sur des graphiques distincts mais les modes qui sont représentés sont communs à l'ensemble des sorties. Comme pour le dommage, les variations dues aux différents modes sont représentées en fonction de l'abscisse curviligne du câble. L'amplitude attribuée à chaque mode correspond à l'écart-type des variations observées sur le jeu de données.

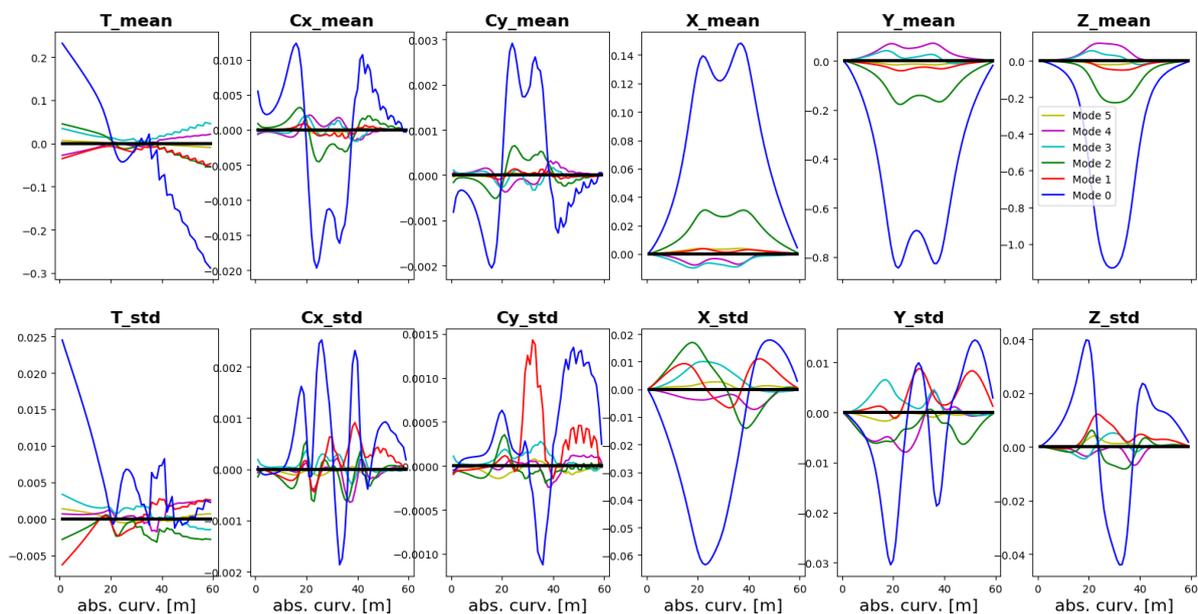


Figure 5.8 : Modes PCA de la réponse de l'ombilical, cas CC1

Il apparaît tout d'abord que le mode 0 à lui seul est responsable de la plus grande partie des variations observées. Il apparaît également que ces variations sont d'amplitudes relativement faibles pour un certain nombre de sorties. Cette remarque est particulièrement importante en ce qui concerne les sorties de type écart-type des signaux temporels puisqu'il faut considérer les limitations des appareils de mesure en termes de plage de fonctionnement et de précision. Pour la tension au HOP (abscisse curviligne de 0m) par exemple, la valeur moyenne sur l'ensemble des signaux temporels est de l'ordre de 3 kN quand les variations sur les valeurs d'écart-type sont de l'ordre de 0,02 kN. En ce qui concerne les sorties de type positions, l'ordre de grandeur des variations sur les écarts-types est de l'ordre de 5 cm quand les variations sur les valeurs moyennes peuvent être de l'ordre du mètre. Il est à cet égard important d'également considérer l'ordre de grandeur des variations dues aux différentes conditions d'environnement. L'objectif ici n'est cependant pas

d'étudier les moyens de mesures, et le choix des points de mesures va simplement s'orienter vers les points où les variations sont les plus importantes, en privilégiant tant que possible des mesures se rapportant à des modes différents.

Bien que le mode 0 soit dominant sur la majorité des sorties observées, le mode 1 domine les variations de l'écart-type de la courbure hors-plan (Cy_std) au voisinage du point critique (abscisse curviligne 35m). En ce sens l'application de la PCA s'avère intéressante pour le cas étudié puisqu'elle permet de distinguer deux modes influents, et en particulier de distinguer leurs zones d'influence respectives. La zone d'influence du mode 1 étant cependant très restreinte il apparaît difficile de mesurer la réponse sur ce mode autrement qu'en mesurant justement l'écart-type de la courbure hors-plan au voisinage entre 30 et 35m, c'est-à-dire à proximité de la localisation critique pour le dommage. L'identification du mode 0 semble en revanche bien plus aisée dans le sens où une grande diversité de sorties peuvent être employées.

Analyse de sensibilité sur les modes PCA de la réponse de l'ombilical

Enfin il convient d'étudier la relation entre les paramètres à calibrer et la réponse aux modes PCA les plus influents. À nouveau une analyse de sensibilité est conduite en utilisant l'approche ANCOVA. Un méta-modèle de type développement sur chaos polynomial est donc construit pour prédire la réponse sur les deux premiers modes PCA, le jeu de simulation utilisé étant toujours le même. L'erreur NRMSE du méta-modèle est de 2% sur le mode 0 et de 3% sur le mode 1. La Figure 5.9 donne les résultats de l'analyse de sensibilité pour les deux modes, sur le cas CC1.

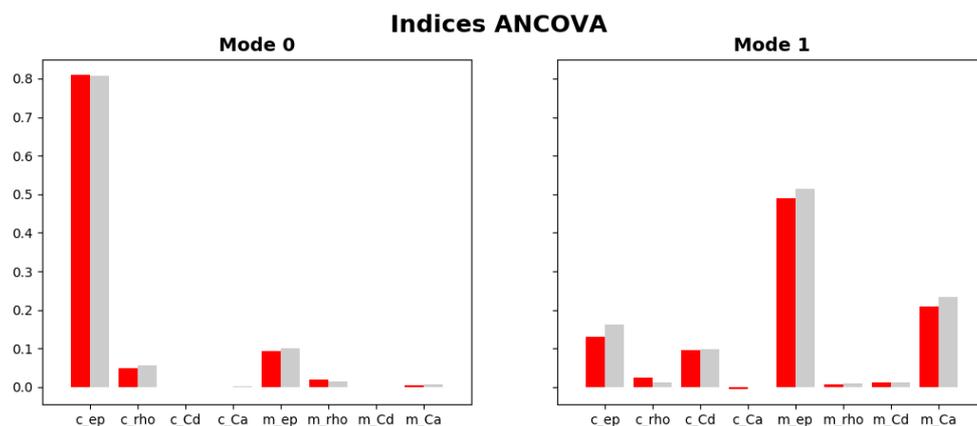


Figure 5.9 : Indices ANCOVA des 2 premiers modes PCA de la réponse de l'ombilical, cas CC1

Il est ici intéressant de constater que les modes PCA obtenus en observant les sorties de la simulation numérique (celles qui pourraient être utilisées pour la calibration) correspondent aux modes PCA obtenus précédemment pour le dommage (Figure 5.7). En effet le mode 0 semble dépendre essentiellement de la masse totale de bio-colonisation (épaisseurs et densités des couches

sur le câble et les modules : c_{ep} , c_{rho} , m_{ep} et m_{rho}), tandis que le mode 1 dépend des caractéristiques hydrodynamiques (trainée du câble : c_{ep} et c_{Cd} , et masse ajoutée des modules : m_{ep} et m_{Ca}).

La comparaison avec les modes PCA du dommage est donc intéressante puisqu'elle permet de mieux comprendre les liens de causalité. Considérant la forme des modes, il apparaît en effet que le mode 0 affecte de façon particulièrement importante la réponse en moyenne de l'ombilical, tandis que le mode 1 influence quasi-exclusivement l'amplitude des variations temporelles de la réponse, et donc l'amplitude du dommage.

Comparaison des modes PCA entre les 3 cas critiques

Ces observations ont été établies à partir de l'étude du cas CC1. L'analyse de la réponse du câble ne peut cependant pas être réduite à un unique cas de chargement et il est important d'observer dans quelle mesure les variations des conditions d'environnement affectent les résultats de l'analyse en composantes principales.

La PCA a donc été appliquée aux 3 cas critiques afin de comparer les résultats, ce qui a permis de constater que les modes obtenus sont remarquablement similaires d'un cas de chargement à l'autre, comme cela peut être observé sur les Figure 5.8, Figure 5.10 et Figure 5.11.

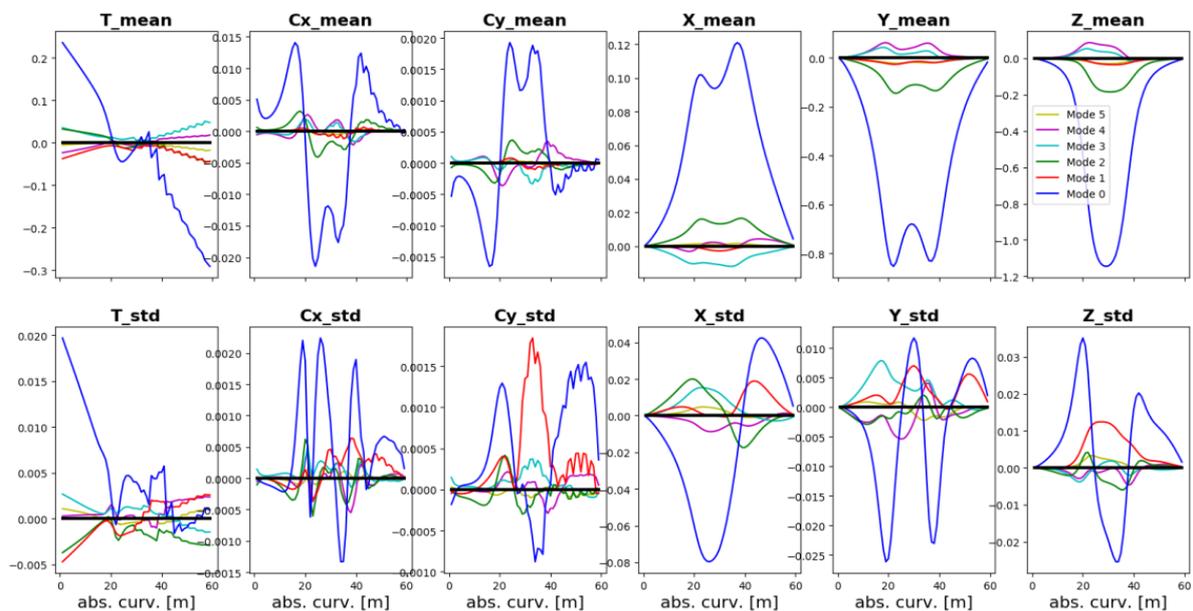


Figure 5.10 : Modes PCA de la réponse de l'ombilical, cas CC2

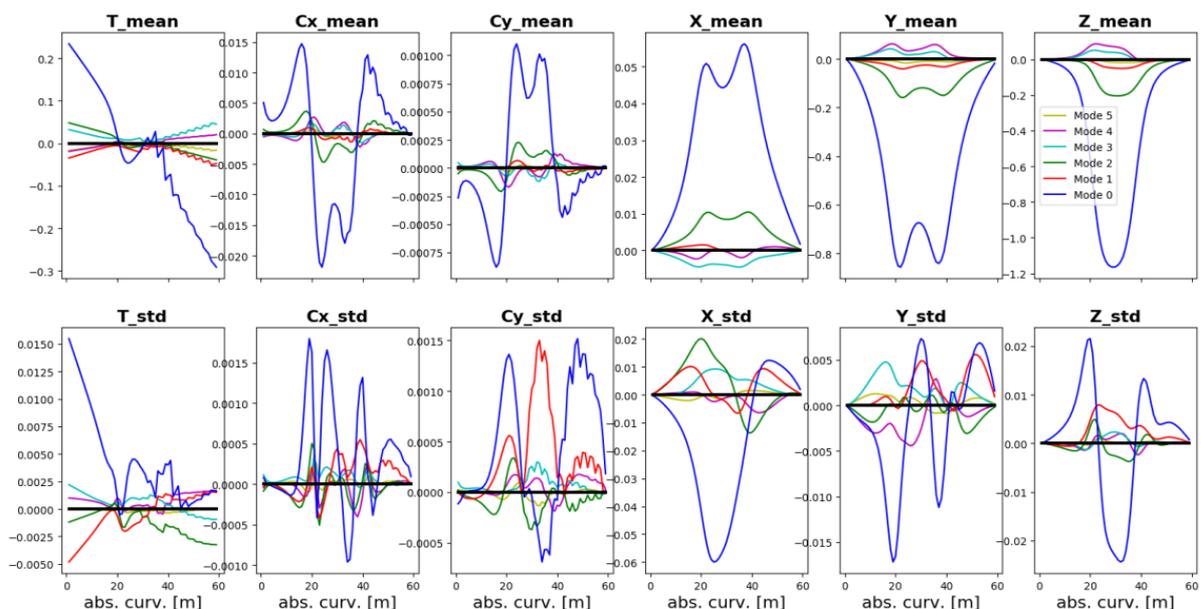


Figure 5.11 : Modes PCA de la réponse de l'ombilical, cas CC3

Les valeurs moyennes des sorties observées diffèrent en revanche d'un cas de chargement critique à l'autre. Ceci peut expliquer les différences plus importantes observées entre les modes PCA du dommage sur les différents cas critiques. À cet égard, la valeur moyenne de l'amplitude des variations de la courbure hors plan à proximité du pic est déterminante.

Les indices de sensibilité calculés pour les 3 cas ont également été comparés et sont donnés Table 5.4 et Table 5.5. Les résultats obtenus varient à nouveau très peu d'un cas de chargement à l'autre (voir Figure 5.12).

Table 5.4 : Indices ANCOVA pour le mode 0 de la PCA sur les sorties de la simulation

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
CC1	0,81	0,05	0,00	0,00	0,09	0,02	0,00	0,01
CC2	0,79	0,06	0,00	0,00	0,09	0,02	0,00	0,00
CC3	0,78	0,06	0,00	0,00	0,10	0,02	0,00	0,00

Table 5.5 : Indices ANCOVA pour le mode 1 de la PCA sur les sorties de la simulation

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
CC1	0,13	0,02	0,09	0,00	0,49	0,01	0,01	0,21
CC2	0,10	0,01	0,16	-0,01	0,50	0,00	0,02	0,21
CC3	0,16	0,05	0,11	0,01	0,48	0,01	0,01	0,16

Il ressort de cette comparaison que les principaux modes PCA de la réponse du câble sont, pour la configuration étudiée, relativement indépendants des conditions d'environnement. Il semble alors possible de s'appuyer sur l'analyse de ces modes pour définir les mesures les plus pertinentes pour la

calibration des paramètres critiques. Il convient pour cela d'identifier les sorties où les variations de la réponse sont le plus importantes, en privilégiant les mesures correspondant à des modes différents.

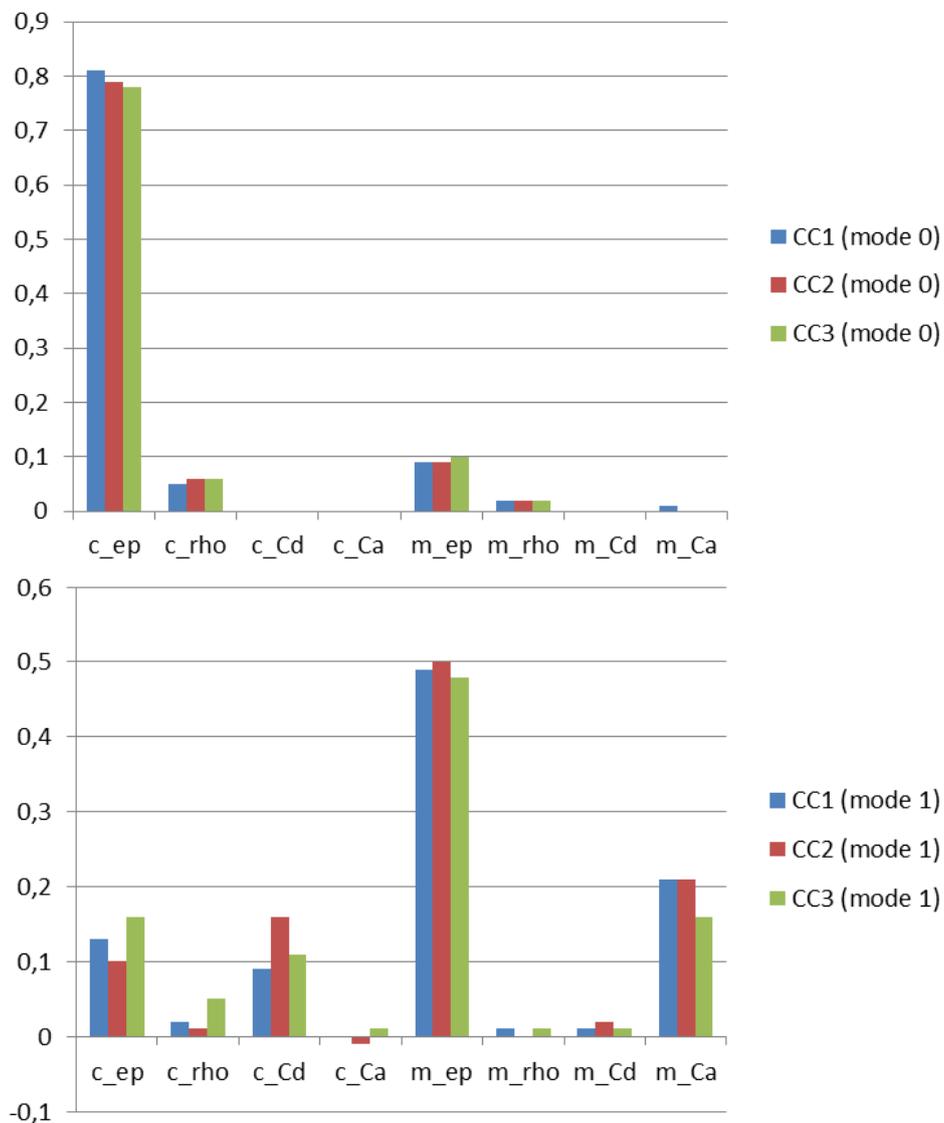


Figure 5.12 : Indices ANCOVA pour les modes PCA de la réponse de l'ombilical

Dans le cas présent, une difficulté apparaît cependant. L'analyse PCA du dommage a montré que pour les cas CC2 et CC3, le principal mode de variation du dommage au point critique est celui lié aux caractéristiques hydrodynamiques du câble et des modules. Or il apparaît dans la présente analyse que, même pour les cas CC2 et CC3, le mode correspondant (mode 1) est de manière générale beaucoup moins influent sur la réponse du câble que le mode 0, lié aux variations de la masse totale du câble.

La PCA permet également d'observer une forte corrélation entre les coordonnées Y et Z de la position moyenne du câble. La forme des premiers modes et leurs amplitudes relatives sont en effet

très similaires entre ces deux sorties, et ce pour les 3 cas critiques étudiés. De ce point la position moyenne selon l'axe X semble moins corrélée à la position Z. La différence se fait toutefois sur les modes 3 et 4 dont les amplitudes de variation sont relativement faibles. En ce qui concerne les coordonnées de la position du câble, il doit également être noté que les sorties de type « écart-type » ont des amplitudes de variation dues aux paramètres à calibrer qui sont très faibles. Ces sorties seront donc a priori difficiles à utiliser pour la calibration.

Pour la suite de l'étude il est donc supposé que les mesures sur la réponse du câble porteront sur : la tension au HOP (0m) et au TDP (60m), la courbure hors-plan (C_y) à 30m, la position du câble à 30m selon l'axe Z et la position du câble à 25m selon l'axe X. Cette hypothèse devra cependant être discutée dans la suite. En effet l'obtention effective de ces mesures n'est pas évidente.

Pour chacune de ces « mesures », il est en particulier supposé que sont disponibles les sorties en termes de moyenne et d'écart-type des signaux temporels. La mesure de l'écart-type de la courbure hors-plan se rapporte au mode 1. Les autres mesures portent sur des sorties où le mode 0 est très dominant.

Table 5.6 : Mesures supposées disponibles pour la calibration

T	T	C_y	X	Z
0m	60m	30m	25m	30m

5.4 Application à la configuration 72m

L'application de l'analyse en composantes principales à la configuration 72m doit permettre de comparer les résultats obtenus entre les deux configurations. L'objectif est de vérifier si les observations faites précédemment restent applicables.

Concernant les modes PCA du dommage, il apparaît que le mode 0 obtenu pour le cas CC1* est très différent des modes 0 obtenus pour les cas CC2* et CC3*, tandis que les modes 1 des 3 cas critiques sont très similaires (voir Figure 5.13).

Le mode 0 du cas CC1* est très fortement lié à l'hydrodynamique du câble (c_{Cd}) et des modules (m_{ep} et m_{Ca}). Le mode 1 est lui lié à la masse linéique du câble (c_{ep} et c_{rho}), donc davantage à la réponse hydrostatique. Les observations faites sur le cas CC1* se rapprochent en cela de ce qui était observé pour la configuration 36m.

Pour les cas CC2* et CC3* les résultats sont relativement proches. Il apparaît que les modes 0 et 1 sont dans l'ensemble liés aux mêmes paramètres, en particulier à l'épaisseur de bio-colonisation

sur le câble (c_{ep}) qui est largement dominante. Le mode 0 apparait toutefois davantage lié à la masse du câble (c_{rho}) alors que le mode 1 est plutôt lié à son coefficient de trainée (c_{Cd}). L'influence sur le dommage de la bio-colonisation sur les modules semble très secondaire pour ces 2 cas de chargement. La distinction entre un mode associé à la réponse hydrostatatique et un mode associé à la réponse hydrodynamique apparait donc nettement moins tranchée ici que pour le cas CC1* ou que pour la configuration 36m.

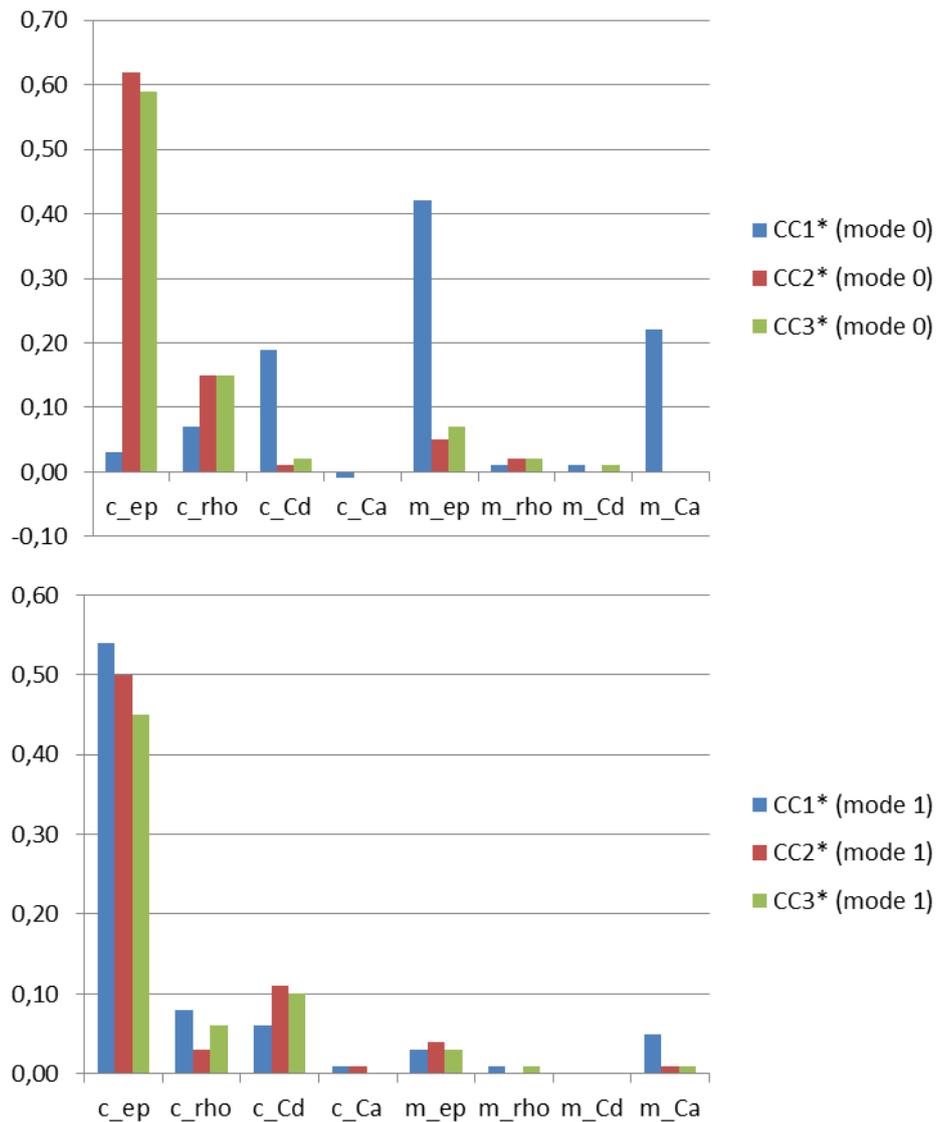


Figure 5.13 : Indices ANCOVA pour les modes PCA du dommage, configuration 72m

Concernant l'erreur des méta-modèles sur la réponse aux modes PCA, les observations sont les mêmes que pour la configuration 36m. À savoir que l'erreur sur le premier mode est très inférieure à l'erreur sur la prédiction du dommage au point critique (68m), mais qu'à nouveau il apparait très difficile de construire un méta-modèle précis pour les modes au-delà du second (voir Table 5.7).

Table 5.7 : Erreur des méta-modèles sur les premiers modes PCA du dommage, configuration 72m

	CC1*	CC2*	CC3*
Dommage à 68m	23%	21%	27%
Mode 0 de la PCA	11%	11%	10%
Mode 1 de la PCA	17%	35%	27%
Mode 2 de la PCA	31%	49%	40%

L'application de la PCA aux sorties de type tensions, courbures et positions renvoie, comme pour la configuration 36m, des modes similaires pour les 3 cas de chargement étudiés. Les résultats des analyses de sensibilité sur les réponses aux deux premiers modes sont données Figure 5.14.

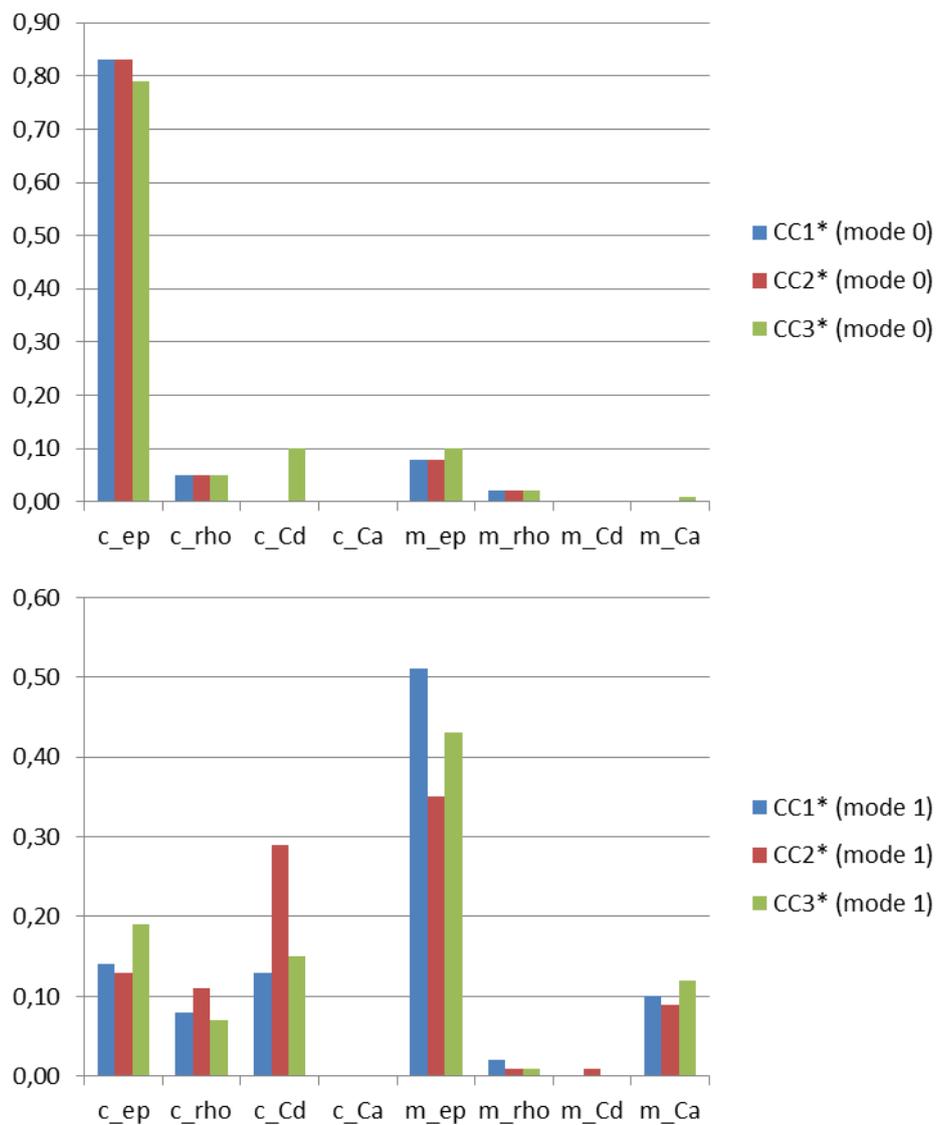


Figure 5.14 : Indices ANCOVA pour les modes PCA de la réponse de l'ombilical, configuration 72m

Les résultats obtenus pour la configuration 72m sont donc globalement similaires à ceux obtenus pour la configuration 36m. La distinction entre les réponses liées à l'hydrostatique d'une part et à l'hydrodynamique d'autre part apparaît clairement. Dans l'ensemble les conclusions de la partie précédente restent donc applicables.

5.5 Conclusions

Dans ce chapitre l'analyse en composantes principales a été appliquée afin d'identifier les modes de variation du dommage liés aux variations des paramètres à calibrer.

Les analyses de sensibilité conduites sur les modes principaux du dommage et de la réponse de l'ombilical ont permis d'identifier en particulier 2 modes de variations dominants. Le premier est lié aux variations des caractéristiques hydrostatiques (masse et volume) du câble, et dans une moindre mesure des modules de flottabilité. Le second est lié aux variations des caractéristiques hydrodynamiques avec une contribution importante de la masse ajoutée des modules. Cette observation est valable pour l'ensemble des cas de chargement étudiés (3 par configuration).

Il apparaît en particulier que les modes de variations de la réponse de l'ombilical en termes de tensions, courbures et positions sont très similaires d'un cas de chargement à l'autre. Pour les modes PCA du dommage en revanche des différences plus importantes sont observées, en particulier en termes d'importance relative des différents modes.

L'intérêt de l'application de la PCA à la réponse de l'ombilical dynamique est, dans l'optique du suivi en service, de permettre de déterminer une sélection de mesures qui soient a priori pertinentes pour la calibration des paramètres liés à la bio-colonisation.

Il apparaît ici que le mode « hydrostatique » est dominant pour la plupart des sorties qui pourraient être utilisées pour la calibration. Or sur le dommage le mode lié aux caractéristiques hydrodynamiques de l'ombilical est le plus influent (en particulier quand la direction de propagation de la houle est plus proche de la perpendiculaire au plan de l'ombilical). Cette observation tend à indiquer qu'il sera difficile de calibrer les paramètres liés à l'hydrodynamique, qui sont cependant parmi les plus influents en termes d'incertitude sur le dommage.

6 Calibration sur des essais numériques

L'objectif de ce chapitre est d'évaluer différentes approches pour la calibration des paramètres liés à la bio-colonisation du câble et des modules de flottabilité. Les essais sont réalisés pour la configuration 36m uniquement. Il est supposé que les paramètres environnementaux sont connus (mesurés). Il est également supposé que les mesures sur la réponse du câble sont constituées des signaux temporels des tensions au HOP et au TDP, de la courbure hors plan (C_y) à 30m du HOP, de la position verticale (Z) à 30m et de la position selon l'axe X à 25m.

6.1 Simulation des mesures pour les essais de calibration

Les essais de calibration présentés dans ce chapitre sont réalisés sur des mesures fictives, issues de simulations numériques. 10 cas de chargement sont utilisés pour les calibrations. Ces 10 cas de chargement sont dans la suite appelés **cas de mesure** et notés CM, pour les différencier des cas critiques (CC) sur lesquels les études précédentes ont été conduites. Il s'agit de 10 cas de chargement sélectionnés à partir des 20% des cas les plus probables identifiés dans la partie 4.1. La sélection suit la même démarche de partitionnement que pour la sélection des cas critiques (voir partie 4.2). Cette démarche assure une certaine diversité parmi les états de mer utilisés. Les coordonnées des cas de mesure dans l'espace des paramètres environnementaux sont données dans la Table 6.1. La Figure 6.1 illustre leur répartition dans le repère Hs-Tp.

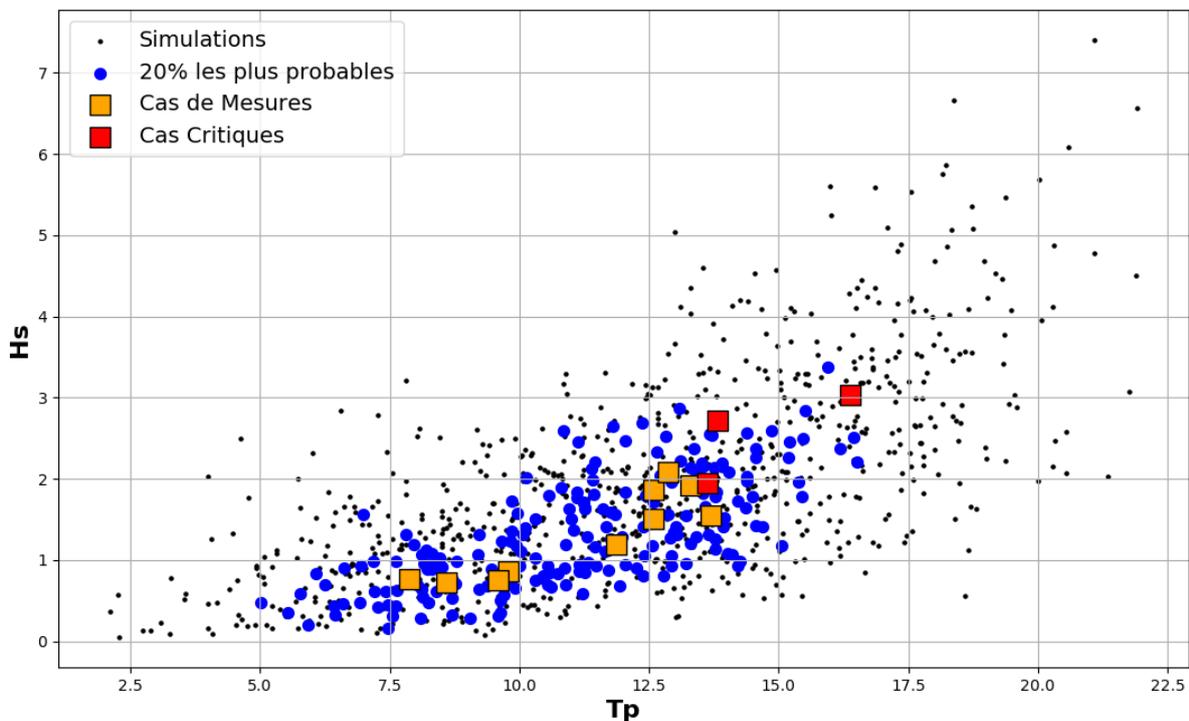


Figure 6.1 : Répartition des cas de mesures dans le repère Hs-Tp

Pour rappel, un cas de chargement, ou état de mer, est ici caractérisé uniquement par les conditions d'environnement définies par les paramètres environnementaux (θ) de la houle, du vent, du courant et de la marée tel que décrit dans la partie 2.5. Pour un même cas de chargement, différentes simulations peuvent donc être réalisées en faisant varier les paramètres du câble (p). Ceux-ci caractérisent les effets de la bio-colonisation et ce sont ces paramètres qui doivent donc être calibrés. Dans ce chapitre, un **scénario de calibration** désigne alors un ensemble de cas de chargement pour lesquels les paramètres du câble sont identiques. La simulation complète d'un scénario de calibration revient alors à réaliser une simulation pour chacun des 10 cas de mesure en utilisant des valeurs fixes pour les paramètres à calibrer.

$$\text{Scénario}_j = \{ \text{Sim}(\theta_i, p_j) \mid i \in [1,10] \}$$

L'objectif de la calibration pour le scénario j est de retrouver les valeurs p_j des paramètres du câble à partir des mesures portant sur les cas de mesure $CM(\theta_{i \in [1,10]})$.

Pour chacun des 10 cas de mesure une série de 200 simulations est réalisée avec les paramètres environnementaux fixés et les paramètres du câble variables. Le plan d'expérience pour les paramètres du câble consiste ici encore en un tirage aléatoire selon la distribution a priori des paramètres, donnée dans la partie 2.6. Ces jeux de données servent en particulier à construire les méta-modèles. Comme précédemment 150 simulations sont utilisées pour le jeu d'apprentissage et 50 pour le jeu de validation. Ces jeux de données permettent également de calculer les valeurs moyennes et écart-types utilisés pour normaliser les sorties utilisées pour la calibration.

$$\text{Série}_i = \{ \text{Sim}(\theta_i, p_j) \mid j \in [1,200] \}$$

Enfin le même plan d'expérience $(p_j)_{j \in [1,200]}$ est utilisé pour réaliser les séries de simulations des 10 cas de mesure. Plutôt que de réaliser de nouvelles simulations, les 50 simulations des jeux de validation ($j \in [150,200]$) de chacune des séries sont donc tour à tour utilisées pour constituer différents scénarios de calibration. Les essais de calibrations sont ainsi réalisés dans la suite sur 50 scénarios différents, et les performances de la calibration sont évaluées en moyenne sur ces 50 scénarios.

Table 6.1 : Caractéristiques des cas de mesures

Cas	Hs	Tp	Dm	Uw	Dw	Uc	Dc	H
CM1	0,86 m	9,8 s	-23,3°	4,11 m/s	-23,1°	0,21 m/s	-2,2°	-0,04 m
CM2	1,50 m	12,6 s	-23,2°	6,63 m/s	-31,7°	0,15 m/s	0,4°	-0,42 m
CM3	1,92 m	13,3 s	-16,7°	6,02 m/s	-7,1°	0,00 m/s	-1,7°	0,51 m
CM4	1,86 m	12,6 s	-17,9°	8,18 m/s	-18,2°	-0,15 m/s	-2,8°	-0,20 m
CM5	0,76 m	7,9 s	-22,4°	6,36 m/s	-15,3°	0,05 m/s	1,6°	0,57 m
CM6	2,09 m	12,9 s	-27,1°	7,81 m/s	-29,3°	0,01 m/s	-1,2°	0,44 m
CM7	0,72 m	8,6 s	-23,9°	5,80 m/s	-23,2°	-0,13 m/s	1,1°	-0,36 m
CM8	1,20 m	11,9 s	-31,3°	4,35 m/s	-46,3°	-0,12 m/s	-1,4°	-0,08 m
CM9	0,76 m	9,6 s	-20,1°	3,50 m/s	-22,3°	-0,22 m/s	-4,7°	0,14 m
CM10	1,54 m	13,7 s	-22,7°	3,40 m/s	-13,1°	-0,02 m/s	-2,2°	-0,36 m

6.2 Sources d'erreur considérées

L'objectif de cette partie est d'identifier les différentes sources d'erreur qui sont considérées dans la suite, et celles qui ne le sont pas. En effet puisque les mesures utilisées pour la calibration sont ici issues des simulations numériques, l'erreur de mesure n'est pas considérée.

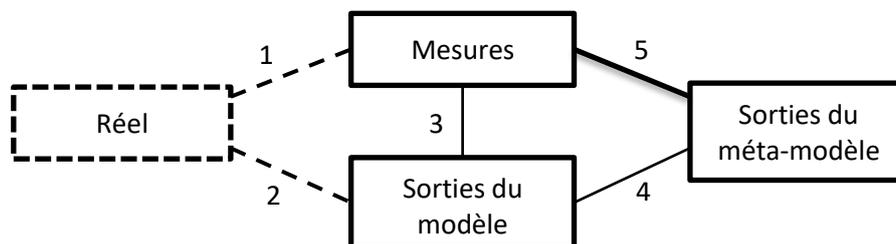


Figure 6.2 : Différentes sources de l'erreur

- 1) Erreur de mesure
- 2) Erreur du modèle
- 3) Erreur modèle / mesures
- 4) Erreur du méta-modèle
- 5) Erreur méta-modèle / mesures

L'erreur sur les sorties du modèle est décomposée ici en une part aléatoire et une part systématique. Il est supposé que l'erreur systématique est fonction des valeurs des paramètres d'entrée. Cette part de l'erreur peut donc être réduite en jouant sur les valeurs des paramètres du modèle. C'est l'objectif de la calibration.

L'erreur aléatoire provient des limitations du modèle, qui sont liées aux simplifications nécessaires des phénomènes physiques modélisés. Il s'agit de l'erreur structurelle du modèle et il

n'est pas possible de réduire cette erreur sans modifier le modèle. Pour tenir compte de l'erreur aléatoire du modèle, cette erreur est donc artificiellement ajoutée aux sorties des simulations qui servent de mesures, comme détaillé dans la suite.

D'autre part l'erreur sur les sorties du méta-modèle (l'erreur entre les sorties du modèle et celles du méta-modèle) est estimée sur le jeu de validation. Cette mesure de l'erreur NRMSE sert à quantifier l'incertitude sur les prédictions du méta-modèle par rapport au modèle.

L'erreur entre les sorties du méta-modèle et les mesures est finalement estimée en considérant que les erreurs entre les sorties du méta-modèle et du modèle d'une part, et entre les sorties du modèle et les mesures d'autre part sont indépendantes. Seules ces deux sources d'erreur sont donc considérées dans la suite.

Différentes hypothèses sont prises pour quantifier l'erreur entre les sorties du modèle et les mesures. Celle-ci est toujours exprimée en pourcentage de l'écart-type mesuré sur les différentes sorties utilisées afin de faciliter la comparaison avec l'erreur NRMSE du méta-modèle. Le choix est alors fait d'appliquer la même amplitude d'erreur à l'ensemble des sorties. Pour chaque scénario de calibration, une valeur d'erreur est tirée aléatoirement pour chacune des sorties suivant une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type égal à l'amplitude considérée pour l'erreur. Les sorties étant toutes centrées-réduites, la même loi est utilisée pour chacune d'entre elles.

6.3 Mesure de l'efficacité de la calibration

Des critères sont définis dans cette partie pour mesurer l'efficacité de la calibration. L'objectif est de définir des outils pour pouvoir comparer les différentes approches qui seront employées dans ce chapitre. En utilisant 50 scénarios de calibration avec différentes valeurs des paramètres à calibrer, il est possible d'effectuer 50 essais pour chacune des approches étudiées pour la calibration. Les résultats de chaque approche peuvent ainsi être étudiés de façon moyennée, et dépendent donc moins des conditions spécifiques liées à chacun des cas pris indépendamment.

L'objectif de la calibration est en premier lieu de retrouver la valeur de chacun des 8 paramètres du câble qui sont étudiés ici. Un premier point sur lequel une comparaison peut être établie entre les différentes approches est donc l'erreur de calibration sur chaque paramètre calibré (Err_{cal}). Celle-ci se définit comme la différence entre la valeur attendue du paramètre ($Val(p)$) et la valeur (moyenne) renvoyée par la calibration ($\mu_{cal}(p)$). Les intervalles de variations de tous les paramètres du câble étant ici ramenés à l'intervalle de 0 à 1, cette erreur de calibration peut en outre être comparée entre les différents paramètres.

$$Err_{cal}(p) = Val(p) - \mu_{cal}(p)$$

L'objectif second de la calibration est d'estimer l'incertitude restante, après calibration, sur les paramètres calibrés. Cette incertitude est quantifiée par une valeur d'écart-type renvoyée par la méthode de calibration pour chacun des paramètres ($\sigma_{cal}(p)$). Plus la valeur de l'écart-type est basse meilleure est la calibration, il est néanmoins nécessaire de s'assurer que les valeurs d'écart-type sont en concordance avec les erreurs de calibration observées. À cette fin la valeur réduite de l'erreur ($R(p)$), qui est le rapport entre l'erreur de calibration et l'écart-type a posteriori, est calculée pour chacune des 50 calibrations effectuées. Il est attendu que l'erreur réduite ait une moyenne nulle et un écart-type unitaire. En pratique si cet écart-type est inférieur à 1 alors l'incertitude prévue est surestimée, et inversement s'il est supérieur à 1 l'incertitude est sous-estimée.

$$R(p) = \frac{Err_{cal}(p)}{\sigma_{cal}(p)}$$

Il est à noter que certains paramètres ont plus d'influence que les autres sur le dommage. Ces paramètres ont été identifiés dans les chapitres précédents, il convient donc en premier lieu de réduire l'erreur de calibration sur ces paramètres. Il est en revanche moins gênant que l'incertitude reste importante sur les paramètres les moins influents.

En effet le but final de la calibration est de réduire **l'incertitude sur le dommage**. La comparaison de l'efficacité des différentes approches doit donc également se faire en observant directement l'évolution de l'incertitude sur le dommage ainsi que de l'erreur d'estimation. Pour cela le dommage est estimé sur les cas critiques CC1, CC2 et CC3 définis au chapitre 4 en utilisant les méta-modèles utilisés pour l'analyse de sensibilité.

La distribution de probabilité du dommage est estimée, avant et après calibration, en réalisant un tirage aléatoire selon les distributions des paramètres avant et après calibration. L'utilisation des méta-modèles permet le tirage d'un grand nombre d'échantillons (ici 10 000 échantillons).

L'erreur relative sur le dommage ($Err(D)$) est calculée en divisant la différence entre le dommage « réel » ($D_{sim}(\theta)$), résultat de la simulation avec les valeurs exactes des paramètres, et l'espérance du dommage sur le tirage ($\mu(D)$), par l'espérance du dommage sur le tirage. L'incertitude est quantifiée par le coefficient de variation du dommage, résultat du rapport de l'écart-type ($\sigma(D)$) sur l'espérance. Ici encore l'erreur et l'incertitude peuvent être comparées.

$$Err(D) = \frac{D_{sim}(\theta) - \mu(D)}{\mu(D)}$$

$$CoV(D) = \frac{\sigma(D)}{\mu(D)}$$

Il est en outre important de comparer ces valeurs à l'incertitude liée à l'utilisation du méta-modèle pour le calcul du dommage (*Mdl. Err. (D)*). En effet l'espérance et l'écart-type du dommage, avant et après calibration, sont évalués en utilisant un méta-modèle. L'erreur du méta-modèle est ici exprimée en pourcentage de l'espérance du dommage pour permettre les comparaisons.

$$Mdl. Err. (D) = \frac{RMSE}{\mu(D)}$$

Dans la suite il sera considéré que réduire l'incertitude sur le dommage due aux paramètres calibrés en deçà de l'incertitude due à l'erreur du méta-modèle permet d'éliminer cette source d'incertitude et remplit donc l'objectif de la calibration.

Sauf mention contraire, les sorties utilisées pour les essais de calibration sont ici les grandeurs statistiques, moyenne et écart-type, calculées sur les signaux temporels des mesures. Les mesures de tensions, courbures et positions données dans la table 5.6 sont ici toutes utilisées, et les 10 cas de chargement de mesure (partie 6.1) sont également tous utilisés. En tout 10 sorties sont donc utilisées pour chaque cas de chargement, soit 100 sorties en comptant l'ensemble des cas.

Différentes approches de calibration vont maintenant être mises en œuvre de façon à évaluer et comparer leurs performances.

6.4 Essais de calibration par optimisation

Une approche classique pour la calibration consiste à optimiser les valeurs des paramètres d'entrée du modèle de façon à minimiser l'erreur au sens des moindres carrés sur les sorties. Un nombre important d'évaluations du modèle peut toutefois être requis, en particulier si de nombreux paramètres doivent être calibrés simultanément. La méthode de résolution du problème d'optimisation est déterminante et son choix dépend de la complexité de la relation entre les paramètres à calibrer et les sorties utilisées. Si cette relation est mal connue a priori ou fortement non-linéaire il est préférable de s'orienter vers des méthodes d'optimisation globales dont l'objectif est d'éviter les éventuels minima locaux, mais qui nécessitent aussi un nombre plus grand d'évaluations.

Tous les paramètres sont ici optimisés en une seule étape, en considérant simultanément les 10 cas de mesures (8 paramètres, 100 sorties). La méthode d'optimisation retenue est la méthode Cobyla (Powell, 1994), via son implémentation dans la librairie OpenTURNS. L'avantage de cette

méthode est de ne pas nécessiter de connaissance sur la dérivée de la fonction à minimiser. Cette méthode est employée ici avec des points de départ multiples de façon à obtenir un minimum global. L'algorithme d'optimisation est donc appliqué une fois pour chaque point de départ. L'utilisation de 100 points de départ pris aléatoirement dans l'espace des paramètres à calibrer s'est avéré être ici un bon compromis, permettant de converger dans la grande majorité des cas vers une solution satisfaisante et pour un temps de calcul acceptable.

L'utilisation d'un méta-modèle s'est avérée nécessaire pour réaliser l'optimisation. L'erreur du méta-modèle n'est cependant pas prise en compte dans cette approche. Il est donc possible de converger vers une solution où l'erreur avec le modèle est importante.

Plusieurs essais de calibration des paramètres liés à la bio-colonisation ont été réalisés avec cette méthode pour différentes amplitudes de l'erreur modèle-mesures. Pour une sortie donnée une valeur d'erreur est tirée aléatoirement pour chaque scénario de calibration suivant une loi normale de moyenne nulle et d'écart-type égal à l'amplitude considérée pour l'erreur. La même distribution de l'erreur est utilisée pour l'ensemble des sorties. L'amplitude de l'erreur (l'écart-type de la distribution) est exprimée en pourcentage de l'écart-type des sorties utilisées, mesuré sur les séries de simulations correspondant à chacun des cas de mesure utilisés. Dans la suite les amplitudes considérées pour l'erreur modèle-mesures vont de 0% à 50%.

L'erreur NRMSE du méta-modèle sur les sorties est également exprimée en pourcentage de l'écart-type observé respectivement sur chaque sortie. Cette erreur varie selon les sorties et d'un cas de chargement à l'autre, mais est constante pour l'ensemble des essais de calibration réalisés. Les valeurs des erreurs NRMSE sont données en moyenne sur les 10 cas de chargement utilisés pour les mesures Table 6.2. La première ligne donne les moyennes des erreurs relevées pour les sorties de type moyenne des signaux temporels pour les 5 mesures employées. La seconde ligne concerne les sorties de type écart-type des signaux temporels.

Table 6.2 : Erreur NRMSE moyenne du méta-modèle sur les différentes sorties

	T à 0m	T à 60m	Cy à 30m	X à 25m	Z à 30m
Moyenne	0,1%	0,1%	1%	0,3%	1%
Écart-type	0,7%	5%	5%	5%	7%

Les résultats des calibrations, en moyenne sur les 50 scénarios, sont donnés Table 6.3 pour des amplitudes de l'erreur modèle-mesures allant de 0% à 50% de l'écart-type des sorties. Pour comparaison l'erreur sur les paramètres avant calibration est donnée en première ligne.

L'augmentation de l'erreur sur les sorties semble diminuer relativement peu la précision de la calibration lorsque l'erreur reste inférieure à 10% de l'écart-type observé sur les sorties. À 25% et 50% d'erreur en revanche les résultats de la calibration se dégradent de façon plus importante, et seuls les paramètres les plus influents continuent à bénéficier de la calibration.

Table 6.3 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration (optimisation)

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
A priori	0,14	0,14	0,16	0,15	0,12	0,13	0,18	0,15
Erreur 0%	0,01	0,04	0,04	0,09	0,02	0,06	0,11	0,03
Erreur 5%	0,01	0,04	0,04	0,09	0,02	0,06	0,11	0,03
Erreur 10%	0,01	0,05	0,04	0,09	0,02	0,07	0,12	0,04
Erreur 25%	0,02	0,05	0,06	0,13	0,03	0,07	0,15	0,06
Erreur 50%	0,03	0,10	0,08	0,21	0,04	0,14	0,21	0,09

La calibration s'avère ici très efficace pour les paramètres identifiés a priori comme les plus influents sur le dommage (c_ep, m_ep, m_Ca), tandis qu'elle l'est nettement moins pour les paramètres c_Ca et m_Cd. Cette observation n'est pas surprenante dans la mesure où il a été observé précédemment que les paramètres influents sur le dommage le sont également sur la réponse du câble en général, et où les sorties utilisées ont été sélectionnées à cette fin.

La Figure 6.3 permet de comparer, sur un exemple où l'erreur modèle-mesures est fixée à 5%, la distribution a priori (en bleu) aux valeurs attendues (en rouge) et renvoyée par l'optimisation (en vert). Sur cet exemple en particulier les paramètres c_ep, m_ep et m_Ca sont très bien calibrés tandis que pour les autres paramètres l'erreur de calibration est plus importante.

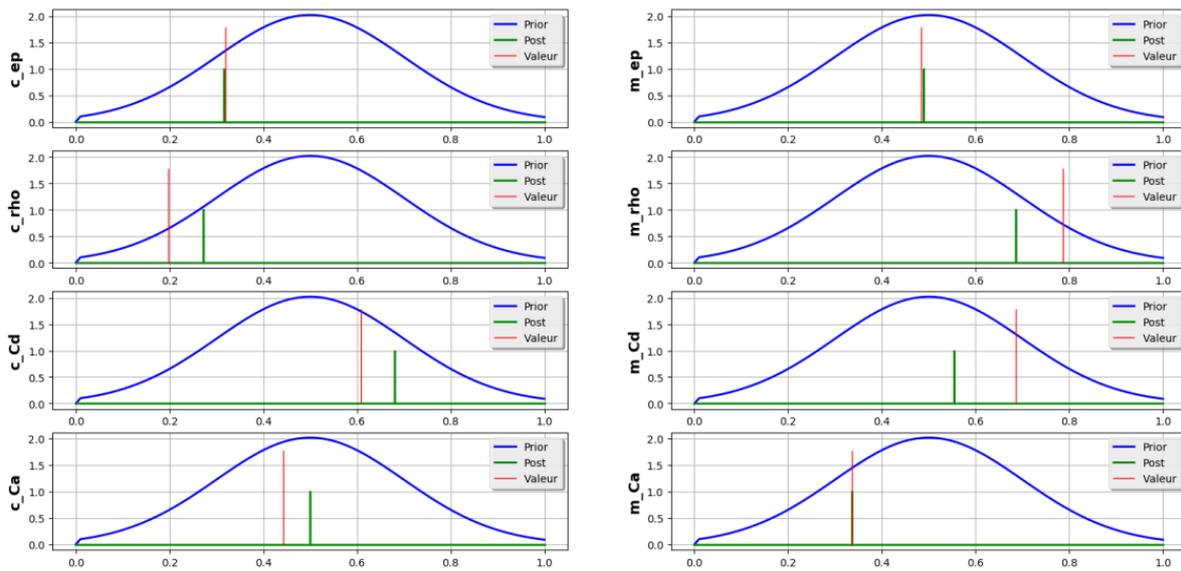


Figure 6.3 : Exemple de calibration des paramètres par optimisation

La Table 6.4 donne les résultats en termes d'erreur sur le dommage. L'espérance du dommage est calculée pour les 3 cas critiques à l'aide d'un méta-modèle dont l'erreur est précisée. L'erreur avant calibration est également donnée pour comparaison.

Table 6.4 : Résultats de la calibration par optimisation en termes d'erreur sur le dommage

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
Erreur 0%	2,9%	-	3,9%	1,9%	-	2,7%	2,5%	-	3,5%
Erreur 5%	3,0%	-	3,9%	1,9%	-	2,7%	2,6%	-	3,5%
Erreur 10%	3,6%	-	3,9%	2,3%	-	2,7%	3,0%	-	3,5%
Erreur 25%	4,0%	-	3,9%	3,2%	-	2,7%	4,3%	-	3,4%
Erreur 50%	4,6%	-	3,9%	4,8%	-	2,7%	6,8%	-	3,5%

Err. : Erreur sur l'espérance du dommage. CoV : Incertitude due aux paramètres calibrés. Mdl. : Erreur du méta-modèle sur la prédiction du dommage.

Il apparaît que pour les différents niveaux d'erreur modèle-mesures considérés, l'optimisation des paramètres liés à la bio-colonisation permet une forte réduction de l'erreur sur l'estimation de l'espérance du dommage qui passe de plus de 20% à environ 5%. L'augmentation de l'erreur sur les mesures se traduit par une augmentation de l'erreur sur le dommage. L'erreur sur la prédiction du dommage reste toutefois faible, et même inférieure à l'erreur du méta-modèle utilisé pour la prédiction lorsque l'erreur modèle-mesures est inférieure à 10%.

La calibration des paramètres apparaît donc satisfaisante dans tous les cas considérés, même avec une erreur de 50% sur les sorties.

Il semble que le nombre de sorties utilisées, ici 100 (10 par cas de chargement), permet dans une certaine mesure de compenser les niveaux d'erreur considérés (erreur modèle-mesures et erreur du méta-modèle). L'erreur sur certaines sorties pourrait néanmoins être très supérieure en pratique à ce qui a été envisagé ici, en particulier lorsque les variations dues aux paramètres calibrés sont faibles. Pour des raisons pratiques cependant les mêmes niveaux d'erreur ont été utilisés ici pour toutes les sorties. L'importance de disposer ou non des différentes mesures est donc étudiée dans la partie 6.9.

Le principal défaut de cette approche basée sur la minimisation de l'erreur au sens des moindres carrés est qu'elle ne permet pas d'estimer l'incertitude après calibration. L'optimisation ne renvoie en effet que les coordonnées de l'optimum. En outre, l'erreur du méta-modèle n'est pas prise en compte.

Remarque : une approche mixte aurait pu consister à itérer entre des optimisations utilisant un méta-modèle et la réalisation de nouvelles simulations, autour de l'optimum, pour compléter le jeu d'apprentissage et diminuer ainsi l'erreur du méta-modèle dans les zones d'intérêt. Une telle approche, basée sur les propriétés des méta-modèles de type krigeage, a été proposée par (Jones 1998). Ce type d'approche n'a pas été employé dans cette étude puisque l'erreur du méta-modèle sur les sorties est relativement faible, mais pourrait être envisagé si l'erreur du méta-modèle était plus importante (dans le cas par exemple où les paramètres environnementaux sont également pris comme entrées du méta-modèle).

6.5 Essais de calibration avec un méta-modèle inverse

L'objectif de la calibration est de déterminer la valeur à donner à un certain nombre de paramètres du modèle numérique à partir d'observations portant notamment sur les sorties dudit modèle. Or si le modèle numérique permet de passer des causes aux effets, il ne permet pas de résoudre le problème inverse qui consiste à retrouver les causes à partir des effets.

Une solution envisageable pour résoudre le problème inverse consiste cependant à construire une approximation du modèle inverse à partir d'un certain nombre de résolutions du problème direct. Les outils de type méta-modèle présentés dans le chapitre 3 peuvent être utilisés à cette fin.

En effet il est possible de construire un méta-modèle, qui sera appelé dans la suite méta-modèle inverse, prenant comme entrées les sorties du modèle et avec pour sorties les entrées du modèle. L'incertitude sur les valeurs calibrées des paramètres est alors estimée en évaluant l'erreur du méta-modèle inverse. Chaque paramètre est calibré indépendamment des autres.

Cette approche présente cependant de sérieuses limitations. En effet il y a un risque de non unicité de la solution dans certains cas, et l'approche n'est alors pas adaptée. Pour limiter ce risque il est important que les sorties utilisées soient relativement nombreuses et indépendantes.

Il est également important de considérer que le domaine de validité du méta-modèle inverse est moins bien maîtrisé que pour le méta-modèle direct. En effet le méta-modèle inverse est construit à partir du plan d'expérience du méta-modèle direct, qui porte sur les sorties du méta-modèle inverse et non sur ses entrées. Ceci peut avoir une incidence forte sur la répartition des points du jeu d'apprentissage, en particulier en termes de corrélation.

Dans le cas présent les essais de calibration par méta-modèle inverse utilisent un méta-modèle de type réseau de neurones artificiels (voir partie 3.7). En effet le nombre de sorties utilisées pour la calibration est important (100 en tout, soit 10 par cas de chargement). Or ces sorties constituent les entrées du méta-modèle inverse et l'approche basée sur le développement sur chaos polynomial n'est pas adaptée car le nombre de termes devient trop important. L'approche basée sur les réseaux de neurones artificiels semble en revanche plus adaptée à ce type de problème. L'architecture retenue est composée d'une unique couche intermédiaire de 200 neurones, pour 100 entrées et 8 sorties (une sortie pour chaque paramètre calibré). La fonction sigmoïde est utilisée comme fonction d'activation pour tous les neurones, même ceux de la couche de sortie puisque les valeurs des paramètres calibrés varient par hypothèse entre 0 et 1.

L'erreur du méta-modèle utilisé pour les essais de calibration est donnée Table 6.5. Cette erreur sert à prédire l'incertitude sur les estimations du méta-modèle inverse. L'erreur est assez faible sur les paramètres les plus influents, mais très importante sur les paramètres les moins influents puisque l'incertitude initiale sur les paramètres vaut 0,20.

Table 6.5 : Erreur RMSE du méta-modèle sur les paramètres à calibrer

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
Erreur RMSE	0,02	0,06	0,07	0,12	0,03	0,06	0,16	0,04

La Table 6.6 donne l'erreur d'estimation des valeurs calibrées de chaque paramètre, en moyenne sur les 50 scénarios de calibration. À nouveau différents niveaux d'erreur modèle-mesures sont envisagés, de 0% à 50% de l'écart-type observé pour chacune des sorties.

Table 6.6 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration (méta-modèle inverse)

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
A priori	0,14	0,14	0,16	0,15	0,12	0,13	0,18	0,15
Erreur 0%	0,01	0,04	0,05	0,10	0,02	0,04	0,13	0,03
Erreur 5%	0,01	0,04	0,06	0,10	0,02	0,05	0,12	0,03
Erreur 10%	0,02	0,05	0,06	0,10	0,02	0,05	0,13	0,04
Erreur 25%	0,02	0,07	0,07	0,11	0,04	0,08	0,13	0,07
Erreur 50%	0,03	0,08	0,08	0,14	0,05	0,10	0,15	0,09

L'erreur de calibration obtenue avec le méta-modèle inverse est globalement similaire à celle obtenue précédemment par optimisation. L'optimisation semble cependant permettre d'obtenir des erreurs de calibration légèrement inférieures dans la majorité des cas. Dans le cas des paramètres qui sont le moins bien calibrés par l'optimisation (c_Ca, m_rho, m_Cd), car moins influents sur la réponse du câble, l'approche par méta-modèle inverse permet toutefois d'obtenir des erreurs plus faibles lorsque l'erreur modèle-mesures est importante.

Avec l'erreur modèle-mesures fixée à 0%, l'erreur de calibration sur les paramètres correspond bien à la mesure de l'erreur RMSE du méta-modèle. Il convient cependant d'observer que l'erreur moyenne de calibration est ici calculée sur le même jeu de donnée qui est utilisé pour estimer l'erreur RMSE du méta-modèle. L'erreur moyenne de calibration correspond à la moyenne de la valeur absolue de l'erreur, ce qui explique qu'elle soit légèrement inférieure à l'erreur RMSE du méta-modèle. La Table 6.7 donne l'écart-type de l'erreur réduite (calculé en supposant que l'espérance de l'erreur réduite est nulle). En l'absence d'erreur modèle-mesures cet écart-type est donc exactement égal à 1 pour l'ensemble des paramètres.

L'introduction d'une erreur entre le modèle et les mesures accroît l'erreur moyenne de calibration. Il est nécessaire d'en tenir compte dans l'estimation de **l'incertitude restante** sur les paramètres calibrés. Il est pour cela supposé que les sorties utilisées pour la calibration suivent chacune une loi normale centrée sur la valeur de la mesure (avec erreur), et dont l'écart-type est égal à l'écart-type de la distribution de l'erreur (qui est donc supposée connue). Un tirage de 10 000 échantillons est réalisé, pour chaque sortie, suivant cette distribution. Les valeurs des paramètres sont calculées pour l'ensemble des échantillons grâce au méta-modèle inverse. L'incertitude sur l'estimation des paramètres due à l'erreur modèle-mesures est alors quantifiée en mesurant l'écart-type des valeurs des paramètres obtenues sur l'ensemble des échantillons. L'incertitude totale (σ_{cal}) est obtenue en supposant que l'incertitude due à l'erreur modèle-mesures (σ_{mes}) et l'incertitude due à l'erreur du méta-modèle ($RMSE$) sont indépendantes.

$$\sigma_{cal}(p) = \sqrt{RMSE(p)^2 + \sigma_{mes}(p)^2}$$

Cette estimation de l'incertitude de calibration permet de prédire de façon satisfaisante les erreurs de calibration observées sur les différents essais réalisés.

Table 6.7 : Écart-type de l'erreur réduite sur les différents paramètres (méta-modèle inverse)

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
A priori	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,8	1,1	1,0
Erreur 0%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Erreur 5%	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Erreur 10%	1,1	1,0	1,0	1,0	1,1	1,1	1,0	1,1
Erreur 25%	1,0	1,1	1,1	1,0	1,3	1,1	1,0	1,3
Erreur 50%	0,9	0,9	1,1	1,0	1,1	0,9	1,0	1,0

La Figure 6.4 permet de comparer, sur un exemple où l'erreur modèle-mesures est fixée à 5%, la distribution a posteriori (en vert) à la valeur attendue (rouge) pour chaque paramètre.

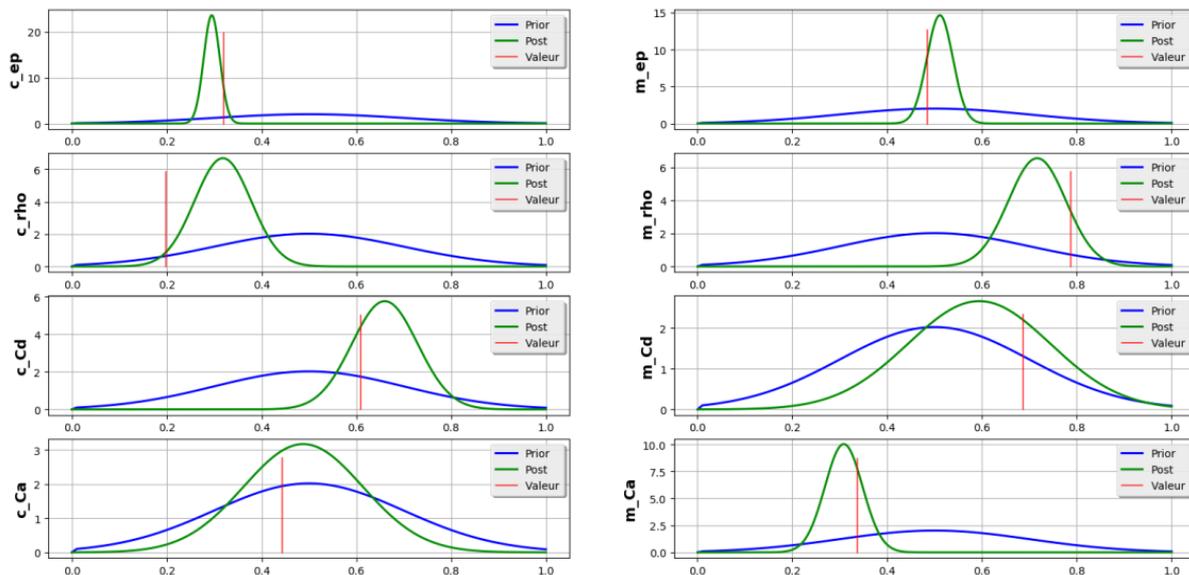


Figure 6.4 : Exemple de calibration des paramètres par méta-modèle inverse

L'incertitude restante sur les paramètres calibrés est également propagée sur le dommage calculé pour les 3 cas critiques. Il semble cependant que l'incertitude qui en résulte sur le dommage est surestimée. En effet l'estimation de l'incertitude sur le dommage (CoV) est de façon générale proche du double de l'erreur observée en moyenne, comme cela s'observe Table 6.8.

Table 6.8 : Résultats de la calibration par méta-modèle inverse en termes d'erreur sur le dommage

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
Erreur 0%	4,4%	8,6%	3,9%	4,0%	10%	2,7%	4,2%	9,7%	3,5%
Erreur 5%	4,0%	8,6%	3,9%	3,8%	10%	2,7%	4,2%	9,8%	3,5%
Erreur 10%	4,1%	8,9%	3,9%	4,5%	11%	2,7%	4,6%	10%	3,5%
Erreur 25%	5,4%	11%	3,9%	4,8%	13%	2,7%	5,0%	13%	3,5%
Erreur 50%	7,5%	15%	3,9%	7,8%	19%	2,6%	8,1%	19%	3,3%

Par rapport à la calibration par optimisation de l'erreur au sens des moindres carrés, il apparaît que l'erreur sur le dommage après calibration des paramètres est plus importante avec le méta-modèle inverse. Ici encore cependant la calibration permet de réduire fortement l'erreur sur l'estimation de l'espérance du dommage. Avec une erreur modèle-mesures fixée à 50% de l'écart-type pour chacune des sorties utilisées, l'incertitude sur le dommage apparaît en moyenne diminuée de moitié.

6.6 Essais de calibration basée sur l'approche bayésienne

Le recalage bayésien est une méthode fiabiliste qui permet de déterminer les valeurs les plus probables des paramètres d'un modèle à partir de quelques observations. Par rapport au recalage par moindres carrés qui renvoie simplement la valeur optimale des paramètres, le recalage bayésien fournit une estimation des lois de probabilité suivies par les paramètres, en tenant compte de l'écart entre le modèle et les mesures.

L'objectif est de passer d'une loi de probabilité a priori (p), basée sur l'estimation initiale du paramètre et de son incertitude, à une loi a posteriori (f) tenant compte de l'information apportée par les mesures. Le théorème de Bayes permet d'écrire la relation de proportionnalité suivante, où $L(\theta, Y_{obs})$ est la fonction de vraisemblance du vecteur des paramètres θ connaissant les mesures Y_{obs} :

$$f(\theta) \propto p(\theta) \cdot L(\theta, Y_{obs})$$

Une méthode de Monte Carlo par chaînes de Markov (MCMC) est utilisée pour réaliser un tirage aléatoire qui converge vers la loi de probabilité f . Il s'agit ici de l'algorithme de Metropolis-Hastings (Hastings 1970), implémenté dans OpenTURNS (Baudin et al. 2016), une méthode de marche aléatoire qui se base sur des estimations ponctuelles de la fonction de vraisemblance (L) pour accepter ou rejeter les propositions de déplacement dans l'espace des paramètres à calibrer. En

particulier la probabilité d'acceptation est basée sur le calcul du rapport de probabilité entre le pas actuel et la proposition pour le pas suivant. Le théorème de Bayes permet justement d'estimer ce ratio puisqu'il donne l'expression de la probabilité a posteriori à une constante multiplicative (inconnue) près.

Le calcul de la fonction de vraisemblance nécessite cependant d'évaluer le modèle pour chaque nouvelle proposition des valeurs des paramètres. Le grand nombre d'évaluations nécessaire pour converger vers la distribution finale impose l'utilisation d'un méta-modèle pour remplacer le modèle numérique. Par ailleurs l'évaluation du méta-modèle ne suffit pas en elle-même à déterminer la vraisemblance des valeurs proposées des paramètres. Une hypothèse doit être prise sur la loi de probabilité suivie par les sorties du modèle (Y) qui sont comparées aux observations. Des lois Normales (\mathcal{N}), indépendantes pour chacune des sorties, sont employées ici. Pour chaque sortie la moyenne de la distribution est prise égale à la valeur (y) renvoyée par le méta-modèle (G). L'écart-type (e) dépend de l'estimation de l'erreur NRMSE du méta-modèle (les sorties utilisées sont normalisées). L'expression utilisée, donnée ci-dessous, permet d'imposer au minimum 5% d'erreur sur chacune des sorties, même quand l'estimation de l'erreur NRMSE du méta-modèle est très faible, ce qui rend l'approche plus robuste.

$$L(\theta, Y_{obs}) = P_{\theta}(Y = Y_{obs})$$

$$Y \sim \mathcal{N}(y, e)$$

$$y = G(\theta)$$

$$e = \sqrt{NRMSE(G)^2 + 0,05^2}$$

L'intérêt de prendre en compte l'erreur du méta-modèle est de limiter l'influence sur la calibration des sorties où cette erreur est importante sans pour autant les écarter complètement.

Le nombre total d'itérations de l'algorithme MCMC est fixé à 20 000 (pas de condition d'arrêt). Cette valeur a été établie en observant la convergence des paramètres calibrés sur un certain nombre d'essais. **La distribution finale** des paramètres calibrés est déterminée à partir des 10 000 dernières itérations. Le choix est fait ici de modéliser la distribution a posteriori par une loi Normale multidimensionnelle. Les paramètres de cette loi sont les valeurs moyennes, les écarts-types et la matrice de corrélation, estimés sur les dernières itérations du tirage. La distribution a posteriori tient ainsi compte des éventuelles corrélations entre les paramètres recalés.

Tout comme les méthodes d'optimisation, la calibration bayésienne nécessite un point de départ. Le choix de ce point de départ peut influencer fortement sur le résultat de la calibration, en particulier sur la vitesse de convergence de la méthode MCMC. Par ailleurs il est nécessaire pour l'exécution de l'algorithme que la vraisemblance de cette estimation initiale soit non nulle. L'approche consistant à utiliser de multiples points de départ n'est cependant pas employée ici car la durée d'exécution de l'algorithme MCMC est nettement supérieure à celle des optimisations.

Deux possibilités ont été envisagées. La première consiste à partir du point le plus probable selon la distribution a priori. L'inconvénient est alors que la vraisemblance de l'estimation initiale peut être relativement faible, voire nulle. La seconde option consiste à appliquer dans un premier temps l'algorithme d'optimisation décrit précédemment, puis à partir de la position de l'optimum. L'optimisation permet de sélectionner un point de départ pertinent pour lequel la valeur de la fonction de vraisemblance est a priori forte. Le temps d'application de l'algorithme d'optimisation représente par ailleurs un surcoût largement acceptable puisque le méta-modèle utilisé est le même que pour l'approche bayésienne. C'est donc la seconde méthode qui a été retenue.

La Figure 6.5 montre les distributions des paramètres avant et après calibration sur un essai de calibration avec 5% d'erreur modèle-mesures. Les paramètres les mieux calibrés sont les mêmes qu'avec les méthodes précédentes. L'erreur et l'incertitude prédite apparaissent nettement diminuées sur l'ensemble des paramètres par rapport à ce qui a été obtenu sur le même exemple avec l'approche par méta-modèle inverse.

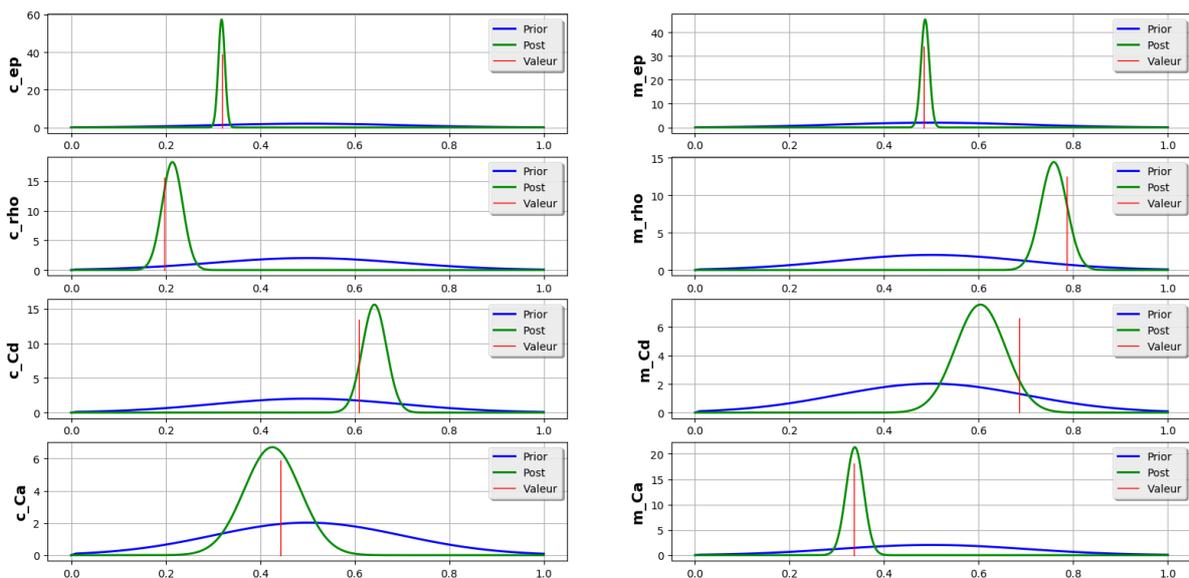


Figure 6.5 : Exemple de calibration des paramètres par l'approche bayésienne

Comme pour les approches précédentes l'efficacité de la méthode de calibration bayésienne est évaluée en observant l'erreur de calibration en moyenne sur les 50 scénarios étudiés (Table 6.9). Il apparait que l'approche bayésienne permet de réduire davantage l'erreur sur les paramètres que les méthodes par optimisation et par méta-modèle inverse.

Table 6.9 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration (approche bayésienne)

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
A priori	0,14	0,14	0,16	0,15	0,12	0,13	0,18	0,15
Erreur 0%	0,00	0,01	0,02	0,03	0,00	0,01	0,03	0,01
Erreur 5%	0,00	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,05	0,01
Erreur 10%	0,01	0,03	0,03	0,06	0,01	0,04	0,08	0,02
Erreur 25%	0,02	0,05	0,05	0,10	0,03	0,07	0,13	0,05
Erreur 50%	0,03	0,08	0,07	0,14	0,04	0,09	0,15	0,08

Par rapport à l'optimisation, qui est appliquée ici avant la calibration bayésienne pour déterminer un point de départ pertinent, il est intéressant de remarquer que l'approche bayésienne ne permet pas simplement d'estimer l'incertitude restante sur le paramètre mais diminue en outre l'erreur de calibration.

Concernant l'estimation de l'incertitude sur les paramètres après calibration, elle apparait également satisfaisante. La Table 6.10 montre en effet que l'écart-type de l'erreur réduite reste proche de 1, variant entre 0,7 et 1,4. Il apparait tout de même que, sur les paramètres où l'erreur est la plus forte (c_Ca et m_Cd), l'incertitude tend à être légèrement sous-estimée. L'augmentation de l'erreur modèle-mesures ne semble pas affecter les valeurs d'écart-types relevées pour l'erreur réduite, ce qui montre que l'estimation de l'incertitude par la méthode augmente bien en proportion de l'erreur de calibration.

Table 6.10 : Écart-type de l'erreur réduite sur les différents paramètres (approche bayésienne)

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
A priori	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,8	1,1	1,0
Erreur 0%	0,7	1,0	1,3	1,4	1,0	1,0	1,3	1,0
Erreur 5%	0,9	0,9	1,3	1,4	0,8	0,8	1,4	0,9
Erreur 10%	1,1	1,3	1,0	1,2	1,1	1,1	1,3	1,1
Erreur 25%	1,1	1,1	1,3	1,0	1,0	0,9	1,3	0,9
Erreur 50%	1,0	1,1	1,2	1,0	0,8	0,9	1,2	0,9

Les résultats en termes de dommage sont donnés Table 6.11. Il apparaît que la calibration bayésienne permet là encore de réduire davantage l’erreur que l’optimisation ou le méta-modèle inverse, en particulier lorsque l’erreur modèle-mesures est importante.

Table 6.11 : Résultats de la calibration bayésienne en termes d’erreur sur le dommage

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
Erreur 0%	3,0%	0,9%	3,9%	1,8%	1,1%	2,7%	2,1%	1,3%	3,5%
Erreur 5%	3,2%	1,1%	3,9%	2,1%	1,4%	2,7%	2,3%	1,7%	3,5%
Erreur 10%	3,1%	1,6%	3,9%	2,2%	2,0%	2,7%	2,5%	2,4%	3,5%
Erreur 25%	3,5%	2,9%	3,9%	3,4%	3,9%	2,7%	3,4%	4,5%	3,5%
Erreur 50%	3,8%	4,6%	3,9%	4,7%	6,8%	2,7%	5,3%	7,5%	3,4%

Par rapport à l’optimisation, les résultats en termes d’erreur sur l’estimation de l’espérance du dommage sont similaires lorsque l’erreur modèle-mesures est inférieure à 10%, mais une différence notable apparaît lorsque l’erreur modèle-mesures augmente davantage. Il est à cet égard intéressant de remarquer que l’incertitude liée aux paramètres calibrés (CoV) est inférieure à l’erreur du méta-modèle utilisé pour la prédiction du dommage tant que l’erreur modèle-mesures est inférieure à 25%. L’erreur sur l’estimation du dommage dépend donc davantage dans ces cas-là du méta-modèle que l’incertitude restante sur les paramètres calibrés.

Lorsque l’erreur modèle-mesures est plus importante, la calibration ne permet plus de diminuer l’incertitude liée aux paramètres au point de la rendre inférieure à l’erreur du méta-modèle. L’erreur sur l’estimation du dommage semble cependant être dans ces cas-là bien couverte par l’estimation de l’incertitude liée aux paramètres.

L’approche bayésienne pour la calibration est plus longue à mettre en œuvre que l’optimisation ou l’approche par méta-modèle inverse. Néanmoins le coût de la calibration est ici principalement lié à la construction des méta-modèles pour les différents cas de chargement utilisés, et ce coût est partagé par les trois méthodes présentées.

Au final l’approche bayésienne apparaît comme la meilleure approche parmi les options étudiées car elle est la moins affectée par l’augmentation de l’erreur modèle-mesures et permet de prédire de façon satisfaisante l’incertitude restante sur le dommage après calibration. Il semble cependant important de bien quantifier l’erreur entre le méta-modèle et les mesures de façon à ce que l’incertitude a posteriori soit correctement estimée. Ici la distribution de l’erreur entre le méta-

modèle et les mesures est supposée connue et est fournie à l'algorithme de calibration, ce qui constitue une situation très favorable.

6.7 Calibration de l'erreur méta-modèle / mesures avec l'approche bayésienne

L'approche bayésienne permet également de considérer les erreurs sur les sorties comme autant de variables supplémentaires à calibrer (une par sortie). Dans cette mise en œuvre la méthode est alors plus robuste puisque des sources d'erreur non anticipées peuvent ainsi être prises en compte. Cette approche pourrait en outre permettre de détecter des anomalies au niveau des mesures, en comparant les niveaux d'erreur obtenus suite à la calibration aux estimations a priori des différentes sources d'incertitudes et à l'erreur du méta-modèle.

L'inconvénient est cependant d'augmenter le nombre de variables à calibrer, ce qui peut se traduire par une convergence plus lente. Il y a par ailleurs un risque de sous-estimer ou de surestimer l'erreur. Les conséquences sur les résultats des calibrations devraient donc en particulier affecter l'incertitude a posteriori sur les paramètres calibrés.

Dans cette seconde mise en œuvre de l'approche bayésienne, un a priori doit être donné pour l'erreur sur les différentes sorties. Dans le cas présent la distribution a priori de l'erreur est choisie de façon arbitraire et est la même pour toutes les sorties. Celle-ci consiste en une loi Normale tronquée de façon asymétrique : la « moyenne » est fixée à 0%, « l'écart-type » à 20% et la distribution est tronquée entre 0% et 100%. Cette distribution favorise donc la convergence vers des niveaux d'erreur plus faibles. Une alternative aurait été d'employer une distribution uniforme (entre 0% et 100% par exemple). Il aurait également été possible (et sûrement préférable) d'employer, pour chaque essai de calibration, une distribution tenant compte de l'estimation de l'erreur telle qu'elle a été réalisée dans la mise en œuvre précédente.

Afin de limiter le nombre de paramètres calibrés, il est supposé que l'erreur entre le méta-modèle et les mesures ne varie pas d'un cas de chargement à l'autre, ce qui permet ici de ramener de 100 à 10 le nombre de paramètres nécessaires à la calibration de l'erreur.

Sur l'exemple d'essai de calibration, avec 5% d'erreur modèle-mesures, présenté sur la Figure 6.6 il apparaît que l'erreur de calibration est plutôt faible et que l'incertitude restante est correctement estimée.

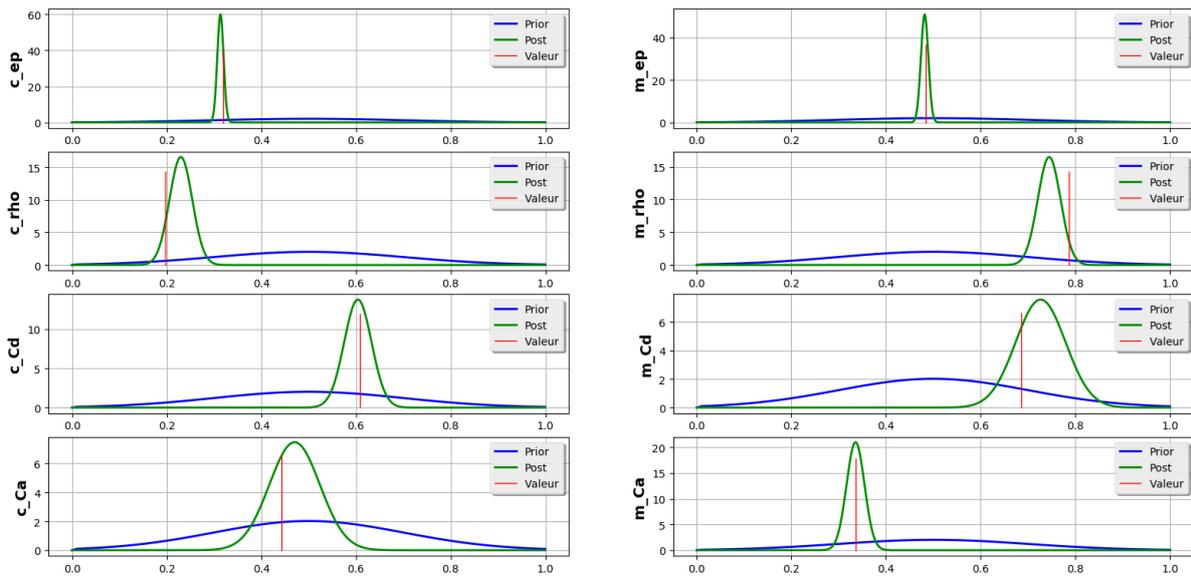


Figure 6.6 : Exemple de calibration des paramètres par l'approche bayésienne en calibrant l'erreur méta-modèle - mesures

La Table 6.12 donne les résultats en termes d'erreur moyenne de calibration sur les 50 scénarios en fonction de l'erreur modèle-mesures. Il est en particulier remarqué que l'erreur de calibration est plus forte lorsqu'aucune erreur modèle-mesures n'est introduite (0%) que lorsque qu'une erreur de 5% est introduite.

Table 6.12 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration (approche bayésienne avec calibration de l'erreur)

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
A priori	0,14	0,14	0,16	0,15	0,12	0,13	0,18	0,15
Erreur 0%	0,02	0,05	0,03	0,10	0,02	0,04	0,04	0,03
Erreur 5%	0,01	0,03	0,03	0,06	0,01	0,03	0,06	0,02
Erreur 10%	0,01	0,03	0,03	0,06	0,01	0,05	0,08	0,02
Erreur 25%	0,01	0,07	0,05	0,14	0,02	0,09	0,11	0,05
Erreur 50%	0,03	0,08	0,07	0,13	0,05	0,10	0,16	0,10

Lorsque l'erreur modèle-mesures est faible (inférieure à 10%), l'erreur de calibration est plus importante avec cette mise en œuvre de l'approche bayésienne, où l'erreur est également calibrée, que dans la mise en œuvre précédente, où l'erreur était supposée connue. En revanche lorsque l'erreur modèle-mesures est plus forte, l'erreur de calibration est relativement similaire entre les deux mises en œuvre.

De même la prédiction de l'incertitude restante sur les paramètres apparaît plus satisfaisante dans les cas où l'incertitude modèle-mesures est importante. La Table 6.13 montre ainsi que

l'incertitude a posteriori sur les paramètres est très fortement sous-estimée dans le cas où l'erreur modèle-mesures est nulle. L'écart-type de l'erreur réduite monte en effet à 380 et 140 pour les paramètres c_{ep} et m_{ep} qui sont ceux sur lesquels l'erreur de calibration est la plus faible. En revanche à partir d'une erreur modèle-mesures de 10% l'écart-type de l'erreur réduite revient à des valeurs proches de 1, similaires à celles qui étaient obtenues dans la mise en œuvre où l'erreur était supposée connue.

Table 6.13 : Écart-type de l'erreur réduite sur les différents paramètres (approche bayésienne avec calibration de l'erreur)

	c_{ep}	c_{rho}	c_{Cd}	c_{Ca}	m_{ep}	m_{rho}	m_{Cd}	m_{Ca}
A priori	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,8	1,1	1,0
Erreur 0%	380	270	8,2	8,6	140	87	2,7	7,6
Erreur 5%	1,5	1,6	1,5	1,9	1,1	1,1	1,6	1,1
Erreur 10%	0,9	1,1	1,2	1,2	0,9	1,1	1,3	0,8
Erreur 25%	1,0	1,2	1,0	1,2	0,9	1,2	1,1	0,9
Erreur 50%	1,2	1,1	1,1	1,0	1,2	1,0	1,2	1,3

La sous-estimation de l'incertitude a posteriori sur les paramètres calibrés traduit une sous-estimation de l'erreur entre le méta-modèle et les mesures. Il apparait en outre qu'en sous-estimant cette erreur, l'erreur de calibration s'est accrue.

L'hypothèse selon laquelle l'erreur entre le méta-modèle et les mesures ne varie pas d'un cas de chargement à l'autre semble ici remise en cause. Cette hypothèse est en effet correcte lorsque l'erreur modèle-mesures domine devant l'erreur du méta-modèle, puisque la même erreur est imposée à toutes les sorties une fois normalisées. Cependant l'erreur du méta-modèle varie de façon importante pour certaines sorties d'un cas de chargement à l'autre, l'estimation de l'erreur sur ces sorties s'en trouve donc faussée dans les cas où l'erreur du méta-modèle domine.

Les résultats en termes d'erreur sur le dommage sont donnés Table 6.14. Bien que l'incertitude due aux paramètres calibrés soit certainement sous-estimée dans les cas où l'erreur modèle-mesures introduite est faible, l'erreur sur l'estimation de l'espérance du dommage est inférieure à l'erreur du méta-modèle pour les 3 cas critiques. Lorsque l'erreur modèle-mesures est plus importante l'estimation de l'incertitude due aux paramètres après calibration semble correcte. Cependant, par rapport à la mise en œuvre où l'erreur n'est pas calibrée, l'erreur sur le dommage est en moyenne supérieure, alors que l'estimation de l'incertitude est plus faible.

Table 6.14 : Résultats de la calibration bayésienne en termes d’erreur sur le dommage lorsque l’erreur méta-modèle-mesures est également calibrée

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
Erreur 0%	3,2%	0,5%	3,9%	1,9%	0,7%	2,7%	2,1%	0,8%	3,5%
Erreur 5%	3,1%	0,9%	3,9%	2,1%	1,3%	2,7%	2,3%	1,5%	3,5%
Erreur 10%	3,1%	1,6%	3,9%	2,1%	2,1%	2,7%	2,6%	2,5%	3,5%
Erreur 25%	3,4%	3,2%	3,9%	2,5%	3,9%	2,7%	3,5%	4,6%	3,5%
Erreur 50%	4,3%	4,6%	4,0%	5,1%	6,1%	2,7%	5,6%	7,0%	3,5%

La calibration de l’erreur par l’algorithme de calibration bayésienne a ici très bien fonctionné dans les cas où l’erreur était similaire sur l’ensemble des sorties et sur l’ensemble des cas de chargement. En effet, afin de limiter le nombre de paramètres calibrés simultanément, il a été supposé que l’erreur sur une même sortie variait peu d’un cas de chargement à l’autre. Lorsque l’erreur introduite sur les mesures était faible, l’erreur de calibration s’est avérée supérieure aux prédictions de l’incertitude a posteriori, probablement du fait que l’erreur sur certaines sorties était mal quantifiée car variable d’un cas de chargement à l’autre.

Il apparaît donc particulièrement important de bien quantifier l’erreur entre le méta-modèle et les mesures utilisées comme sorties pour la calibration. Cette approche qui permet de calibrer cette erreur directement à partir des valeurs des mesures utilisées pour la calibration semble donc particulièrement intéressante à cet égard. Il semble toutefois intéressant d’inclure autant que possible les connaissances disponibles a priori, sur l’erreur du méta-modèle par exemple, ce qui n’a pas été fait ici et doit donc être envisagé comme une perspective.

Dans la suite, par souci de simplicité, seule l’approche bayésienne est employée, avec optimisation préalable et en supposant l’erreur connue. En outre l’erreur modèle-mesures est toujours fixée à 5% de l’écart-type observé sur les sorties, sauf mention contraire.

6.8 Prise en compte des paramètres non-calibrés

L’objectif des analyses de sensibilité présentées dans le chapitre 4 est de permettre de sélectionner et de prioriser les paramètres à calibrer. Or dans l’étude présentée seuls 8 paramètres liés à la bio-colonisation sont étudiés, négligeant de fait les incertitudes sur les paramètres liés aux caractéristiques structurelles du câble, ou encore aux caractéristiques de la configuration (position du point d’ancrage, longueur de l’ombilical, position des modules...). Par ailleurs, comme expliqué au

chapitre 2, la configuration étudiée évite de traiter le problème des interactions entre le câble et le fond qui constitueraient également une source importante d'incertitude.

Il a de fait été constaté que les différentes méthodes étudiées permettent, par l'usage du méta-modèle, de calibrer sans difficulté majeure l'ensemble des 8 paramètres étudiés. Le choix a donc été fait jusqu'ici, bien que les paramètres les plus influents aient été identifiés, de calibrer les 8 paramètres.

Il convient néanmoins de considérer que davantage de paramètres auraient pu être étudiés (hystérésis en flexion du câble, interactions avec le sol, position du TDP pour une configuration « Steep Wave »...). Or la construction d'un méta-modèle avec un nombre important d'entrées s'avère plus problématique, ne serait-ce que par l'augmentation du nombre de simulations nécessaires à l'apprentissage pour atteindre un niveau de précision permettant effectivement de calibrer l'ensemble des paramètres étudiés. Dans ces conditions, la calibration de l'ensemble des paramètres initialement considérés comme incertains peut ne pas s'avérer judicieuse, mais il peut toutefois être nécessaire de tenir compte de l'incertitude associée aux paramètres non calibrés.

Dans cette partie, l'objectif est d'étudier l'effet sur la calibration de l'incertitude (et de l'erreur) liée aux paramètres non calibrés. À fin cette fin cependant, le nombre de paramètres étudiés n'est pas élargi, et c'est donc le nombre de paramètres calibrés qui est réduit.

Pour prendre en compte l'incertitude liée aux paramètres non calibrés dans la calibration, la méthode retenue consiste à conserver dans le plan d'expérience pour la construction du méta-modèle les variations des 8 paramètres, mais à ne construire le méta-modèle qu'avec les paramètres à calibrer en entrée. L'effet sur les sorties des variations des paramètres non calibrés est alors considéré comme un bruit dans le jeu d'apprentissage, qui résulte en une erreur plus importante pour le méta-modèle. Cette erreur est quantifiée sur le jeu de validation, ce qui permet d'en tenir compte pour la calibration.

Cette approche permet d'économiser le coût d'une analyse de sensibilité visant à déterminer l'incertitude sur les sorties liée aux paramètres non calibrés. Dans la mesure où ces paramètres sont censés être moins influents que les paramètres à calibrer, il est attendu que le coût de construction du méta-modèle soit inchangé.

À partir des résultats des analyses de sensibilité, en particulier sur le premier mode PCA des cas CC2 et CC3 (second mode pour le cas CC1), les 4 paramètres les plus influents parmi les 8 étudiés sont les épaisseurs de bio-colonisation sur le câble et sur les modules (c_{ep} et m_{ep}), accompagnées

du coefficient de masse ajoutée des modules (m_{Ca}) et du coefficient de trainée du câble (c_{Cd}). Les 4 autres paramètres (c_{rho} , c_{Ca} , m_{rho} , m_{Cd}) sont dans la suite écartés un par un de la calibration. Selon l'importance de chacun de ces paramètres, l'erreur du méta-modèle doit augmenter de façon plus ou moins marquée sur les différentes sorties, affectant ainsi les résultats de la calibration. L'objectif est de s'assurer que l'incertitude sur les paramètres calibrés reste correctement estimée.

À la différence de l'erreur aléatoire introduite sur les mesures, l'erreur sur les sorties due à la valeur fixe mais inconnue et non calibrée du paramètre écarté est cohérente sur l'ensemble des sorties. Il est donc attendu que la calibration des paramètres restants tende à compenser cette erreur. En effet il est observé (avec l'approche bayésienne) que l'erreur de calibration est fortement corrélée entre certains paramètres, comme le montre la Table 6.15. La corrélation négative entre c_{Cd} et m_{Cd} indique ainsi qu'une sous-évaluation du coefficient de trainée du câble induit une surévaluation du coefficient de trainée des modules.

Table 6.15 : Corrélation de l'erreur de calibration sur les différents paramètres (lorsque tous les paramètres sont calibrés)

	c_{ep}	c_{rho}	c_{Cd}	c_{Ca}	m_{ep}	m_{rho}	m_{Cd}	m_{Ca}
c_{ep}	1,0	-0,7	-0,5	-0,4	-0,4	0,0	0,1	0,0
c_{rho}	-0,7	1,0	0,3	0,4	0,2	-0,4	0,1	0,3
c_{Cd}	-0,5	0,3	1,0	0,1	0,2	-0,1	-0,8	0,3
c_{Ca}	-0,4	0,4	0,1	1,0	-0,1	0,0	0,0	0,0
m_{ep}	-0,4	0,2	0,2	-0,1	1,0	-0,3	-0,3	-0,7
m_{rho}	0,0	-0,4	-0,1	0,0	-0,3	1,0	-0,1	0,0
m_{Cd}	0,1	0,1	-0,8	0,0	-0,3	-0,1	1,0	0,0
m_{Ca}	0,0	0,3	0,3	0,0	-0,7	0,0	0,0	1,0

Comme attendu donc, l'erreur de calibration sur les paramètres varie selon les paramètres écartés. Il est observé Table 6.16 qu'en écartant un paramètre relativement influent comme c_{rho} , la calibration des autres paramètres se dégrade nettement, tandis qu'écarter c_{Ca} dont l'influence est plus faible a des conséquences moindres. Les paramètres les plus influents sont logiquement moins affectés.

Table 6.16 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration selon les paramètres calibrés

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
A priori	0,14	0,14	0,16	0,15	0,12	0,13	0,18	0,15
8 paramètres	0,00	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,05	0,01
Sans c_rho	0,01	-	0,06	0,13	0,06	0,13	0,16	0,08
Sans c_Ca	0,01	0,03	0,04	-	0,02	0,04	0,10	0,03
Sans m_rho	0,01	0,05	0,05	0,11	0,04	-	0,13	0,05
Sans m_Cd	0,01	0,02	0,03	0,07	0,01	0,03	-	0,04

L'incertitude a posteriori sur les paramètres calibrés apparaît globalement sous-estimée par rapport aux erreurs observées lorsqu'un paramètre est écarté de la calibration. Il est ainsi observé Table 6.17 que l'écart-type de l'erreur réduite atteint des valeurs proches de 2, voire 3 pour certains paramètres. Là encore les paramètres les plus influents sont moins affectés.

Table 6.17 : Écart-type de l'erreur réduite sur les différents paramètres selon les paramètres calibrés

	c_ep	c_rho	c_Cd	c_Ca	m_ep	m_rho	m_Cd	m_Ca
A priori	0,8	0,9	1,0	0,9	0,8	0,8	1,1	1,0
8 paramètres	0,9	0,9	1,3	1,3	0,8	0,9	1,3	0,9
Sans c_rho	1,1	-	2,1	2,3	1,6	2,9	2,7	1,5
Sans c_Ca	1,6	1,6	2,1	-	1,6	1,2	2,2	1,4
Sans m_rho	1,3	1,7	2,1	1,9	1,8	-	2,7	1,7
Sans m_Cd	1,2	1,6	2,9	1,4	1,6	1,1	-	1,6

Il semble en outre que la sous-estimation de l'erreur de calibration soit liée à la compensation de l'erreur due au paramètre écarté. Ainsi pour le paramètre c_Cd l'incertitude a posteriori est sous-estimée de façon plus importante lorsque le paramètre m_Cd est écarté, et de même pour m_rho lorsque c_rho est écarté.

En termes de dommage, l'incertitude liée aux paramètres (calibrés ou non) n'apparaît finalement pas sous-estimée (Table 6.18). Ceci s'explique d'une part du fait que les paramètres les plus influents ont été calibrés de façon satisfaisante. D'autre part, l'incertitude liée au paramètre non calibré n'a pas été diminuée et a donc davantage d'importance, sans avoir pu être sous-estimée.

Table 6.18 : Résultats en termes d'erreur sur le dommage selon les paramètres calibrés

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
8 paramètres	3,2%	1,1%	3,9%	2,1%	1,4%	2,7%	2,3%	1,7%	3,5%
Sans c_rho	5,4%	10,8%	3,9%	2,4%	4,7%	2,6%	3,5%	3,7%	3,4%
Sans c_Ca	3,2%	2,5%	3,9%	1,9%	2,8%	2,7%	2,6%	2,9%	3,5%
Sans m_rho	3,8%	5,9%	3,9%	2,4%	3,2%	2,7%	3,1%	3,4%	3,4%
Sans m_Cd	3,6%	6,6%	3,9%	3,4%	7,5%	2,7%	3,3%	7,5%	3,5%

Le fait que l'erreur sur les paramètres non calibrés soit compensée par un biais sur la calibration des autres paramètres peut avoir un effet globalement positif. Deux problématiques apparaissent cependant. D'une part cette compensation diminue l'erreur aux points où la réponse de l'ombilical est mesurée, mais pas nécessairement sur toute sa longueur. D'autre part il n'apparaît alors pas évident d'appliquer les résultats de la calibration à un cas de chargement qui n'a pas été utilisé pour la calibration, l'influence relative des paramètres pouvant varier d'un cas de chargement à l'autre. Le cas présent s'avère toutefois favorable à cet égard, et il apparaît dans les résultats présentés que l'erreur sur l'estimation du dommage causé par les cas critiques est relativement faible en moyenne devant les incertitudes prédites.

Remarque : les incertitudes de mesure sur les paramètres environnementaux auraient pu être prises en compte de cette façon, en introduisant les variations correspondantes dans le jeu de données. De même, pour un cas de chargement donné toutes les simulations du jeu de données sont réalisées avec les mêmes phases pour le signal de la houle. Il aurait toutefois pu être intéressant d'étudier l'effet du déphasage, en relation surtout avec la durée totale des simulations. En effet plus la durée des simulations est réduite plus les grandeurs statistiques observées (ou les caractéristiques fréquentielles) sont susceptibles d'être affectées par ce déphasage. Utiliser des déphasages différents pour les simulations des jeux de données de chaque cas de chargement permettrait de tenir compte de l'incertitude associée, qui existe aussi entre la simulation et la réalité.

6.9 Comparaison de l'influence des différentes mesures utilisées

La disponibilité des différentes mesures utilisées jusqu'ici peut être remise en cause de par les difficultés techniques que présente l'installation de capteurs en milieu marin (bio-colonisation, corrosion, possibilité d'alimenter le capteur en énergie et de transmettre les données...). L'objectif est donc ici d'envisager les situations où l'ensemble de ces mesures ne peut pas être mis en œuvre.

Les mesures disponibles sont regroupées par type (tensions / courbures / positions). L'ensemble des mesures disponibles restent celles définies table 5.6.

Les résultats en termes d'erreur sur les paramètres, donnés Table 6.19, reflètent l'importance qu'ont les différents paramètres sur les différentes sorties. Les tensions permettent de calibrer efficacement les épaisseurs et densités de bio-colonisation. La mesure de courbure apparaît avantageuse pour la calibration des coefficients de trainée, en particulier celui du câble. Les mesures de positions semblent ici intéressantes pour la calibration du coefficient de masse ajoutée des modules, dont l'influence sur le dommage est importante. L'intérêt de disposer de divers types de mesures apparaît cependant clairement, et permet de calibrer des paramètres à l'influence faible comme c_{Ca} .

Table 6.19 : Erreur moyenne sur les paramètres avant et après calibration selon les mesures utilisées

	c_{ep}	c_{rho}	c_{Cd}	c_{Ca}	m_{ep}	m_{rho}	m_{Cd}	m_{Ca}
A priori	0,14	0,14	0,16	0,15	0,12	0,13	0,18	0,15
Tensions + Courbures + Positions	0,00	0,01	0,02	0,04	0,01	0,02	0,05	0,01
Tensions + Courbures	0,00	0,02	0,03	0,09	0,01	0,03	0,07	0,02
Tensions + Positions	0,00	0,02	0,04	0,06	0,01	0,04	0,09	0,05
Courbures + Positions	0,03	0,07	0,04	0,12	0,03	0,12	0,05	0,04
Tensions	0,01	0,02	0,12	0,12	0,03	0,06	0,15	0,10
Courbures	0,04	0,10	0,05	0,14	0,08	0,13	0,09	0,12
Positions	0,03	0,09	0,05	0,12	0,04	0,13	0,11	0,06

L'intérêt de la calibration est de diminuer l'incertitude sur le dommage, l'importance des différentes mesures doit donc en particulier être évaluée par leur capacité à réduire cette incertitude. Les résultats en termes d'erreur et d'incertitude sur le dommage sont donc donnés Table 6.20.

Table 6.20 : Résultats de la calibration en termes de dommage selon les mesures utilisées

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
Tensions + Courbures + Positions	3,2%	1,1%	3,9%	2,1%	1,4%	2,7%	2,3%	1,7%	3,5%
Tensions + Courbures	3,2%	1,7%	3,9%	2,1%	1,7%	2,7%	2,3%	2,3%	3,5%
Tensions + Positions	3,3%	2,1%	3,9%	3,9%	5,2%	2,7%	4,7%	5,9%	3,4%
Courbures + Positions	3,5%	2,0%	3,9%	1,7%	1,9%	2,7%	2,1%	2,2%	3,4%
Tensions	6,5%	11%	3,8%	9,4%	17%	2,5%	9,5%	16%	3,3%
Courbures	3,6%	3,6%	3,9%	2,1%	2,9%	2,7%	2,4%	3,9%	3,4%
Positions	3,5%	2,8%	3,9%	5,2%	7,7%	2,6%	6,4%	8,7%	3,4%

La mesure de la courbure hors-plan apparait particulièrement efficace pour diminuer l'erreur ainsi que l'incertitude sur le dommage. En effet le dommage dépend ici principalement de l'écart-type de la courbure, et le point critique où le dommage est évalué est situé à proximité du point où la mesure de courbure est localisée. L'erreur de calibration paramètre par paramètre est pourtant très importante, mais la corrélation entre les différentes erreurs indique que la compensation est forte (notamment entre m_{ep} et m_{Ca}). En effet, le nombre de paramètres calibrés est ici proche du nombre de sorties utilisées.

L'absence de la mesure de courbure s'avère la plus dommageable (par rapport aux tensions et positions), en particulier sur les cas de chargement CC2 et CC3 où les caractéristiques hydrodynamiques du câble et des modules sont très influentes sur le dommage. L'utilisation des 2 mesures de position permet néanmoins ici de compenser en partie l'absence de la mesure de courbure et de calibrer de façon satisfaisante les coefficients hydrodynamiques, diminuant ainsi sensiblement l'incertitude finale sur le dommage.

Avec uniquement 2 mesures de tension, au HOP et au TDP, et en tenant compte d'une erreur de 5% sur les mesures, l'incertitude sur le dommage des 3 cas critiques étudiées a été ramenée à environ 15%. Dans le cas présent en effet une part importante de l'incertitude sur le dommage est liée à la variabilité de la masse de la bio-colonisation. Il apparait donc cohérent qu'en mesurant les tensions moyennes aux extrémités du câble, une part importante de cette incertitude puisse être réduite. Selon l'importance des sources d'incertitudes autres que celle liée aux paramètres calibrés,

ce niveau de résultat peut être jugé acceptable. Ce type de conclusion dépend toutefois des spécificités de chaque configuration.

6.10 Utilisation des caractéristiques fréquentielles des signaux

Dans l'optique de tirer le meilleur parti d'un faible nombre de mesures, il est ici envisagé d'essayer d'extraire davantage d'information des signaux temporels en exploitant notamment les variations des caractéristiques fréquentielles de ces derniers.

Jusqu'ici les sorties utilisées ont été la moyenne et l'écart-type de chaque signal temporel mesuré.

$$T_\mu = \frac{1}{N_t} \sum_{i=0}^{N_t-1} T(t_i)$$

$$T_\sigma = \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{i=0}^{N_t-1} (T(t_i) - T_\mu)^2}$$

Dans cette partie il est envisagé d'utiliser également l'énergie du signal sur différentes bandes de fréquences. Les 10 bandes de fréquences qui sont utilisées dans la suite sont données dans la table 6.7. Le fait de sommer l'énergie sur des bandes de fréquences assez larges a en particulier pour but d'éviter l'erreur due à la discrétisation fréquentielle des signaux de houle dans les simulations.

Le calcul de l'énergie du signal sur ces bandes de fréquences se fait en calculant la transformée de Fourier discrète du signal (\bar{T}), ce qui permet de déterminer le spectre de puissance (T_{psd}), puis par intégration l'énergie sur les différentes bandes étudiées (T_e).

$$\forall k \in \left[0, \frac{N_t}{2}\right], \quad \bar{T}(f_k) = \sum_{m=0}^{N_t-1} T(t_m) \cdot e^{-i 2\pi \frac{k m}{N_t}}, \quad f_k = \frac{k}{\Delta t}$$

$$\forall k \in \left[0, \frac{N_t}{2}\right], \quad T_{psd}(f_k) = \frac{1}{2 \Delta t} \cdot |\bar{T}(f_k)|^2$$

$$\forall (i, j) \in \left[1, \frac{N_t}{2}\right]^2, \quad i < j, \quad T_e(f_i, f_j) = 2 \cdot \sum_{k=i}^{j-1} T_{psd}(f_k)$$

Table 6.21 : Bandes de fréquences pour le calcul de l'énergie des signaux temporels

Bande de fréquence	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Fréquence de début (Hz)	0,0003	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225
Fréquence de fin (Hz)	0,025	0,050	0,075	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,225	0,250

L'avantage est de potentiellement extraire davantage d'information des signaux temporels. En revanche cela conduit à l'utilisation d'un nombre de sorties plus grand, dont certaines seront a priori peu pertinentes. En effet les variations sur certaines bandes de fréquences peuvent être très faibles et être en pratique masquées par le bruit sur les mesures. Il conviendra donc éventuellement d'étudier des options pour limiter si nécessaire le nombre de sorties utilisées pour la calibration, afin en particulier de ne pas employer des sorties où l'information utile (les variations dues aux paramètres à calibrer) est dominée par l'erreur.

Ici l'erreur ajoutée sur les mesures est faible sur toutes les sorties (5% de l'écart-type des variations dues aux paramètres à calibrer), statistiques ou fréquentielles. L'information contenue dans les sorties fréquentielles est donc a priori accessible. Il apparaît dans les résultats présentés Table 6.22 que l'utilisation des sorties fréquentielles permet de diminuer davantage l'erreur sur le dommage que l'utilisation des sorties statistiques. Cependant dans les deux cas l'erreur après calibration est inférieure à l'erreur du méta-modèle.

Table 6.22 : Résultats des calibrations selon les types de sorties utilisés

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
Statistiques	3,2%	1,1%	3,9%	2,1%	1,4%	2,7%	2,3%	1,7%	3,5%
Fréquentielles	2,9%	0,6%	3,9%	1,9%	0,8%	2,7%	2,1%	0,9%	3,5%
Toutes	2,8%	0,5%	3,9%	1,8%	0,7%	2,7%	2,0%	0,7%	3,5%

Il est dans un second temps considéré que seules les mesures de tensions sont disponibles. Comme vu précédemment la quantité d'information portée par les seules grandeurs statistiques que sont la moyenne et l'écart-type des signaux de tensions au HOP et au TDP est limitée. L'intérêt d'employer les caractéristiques fréquentielles de ces signaux apparaît alors clairement dans la Table 6.23 puisque l'incertitude finale sur le dommage tombe de 10-15% à 3-4%.

Table 6.23 : Résultats des calibrations selon les types de sorties utilisés (tensions uniquement)

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
Statistiques	6,5%	11%	3,8%	9,4%	17%	2,5%	9,5%	16%	3,3%
Fréquentielles	3,4%	3,0%	3,9%	3,6%	4,2%	2,7%	4,1%	4,3%	3,5%
Toutes	4,0%	2,5%	3,9%	3,7%	3,7%	2,7%	4,1%	3,7%	3,5%

Il apparaît donc que l'utilisation des caractéristiques fréquentielles des signaux peut effectivement permettre d'améliorer le résultat des calibrations sans augmenter le nombre de mesures utilisées. En revanche il semble pertinent de sélectionner les sorties utilisées pour la calibration, de façon à ne pas employer des sorties qui soient trop redondantes. Dans l'approche présentée, où l'ensemble des sorties issues du post-traitement sont utilisées, l'estimation de l'incertitude sur le dommage après calibration est en effet apparue sous-estimée, ce qui n'était pas le cas avec les sorties de type « statistiques ».

6.11 Influence du nombre d'états de mer employés pour la calibration

L'ensemble des essais de calibration présentés jusqu'à présent utilisaient les mesures de 10 cas de chargement. Le nombre d'état de mer employés a cependant, a priori, une influence sur les performances des calibrations.

Une problématique importante concerne les éventuelles variations des valeurs « optimales » des paramètres calibrés d'un cas de chargement à l'autre. Cette problématique n'est cependant pas étudiée ici puisque les paramètres calibrés sont constants sur l'ensemble des simulations qui constituent un jeu d'observations donné, ainsi que sur les cas critiques sur lesquels le dommage est évalué. L'ambition de cette partie est donc simplement de quantifier l'intérêt d'employer un nombre plus ou moins élevé de cas de chargement.

En effet les mêmes mesures sont relevées sur les différents cas de chargement, et il y a nécessairement une certaine redondance dans l'information apportée. Dans le cas présent cependant les 10 cas de mesures sélectionnés, bien que tous pris parmi les états de mer les plus probables, représentent des régions différentes de ce sous-domaine dans l'espace des paramètres environnementaux. Il est donc attendu que leur utilisation conjointe permette une meilleure calibration des paramètres. Les résultats présentés Table 6.24, en termes de dommage directement, montrent cependant qu'une incertitude largement satisfaisante est atteinte sur le dommage en utilisant seulement 3 cas de chargement (CM1, CM2 et CM3, voir Table 6.1).

Table 6.24 : Influence du nombre de cas de chargement utilisé pour la calibration, erreur 5%

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
10 cas	3,2%	1,1%	3,9%	2,1%	1,4%	2,7%	2,3%	1,7%	3,5%
3 cas (CM 1 à 3)	3,3%	1,9%	3,9%	2,0%	2,6%	2,7%	2,4%	3,3%	3,5%
1 cas (CM 1)	3,7%	3,4%	3,9%	3,8%	6,8%	2,7%	4,8%	7,5%	3,4%

Augmenter le nombre de cas de chargement utilisés simultanément pour une calibration revient in fine à augmenter le nombre de mesures (et donc de sorties) disponibles. Il est donc attendu que l'effet soit particulièrement bénéfique dans les situations où le nombre de mesures disponibles est limité.

L'intérêt est également plus fort lorsque l'erreur aléatoire entre le modèle et les mesures est importante, comme cela peut être observé dans les résultats présentés Table 6.25, où l'erreur modèle-mesures est fixée à 25%. L'erreur sur le dommage après calibration augmente de façon importante lorsque le nombre de cas de chargement utilisés diminue. L'incertitude prédite par l'approche bayésienne tient par ailleurs bien compte de cette tendance.

Table 6.25 : Influence du nombre de cas de chargement utilisé pour la calibration, erreur 25%

	Dommage CC1			Dommage CC2			Dommage CC3		
	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.	Err.	CoV	Mdl.
A priori	22%	33%	3,7%	28%	43%	2,3%	29%	44%	2,9%
10 cas	3,1%	1,6%	3,9%	2,2%	2,0%	2,7%	2,5%	2,4%	3,5%
3 cas (CM 1 à 3)	4,6%	4,3%	3,8%	4,2%	6,6%	2,6%	5,2%	7,6%	3,4%
1 cas (CM 1)	4,9%	6,0%	3,9%	8,5%	11,6%	2,6%	9,2%	12,4%	3,3%

L'effet bénéfique de l'utilisation de plusieurs observations simultanément apparait donc clairement par rapport à une calibration réalisée sur une observation unique. Cependant plus le nombre de cas de chargement utilisés est important plus le coût de la calibration est élevé. Dans l'approche proposée en effet il est nécessaire de construire un méta-modèle pour chaque cas de chargement employé. Dans le cadre du suivi en service il reste toutefois important de considérer que la construction des méta-modèles sur les cas de chargement utilisés pour la calibration sert également à quantifier l'incertitude a posteriori sur le dommage causé par ces cas de chargement. À cet égard la diversité des cas de chargement employés doit donc primer sur leur nombre. De façon générale si un choix peut être fait sur les cas de chargement à utiliser pour la calibration des

paramètres, il semble pertinent d'utiliser différents cas de chargement qui soient représentatifs de l'ensemble des cas observés sur la période d'intérêt.

Par ailleurs, la calibration sur un seul cas de chargement pourrait s'avérer pertinente si le cas de chargement en question est un cas de chargement sévère. En effet il peut alors être intéressant de réduire l'incertitude sur le dommage de façon plus spécifique. En outre, comme mentionné plus haut, les valeurs optimales de certains paramètres sont susceptibles de différer d'un cas de chargement à un autre, et probablement de façon plus marquée entre la majorité des cas de chargement « calmes » et les quelques états de mer les plus sévères. Les coefficients de trainée hydrodynamiques par exemple dépendent, au-delà des caractéristiques géométriques et des rugosités de surface, des nombres de Reynolds et de Keulegan-Carpenter. Cette problématique n'a pas été traitée dans le cadre de ces travaux puisque les « mesures » sont fictives et proviennent de simulations où les valeurs des coefficients de trainée et de masse ajoutée en particulier sont supposées constantes, il semble cependant important d'en faire mention.

6.12 Conclusions

Il est tout d'abord apparu que les différentes méthodes présentées nécessitent toutes l'usage d'un méta-modèle. Le même jeu de données a cependant été utilisé pour construire le méta-modèle direct et le méta-modèle inverse, ce qui a permis ici de comparer les différentes méthodes à coût relativement constant. En effet dans tous les cas la construction du méta-modèle est l'étape la plus longue. Le jeu de données nécessaire peut cependant également être utilisé pour construire un méta-modèle pour l'évaluation du dommage, permettant d'évaluer l'incertitude suite à la calibration.

L'approche bayésienne est apparue nettement préférable. Par rapport à l'optimisation de l'erreur au sens des moindres carrés, cette approche permet d'évaluer l'incertitude restante sur les paramètres calibrés, d'une façon jugée satisfaisante dans la majorité des cas étudiés. L'approche par méta-modèle inverse, bien que très rapide, ne permet pas d'obtenir des résultats comparables. En particulier lorsque l'erreur modèle- mesures augmente, l'approche bayésienne permet une réduction bien plus forte de l'incertitude. L'approche bayésienne offre par ailleurs la possibilité de quantifier l'erreur entre le méta-modèle et les mesures en calibrant celle-ci comme s'il s'agissait d'un paramètre supplémentaire.

Pour la prise en compte des paramètres non calibrés, voire des incertitudes restantes suite aux mesures sur les conditions d'environnement, il est proposé d'inclure dans les jeux d'apprentissage et de validation des méta-modèles, le bruit correspondant aux variations de ces paramètres. L'erreur

NRMSE des méta-modèles tient ainsi compte de cette incertitude sans qu'il soit nécessaire de la quantifier par ailleurs. Cette approche a été testée et s'est avérée satisfaisante. La difficulté à traiter l'introduction d'une erreur non-aléatoire entre le modèle et les mesures a été appréhendée à cette occasion, la calibration des paramètres tendant dans ce cas à compenser cette erreur.

Parmi les différentes mesures utilisées, la mesure de la courbure, située à proximité du point où le dommage est suivi, s'est avérée être la plus pertinente pour diminuer l'erreur sur le dommage. Par l'absence de redondance l'utilisation de cette seule mesure pose cependant un problème pour évaluer les valeurs des paramètres. Les mesures de tensions, a priori plus faciles à mettre en œuvre, en particulier au niveau de la connexion avec le flotteur (HOP), permettent de calibrer efficacement la masse du câble mais pas ses caractéristiques hydrodynamiques dont l'influence sur le dommage est prépondérante. L'utilisation des caractéristiques fréquentielles des signaux a toutefois permis ici une calibration efficace à partir des seules mesures de tensions.

Enfin l'utilisation d'un nombre important d'états de mer s'avère intéressant pour compenser l'erreur entre le modèle et les mesures, mais représente, dans le cadre de la méthodologie envisagée, un coût en termes de nombre de méta-modèles à construire. Un choix pertinent doit à cet égard s'orienter vers des cas de chargement variés (différentes conditions de houle, de vent, de courant) afin de limiter la redondance entre les sorties. Les états de mer retenus doivent par ailleurs être représentatifs des conditions observées sur la période de temps ciblée par la calibration, puisque ces états de mer serviront également à quantifier l'incertitude restante sur le dommage.

7 Conclusions

7.1 Récapitulatif des travaux présentés

Le travail présenté dans ce manuscrit a porté sur une méthode pour le suivi en service des caractéristiques de l'ombilical dynamique d'une éolienne flottante affectées par la bio-colonisation. L'objectif est de permettre de ré-estimer la durée de vie de ce composant en diminuant l'incertitude associée, qui est initialement importante.

Le choix a été fait de travailler sur un ombilical en configuration « Steep Wave ». Cette configuration présente l'avantage de simplifier le calcul de la réponse globale de l'ombilical, puisqu'en réalisant une connexion verticale au niveau du sol la modélisation des interactions avec le sol est évitée. La problématique liée à la localisation du point de premier contact avec le sol (TDP) est également évitée. Pour autant la configuration « Steep Wave » présente une forte analogie avec la configuration « Pliant Wave », et dans une moindre mesure avec la configuration « Lazy Wave » dont l'usage est plus courant. Deux profondeurs d'eau ont été étudiées : 36m et 72m.

Dans le chapitre 2 les hypothèses prises pour le calcul de la réponse dynamique globale de l'ombilical, ainsi que pour le calcul des contraintes locales et du dommage ont été présentées. De même les hypothèses concernant la modélisation des conditions d'environnement et les statistiques environnementales du site fictif considéré y ont été détaillées. Le choix d'une paramétrisation pour modéliser les conséquences de la bio-colonisation sur les caractéristiques de l'ombilical a abouti à l'utilisation de 8 paramètres : les épaisseurs, densités et coefficients de trainée et de masse ajoutée pour le câble d'une part, et pour les modules de flottabilité d'autre part. La répartition de la bio-colonisation a ainsi été supposée uniforme, mais en opérant une distinction entre le câble et les modules, l'effet de la répartition peut tout de même être étudié dans une certaine mesure.

Le chapitre 3 présente une étude portant sur l'emploi de méta-modèles en remplacement des simulations numériques, qui sont relativement longues pour le calcul de la réponse dynamique de l'ombilical. En effet un certain nombre d'applications employées dans la suite du manuscrit bénéficient de l'usage de ces méta-modèles : les analyses de sensibilités, la calibration des paramètres et l'estimation de l'incertitude sur le dommage après calibration. Plusieurs possibilités ont été envisagées, portant d'abord sur le type de méta-modèle utilisé, puis sur le domaine de validité à considérer. Il a en particulier été envisagé de construire un méta-modèle global tenant compte des différentes conditions d'environnement, mais après comparaison de l'erreur sur les prédictions, la méthode retenue consiste à construire un méta-modèle spécifique pour chaque cas de chargement. Par ailleurs, après comparaison avec le Krigeage et les réseaux de neurones

artificiels, le choix a été fait d'utiliser dans la suite le développement sur chaos polynomial (PCE). Ce type de méta-modèle s'est avéré plus rapide à construire et à évaluer tout en permettant de disposer d'une erreur relativement faible sur les prédictions.

Dans le chapitre 4, la durée de vie de l'ombilical a été estimée pour les deux profondeurs d'eau envisagées, permettant ainsi d'identifier les états de mer les plus critiques. Une première analyse de sensibilité a été conduite sur ces états de mer, portant directement sur le dommage à la localisation jugée la plus critique le long du câble. L'incertitude associée aux paramètres d'intérêt a été estimée à environ 40% de l'espérance du dommage sur ces états de mer, avec toutefois des variations importantes d'un état de mer à l'autre. Pour déterminer la sensibilité du dommage à chaque paramètre, différentes méthodes ont été comparées. L'approche ANCOVA basée sur l'utilisation d'un méta-modèle de type PCE pour estimer les indices de Sobol a finalement été retenue et appliquée aux 3 cas critiques sélectionnés, pour chacune des 2 profondeurs d'eau considérées. Les résultats se sont avérés variables d'un cas de chargement à l'autre, mais globalement 4 paramètres sur les 8 sont apparus dominants : les épaisseurs de bio-colonisation sur le câble et sur les modules, ainsi que le coefficient de trainée du câble et le coefficient de masse ajoutée des modules.

Le chapitre 5 étudie les modes de variations de la réponse de l'ombilical sous l'effet des variations des paramètres liés à la bio-colonisation. L'analyse en composantes principales (PCA) est employée afin d'identifier ces modes, puis des analyses de sensibilité sont conduites portant cette fois sur la réponse aux premiers modes PCA, porteurs à eux seuls de l'essentiel des variations causées par les paramètres d'intérêt. Dans un premier temps l'analyse porte sur les modes PCA du dommage, puis la PCA est appliquée à l'ensemble des sorties de la simulation numérique susceptibles d'être employées pour la calibration. Dans les deux cas les 2 principaux modes identifiés apparaissent, pour l'un lié aux caractéristiques hydrostatiques de l'ombilical (masse et flottabilité), et pour l'autre aux caractéristiques hydrodynamiques (trainée et masse ajoutée). Concernant le dommage il apparaît cependant que l'importance relative de ces 2 modes varie de façon importante en fonction des conditions d'environnement (en particulier de la direction de propagation de la houle). Pour les sorties en termes de tensions, courbures et positions en revanche l'importance relative des 2 modes est relativement stable entre les différents cas de chargement étudiés.

L'application de la PCA à la réponse du câble doit en particulier permettre d'identifier des sorties pertinentes pour la calibration (et donc les mesures qui pourraient être mises en œuvre). Il semble en effet qu'un jeu de sorties permettant d'identifier les principaux modes PCA, et en particulier ceux en lien avec le dommage serait pertinent. Une difficulté qui apparaît ici est cependant que le mode

lié à l'hydrodynamique de l'ombilical n'est dominant que sur très peu de sorties : uniquement les variations de courbures hors-plan à proximité de la zone critique pour le dommage.

Dans le chapitre 6, des essais de calibration sont réalisés sur des mesures issues de simulations numériques. Une erreur artificielle a été ajoutée sous forme de bruit sur les sorties des simulations tenant lieu de mesures. L'approche de calibration bayésienne est apparue la plus adaptée parmi les différentes possibilités envisagées. Cette méthode est en effet apparue robuste par rapport à l'erreur ajoutée sur les mesures et présente l'avantage de fournir une estimation de l'incertitude sur les valeurs calibrées des paramètres. Cette estimation d'incertitude est apparue satisfaisante dans la majorité des cas considérés, et a permis d'estimer l'incertitude sur le dommage après calibration, là encore de façon satisfaisante. Partant d'une situation a priori très favorable pour la calibration, un certain nombre de cas dégradés ont été envisagés et l'approche bayésienne a tout de même généralement permis une diminution importante de l'incertitude sur le dommage liée aux paramètres caractérisant la bio-colonisation.

7.2 Recommandations

Le travail réalisé a permis de mieux appréhender la forte influence de la bio-colonisation sur l'estimation de la durée de vie des ombilicaux dynamiques pour l'éolien flottant.

En particulier deux modes de variations de la réponse de l'ombilical sont ressortis comme principales conséquences des variations des caractéristiques de l'ombilical affectées par la bio-colonisation. Le premier mode est lié à l'hydrostatique (flottabilité nette du câble) et est apparu largement dominant sur la réponse de l'ombilical en termes de tensions, courbures et positions des points du câble dans l'espace. Il semble alors relativement aisé de mesurer la réponse du câble selon ce mode en s'appuyant principalement sur la réponse moyenne de l'ombilical. Le second mode est lié à l'hydrodynamique (trainée et masse ajoutée). Ce mode n'apparaît dominant que sur la réponse en termes d'amplitude de variation de la courbure hors-plan autour de la zone identifiée comme critique pour le dommage. La mesure de la réponse de l'ombilical suivant ce mode semble donc plus problématique, bien que celui-ci puisse avoir un effet important, voire dominant, sur le dommage. Il a en effet été observé que l'importance relative sur le dommage de ces deux modes de variation de la réponse de l'ombilical varie d'un cas de chargement à l'autre.

Dans le cadre de la méthodologie de suivi en service de la durée de vie de l'ombilical, il convient donc de choisir les mesures à mettre en œuvre selon l'importance attribuée à la réponse hydrostatique d'une part et à la réponse hydrodynamique d'autre part.

La solution la plus simple serait de calibrer en priorité les paramètres liés à l'hydrostatique du câble, en acceptant de conserver une incertitude importante sur les paramètres liés aux caractéristiques hydrodynamiques. Il ressort en effet des différents essais de calibration effectués qu'une réduction conséquente de l'incertitude sur le dommage peut être obtenue sans forcément réduire l'incertitude sur les coefficients hydrodynamiques.

S'il est jugé nécessaire de réduire l'incertitude portant sur les coefficients hydrodynamiques, l'approche utilisée dans le chapitre 5 consistant à utiliser l'analyse en composantes principales pour décomposer les variations de la réponse de l'ombilical selon les modes dominants permet d'identifier les sorties sur lesquelles l'influence de l'hydrodynamique est plus importante que celle de l'hydrostatique. Cette approche doit donc permettre d'orienter le choix des mesures à mettre en œuvre.

Quantifier l'importance des sources d'incertitudes qui ne sont pas liées à la bio-colonisation (loi de passage aux contraintes locales, loi de fatigue...), et qui ne pourront sans doute pas être réduites, devrait permettre de trancher entre ces options en ciblant le niveau d'incertitude recherché après calibration.

Enfin, l'usage de méta-modèles en remplacement de la simulation numérique semble indispensable pour réaliser la calibration. Il est apparu préférable de construire un méta-modèle spécifique pour chacun des cas de chargement employé pour la calibration plutôt que de chercher à couvrir l'ensemble des cas de chargement avec un méta-modèle unique. Cette approche requiert cependant d'effectuer un nombre de simulations important à chaque fois qu'une calibration doit être réalisée au cours de la durée de vie de l'ombilical. Le jeu de données nécessaire à la construction du méta-modèle utilisé pour la calibration peut néanmoins également être employé pour construire un second méta-modèle, qui sera utilisé pour estimer l'incertitude sur le dommage après calibration.

7.3 Perspectives

La problématique des incertitudes dans le calcul de la durée de vie des ombilicaux dynamiques est très large. Le travail présenté ici s'est concentré sur la quantification et la réduction des incertitudes liées à l'évolution des caractéristiques de l'ombilical avec la bio-colonisation. D'autres sources d'incertitude doivent cependant être considérées.

En particulier pour les configurations en « lazy wave », les interactions avec le sol auront a priori un impact important. Se posent en effet des questions sur le suivi de la position du TDP dans le temps, sur l'affouillement autour du câble dans la zone à proximité du TDP et de son éventuel

enfouissement dans cette même zone. Ces problématiques sont complexes à traiter et affecteront sans doute fortement la capacité à suivre l'évolution de la bio-colonisation comme envisagé ici.

La modélisation du comportement en flexion du câble pourrait également être une source d'incertitude importante. Dans le travail présenté une modélisation linéaire du comportement en flexion du câble a été adoptée. Ce comportement sera cependant probablement assez fortement non linéaire du fait du glissement entre les composants de l'ombilical et des efforts de friction. Il s'agira donc d'évaluer l'importance de l'erreur commise en fonction des différentes modélisations plus ou moins complexes : linéaire, non-linéaire voire hystérétique.

Concernant le post-traitement, comme expliqué dans le chapitre 2 le calcul du signal temporel de la contrainte pour tous les composants de l'ombilical n'a rien d'évident. Le recours à une formulation analytique apparaît nécessaire pour post-traiter de longs signaux temporels. La simulation numérique par éléments finis doit cependant permettre de valider les formulations analytiques retenues et d'en quantifier l'erreur. Enfin la méthode de calcul et de cumul du dommage reste une source d'incertitude importante.

Un autre point important qui n'a pas été abordé concerne les moyens de mesures à mettre en œuvre.

Concernant l'environnement, il est probable que les sites pilotes soient équipés d'instruments de mesure du vent, de la houle et du courant. À l'échelle d'une ferme cependant certaines mesures pourraient être remplacées par des modèles numériques. L'erreur associée pourrait alors également affecter le suivi de la durée de vie des ombilicaux dynamiques. Pour la houle en particulier, des erreurs relativement importantes ont été observées sur le contenu spectral entre la méthode HOMERE, qui fait référence pour la simulation rétrospective des conditions de houle, et les mesures des houlomètres sur le site d'essai en mer SEM-REV (Pérignon 2017).

Concernant le mouvement du flotteur, il n'apparaît pas évident de déterminer le déphasage entre ce dernier et le signal de la houle. En effet le contenu spectral de la houle ne sera a priori pas mesuré au niveau du flotteur. Il conviendrait donc d'étudier l'influence de ce déphasage, d'étudier dans quelle mesure il pourrait être déduit de modèles numériques, et enfin de déterminer l'erreur de ces modèles.

Concernant les mesures portant sur la réponse de l'ombilical, les capteurs restent à développer. Il convient donc de profiter des projets d'essais de prototypes en mer, tels que le projet FLOATGEN, pour tester d'éventuelles solutions. En effet les essais en mer apparaissent indispensables afin

d'évaluer la résistance des capteurs dans le milieu marin, et d'adapter la méthode de suivis en service suivant la disponibilité et la précision qui peuvent être attendues des mesures.

Des essais en bassin ont été réalisés et leur analyse est en cours. De tels essais doivent permettre dans un premier temps de valider les modèles numériques utilisés dans un cadre où les mesures peuvent être réalisées plus facilement, et où les cas de chargement sont bien maîtrisés. Une difficulté importante reste cependant la mise à l'échelle des propriétés mécaniques du câble. Pour les essais réalisés en particulier, le comportement en flexion du câble testé est apparu complexe à modéliser.

La poursuite des travaux de recherche entamés au cours de la thèse est assurée au sein de l'École Centrale de Nantes et de l'Université de Nantes grâce aux projets OMDYN-2 et MHM-EMR. Le projet OMDYN-2 porte sur les ombilicaux dynamiques et dispose d'un lot consacré à la méthodologie de suivi en service qui s'appuiera sur les conclusions de ce manuscrit. Le projet vise également de manière plus générale à étudier les problématiques liées au couplage électro-thermo-mécanique, et en particulier l'incidence sur la fatigue des conducteurs et des isolants. Une thèse a démarré à l'École Centrale de Nantes qui porte sur la modélisation de la cross-section du câble, et une autre à l'Université de Nantes qui porte sur le suivi de la bio-colonisation. Le projet MHM-EMR s'intéresse de son côté au suivi en service des lignes d'ancrages pour les systèmes EMR. La problématique étudiée est similaire. Des mécanismes de fatigue spécifiques sont cependant à envisager, en particulier pour les lignes en fibres synthétiques (Nylon, polyester...). Une thèse sur ce sujet est en cours à l'École Centrale de Nantes.

Références

Ameryoun, H., & Schoefs, F. (2013, June). Probabilistic Modeling of Roughness Effects Caused by Bio-Colonization on Hydrodynamic Coefficients: A Sensitivity Study for Jacket-Platforms in Gulf of Guinea. In *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

API, (1998). Specification for Subsea Umbilicals. *Specification, API Spec. 17E*.

Arnal, V., Soulard, T., Berhault, C. (2016). Étude de sensibilité aux chargements hydrodynamiques et aérodynamiques pour les éoliennes offshore flottantes, dans des conditions extrêmes. 15e Journées de l'Hydrodynamique. 22, 23 et 24 novembre 2016, Brest.

Babarit, A., & Delhommeau, G. (2015, September). Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH. In *11th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC2015)*.

Baudin, M., Dutfoy, A., Iooss, B., & Popelin, A. L. (2016). OpenTURNS: An Industrial Software for Uncertainty Quantification in Simulation. *Handbook of Uncertainty Quantification*, 1-38.

Caniou, Y. (2012). *Analyse de sensibilité globale pour les modèles de simulation imbriqués et multiéchelles* (Doctoral dissertation, Clermont-Ferrand 2).

Cardou, A. (2006). Taut helical strand bending stiffness. URL www.utfscience.de.

Chollet, F. (2015). Keras. URL <https://keras.io/>.

Cui, W. (2002). A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures. *Journal of marine science and technology*, 7(1), 43-56.

de Pina, A. C., de Pina, A. A., Albrecht, C. H., de Lima, B. S. L. P., & Jacob, B. P. (2013). ANN-based surrogate models for the analysis of mooring lines and risers. *Applied Ocean Research*, 41, 76-86.

DNV, (2005). Fatigue design of offshore steel structures. . *Recommended Practice, DNV-RP-C203*.

DNV, (2005). Riser fatigue. *Recommended Practice, DNV-RP-F204*.

DNV, (2010). Environmental conditions and environmental loads. *Recommended Practice, DNV-RP-C205*.

Elosta, H., Huang, S., & Incecik, A. (2013). Dynamic response of steel catenary riser using a seabed interaction under random loads. *Ocean Engineering*, 69, 34-43.

Guignier, L., Courbois, A., Mariani, R., & Choynet, T. (2016, June). Multibody Modelling of Floating Offshore Wind Turbine Foundation for Global Loads Analysis. In *The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference*. International Society of Offshore and Polar Engineers.

Hastings, W. K. (1970). Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications. *Biometrika*, vol. 57, n° 1, 97-109.

Horn, J. T. H., Krokstad, J. R., & Amdahl, J. (2017, June). Joint probability distribution of environmental conditions for design of offshore wind turbines. In *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

Jiao, G., & Moan, T. (1990). Probabilistic analysis of fatigue due to Gaussian load processes. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 5(2), 76-83.

Jones, D. R., Schonlau, M., & Welch W. J. (1998). Global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global Optimization*, 13 (4), 455-492.

Karlsen, S. (2010, June). Fatigue of copper conductors for dynamic subsea power cables. In *ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering (Vol. 7)*.

Kleijnen, J. P. (2009). Kriging metamodeling in simulation: A review. *European journal of operational research*, 192(3), 707-716.

Le Crom, I., Perignon, Y., Saulnier, J. B., & Berhault, C. (2013, June). Extreme sea conditions in shallow water: estimations based on in-situ measurements. In *ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

LeCun, Y. (1985). Une procédure d'apprentissage pour réseau a seuil asymmetrique (a learning scheme for asymmetric threshold networks). In *Proceedings of Cognitiva 85, Paris, France*.

Low, Y. M., & Cheung, S. H. (2012). On the long-term fatigue assessment of mooring and riser systems. *Ocean Engineering*, 53, 60-71.

Macleod, A. K., Stanley, M. S., Day, J. G., & Cook, E. J. (2016). Biofouling community composition across a range of environmental conditions and geographical locations suitable for floating marine renewable energy generation. *Biofouling*, 32(3), 261-276.

Mallat, C., Corbett, A., Harris, G., & Lefranc, M. (2014, June). Marine growth on north sea fixed steel platforms – Insights from the decommissioning industry. In *ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

Manson, S. S., & Hirschberg, M. H. (1964) Fatigue: an interdisciplinary approach. *Syracuse University Press*, Syracuse, 133.

Martinez, J. M. (2011). Analyse de sensibilité globale par décomposition de la variance. *Presentation in "Journée des GdR Ondes & Mascot, (13)*.

Nasution, F. P., Sævik, S., & Gjøsteen, J. K. (2014). Finite element analysis of the fatigue strength of copper power conductors exposed to tension and bending loads. *International Journal of Fatigue*, 59, 114-128.

NORSOK, (2007). Actions and action effects. *NORSOK Standard N-003*.

Orcina Ltd. (2012). URL <https://www.orcina.com/SoftwareProducts/OrcaFlex/Documentation/>.

Papailiou, K. O. (1997). On the bending stiffness of transmission line conductors. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 12(4), 1576-1588.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Vanderplas, J. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(Oct), 2825-2830.

Perignon, Y. (2017). Assessing accuracy in the estimation of spectral content in wave energy resource on the French Atlantic test site SEMREV. *Renewable Energy*, 114, 145-153.

Powell, M. J. D. (1994). A direct search optimization method that models the objective and constraint functions by linear interpolation. *Advances in Optimization and Numerical Analysis*, eds. S. Gomez and J-P Hennart, Kluwer Academic (Dordrecht), 51-67.

Quéau, L. M., Kimiaei, M., & Randolph, M. F. (2014). Artificial neural network development for stress analysis of steel catenary risers: sensitivity study and approximation of static stress range. *Applied Ocean Research*, 48, 148-161.

Raof, M., & Kraincanic, I. (1995). Simple derivation of the stiffness matrix for axial/torsional coupling of spiral strands. *Computers & structures*, 55(4), 589-600.

Saltelli, A., Annoni, P., Azzini, I., Campolongo, F., Ratto, M., & Tarantola, S. (2010). Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications*, 181(2), 259-270.

Sidarta, D. E., Kyoung, J., O'Sullivan, J., & Lambrakos, K. F. (2017, June). Prediction of Offshore Platform Mooring Line Tensions Using Artificial Neural Network. In *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

Sobol, I. M. (1993). Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modelling and Computational Experiments*, 1(4), 407-414.

Spraul, C., Berhault, C., & Cartraud, P. (2016). Construction d'un modèle simplifié applicable au suivi en service de la durée de vie des ombilicaux dynamiques en faible profondeur d'eau. *15èmes Journées de l'Hydrodynamique, Brest*.

Spraul, C., Arnal, V., Cartraud, P., & Berhault, C. (2017, June). Parameter Calibration in Dynamic Simulations of Power Cables in Shallow Water to Improve Fatigue Damage Estimation. In *ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

Spraul, C., Pham, H., Arnal, V., & Reynaud, M. (2017, August). Effect of Marine Growth on Floating Wind Turbines Mooring Lines Responses. In *AFM 2017 23ème Congrès Français de Mécanique*.

Sudret, B. (2008). Global sensitivity analysis using polynomial chaos expansions. *Reliability Engineering & System Safety*, 93(7), 964-979.

Thies, P. R., Johanning, L., & Smith, G. H. (2012). Assessing mechanical loading regimes and fatigue life of marine power cables in marine energy applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 226(1), 18-32.

Yang, S. H., Ringsberg, J. W., & Johnson, E. (2016). Parametric study of the dynamic motions and mechanical characteristics of power cables for wave energy converters. *Journal of Marine Science and Technology*, 1-20.

Yang, S. H., Ringsberg, J. W., Johnson, E., & Hu, Z. (2017). Biofouling on mooring lines and power cables used in wave energy converter systems—Analysis of fatigue life and energy performance. *Applied Ocean Research*, 65, 166-177.

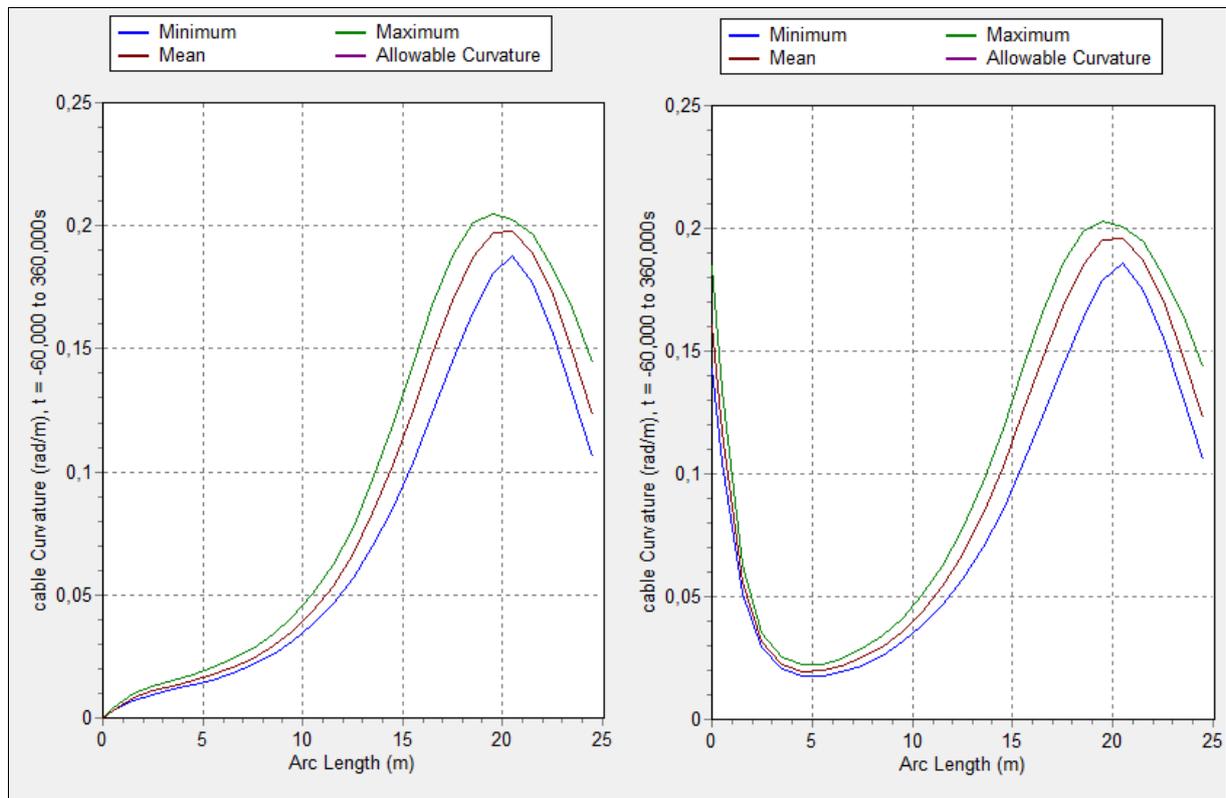
Wang, A., Huang, S., & Barltrop, N. (2014, June). Long term extreme analysis of FPSO mooring systems based on Kriging metamodel. In *ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*.

Annexes

A. Sensibilité de la réponse de l'ombilical aux conditions imposées au niveau du HOP

Le choix de la condition imposée au niveau du HOP n'est pas anodin. Il s'agit en effet d'une zone critique où doit se faire la transition entre un câble relativement souple en flexion et la structure du flotteur comparativement très rigide. Le design des pièces de connexion n'a pas été abordé dans le cadre de la thèse. Ces pièces (J-tube, flex-joint, bend-stiffener...) n'ont donc pas été intégrées dans les configurations étudiées.

La liaison entre le câble et le flotteur a été modélisée comme un encastrement, mais l'angle d'inclinaison du câble au départ du flotteur n'a pas été optimisé. Normalement cet angle doit être choisi de façon à limiter les courbures maximales au niveau de la jonction en fonction des états de mer susceptibles d'être rencontrés. Dans les configurations étudiées, lorsque le flotteur est dans sa position nominale, le câble part simplement à la verticale vers le fond. Il en résulte que la courbure moyenne au niveau du HOP est importante.



Courbure le long de l'ombilical suivant le type de liaison imposée au niveau du HOP : rotule (à gauche) ou encastrement (à droite). Simulations réalisées pour $H_s = 4,5\text{m}$; $T_p = 12\text{s}$; $D_m = 0^\circ$; $U_w = 0\text{m/s}$; $D_w = 0^\circ$; $U_c = 0\text{m/s}$; $D_c = 0^\circ$; $H = 0\text{m}$.

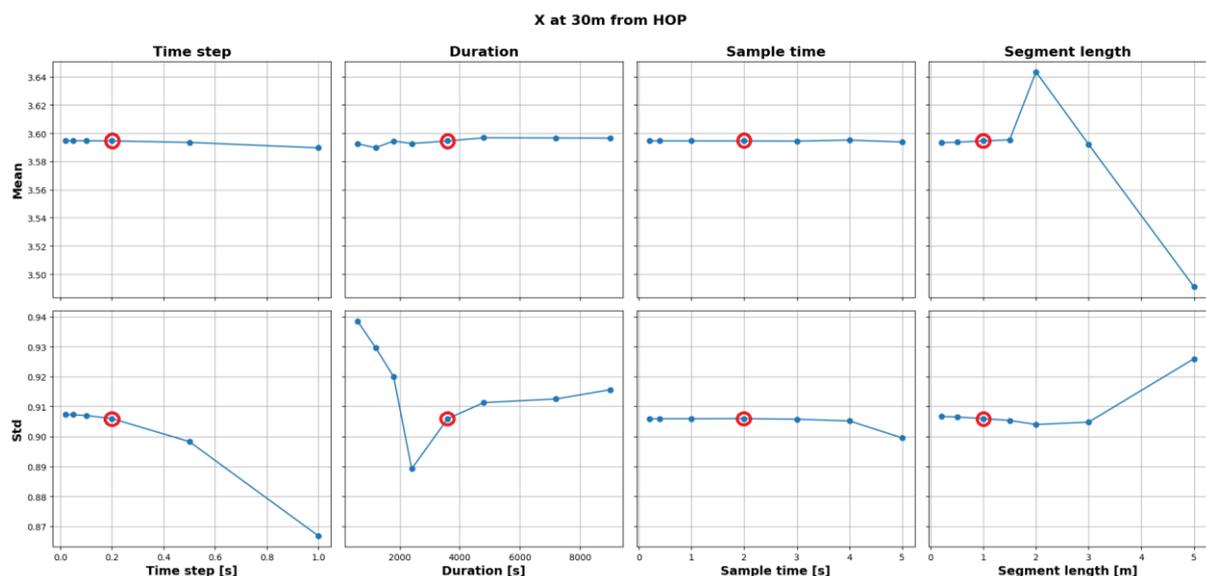
Afin d'appréhender l'influence de ce choix sur la réponse de l'ombilical, le cas où la liaison entre le câble et le flotteur est modélisée par une rotule (rotations libres) a également été simulé. La réponse de l'ombilical suivant les deux modélisations a été comparée pour un état de mer relativement sévère ($H_s = 4,5\text{m}$ et $T_p = 12\text{s}$). La figure ci-dessous montre les valeurs extrêmes et moyennes de la courbure obtenues sur une durée d'1 h pour les 25 premiers mètres de câble mesurés à partir du HOP.

L'influence de la condition imposée au niveau du HOP (encastrement ou rotule) est importante entre 0m et 5m du HOP. À plus de 5m du HOP, la différence entre les deux options est relativement faible.

Le choix a donc été fait de retenir l'encastrement avec inclinaison verticale, et de ne pas s'intéresser à la réponse de l'ombilical dans les 5 premiers mètres. La zone ainsi ignorée est cependant censée être protégée par un raidisseur en flexion ou d'autres types d'équipements.

B. Étude de convergence

Une étude de convergence a été réalisée afin de déterminer la discrétisation à adopter pour le câble, le pas de temps d'intégration numérique (schéma implicite), la durée totale simulée et le pas de temps d'échantillonnage.

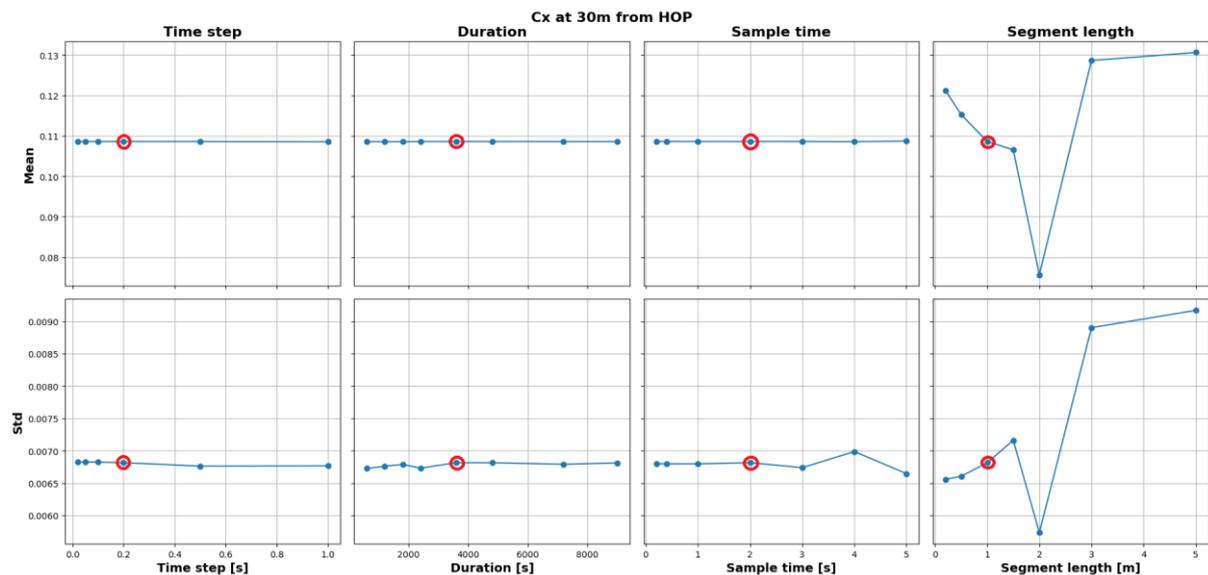


Pour illustrer les résultats de cette analyse de convergence 4 sorties sont observées : les moyennes et écarts-types des signaux temporels de la position du câble selon l'axe X du repère global à 30m du HOP d'une part, et de la courbure dans le plan également à 30m du HOP d'autre

part. Les paramètres étudiés ont été variés un à un, indépendamment, de part et d'autre des valeurs finalement retenues.

Pour le pas de temps d'intégration, la valeur de 0,2s semble permettre une précision satisfaisante et offre un gain de temps important par rapport à un pas de temps de 0,1s. Augmenter davantage le pas de temps impacterait cependant la précision des résultats en termes d'écart-type de la position en X.

De même la durée simulée a été fixée à 3600s car augmenter cette durée augmente la durée des simulations, mais la diminuer pose problème pour l'estimation des écart-types des signaux temporels.



Le pas de temps d'échantillonnage est fixé à 2s. Réduire ce pas de temps augmente la quantité de données à stocker en sorties des simulations. L'augmenter pose en particulier problème pour l'analyse fréquentielle des signaux.

Enfin une discrétisation spatiale trop fine n'est pas pertinente car les propriétés de chaque module de flottabilité sont concentrées et appliquées sur un seul nœud. Réduire la longueur des segments en dessous de la longueur des modules fait donc apparaître des pics aux emplacements des modules. Une discrétisation en segments de 1m de long donc a été adoptée car elle procure un gain de temps conséquent par rapport à la discrétisation en segments de 0,5m. Il doit cependant être remarqué qu'au niveau des modules un léger écart en courbure est observé. Néanmoins le comportement en flexion à proximité des modules n'est probablement pas correctement modélisé, quelle que soit la discrétisation spatiale retenue.

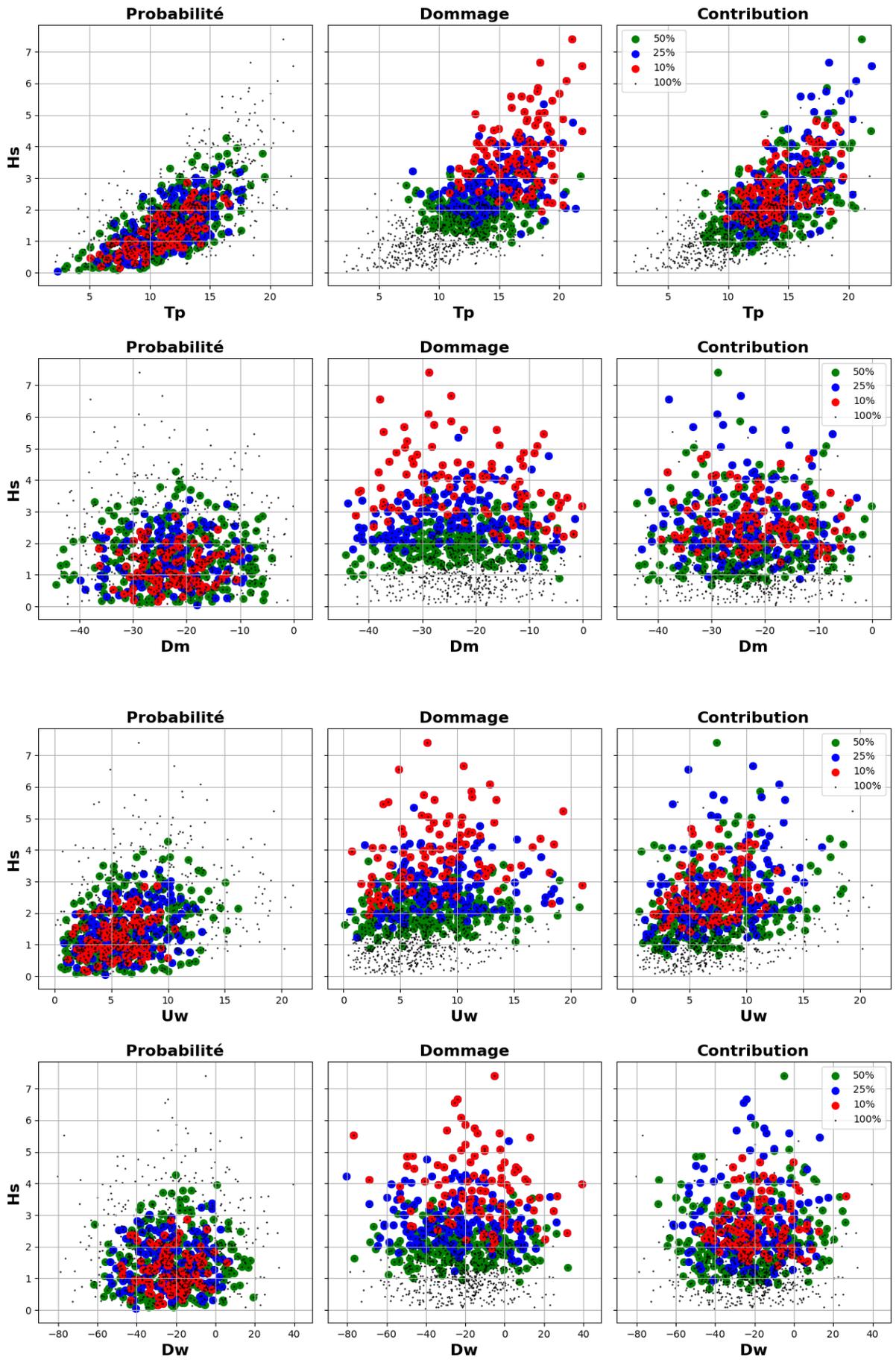
C. Analyse de la contribution des différents cas de chargement au dommage moyen

Un plan d'expérience de 1000 cas de chargement, chacun défini par ses coordonnées dans l'espace des paramètres environnementaux (H_s , T_p , D_m , U_w , D_w , U_c , D_c , H), a été obtenu en réalisant un tirage aléatoire selon la loi de probabilité définie pour ces huit paramètres. Le dommage causé sur une durée d'une heure a été calculé pour chacun des cas de chargement, ce qui a permis dans un premier temps d'estimer l'espérance du dommage sur le long terme et de déterminer le point le plus critique le long du câble vis-à-vis de la fatigue. Ce jeu de données a également été employé pour identifier la région contribuant le plus fortement au dommage sur le long terme, en repérant notamment les 100 cas de chargement (10%) dont la contribution (probabilité d'occurrence multipliée par le dommage causé) est la plus forte.

Il est ici proposé d'étendre l'analyse de ce jeu de données en observant la répartition des 10%, 25% et 50% des points les plus probables d'une part, causant le plus de dommage d'autre part, et enfin de ceux contribuant le plus à l'espérance du dommage sur le long terme. Ceci permet en outre de visualiser les zones contribuant le moins au dommage.

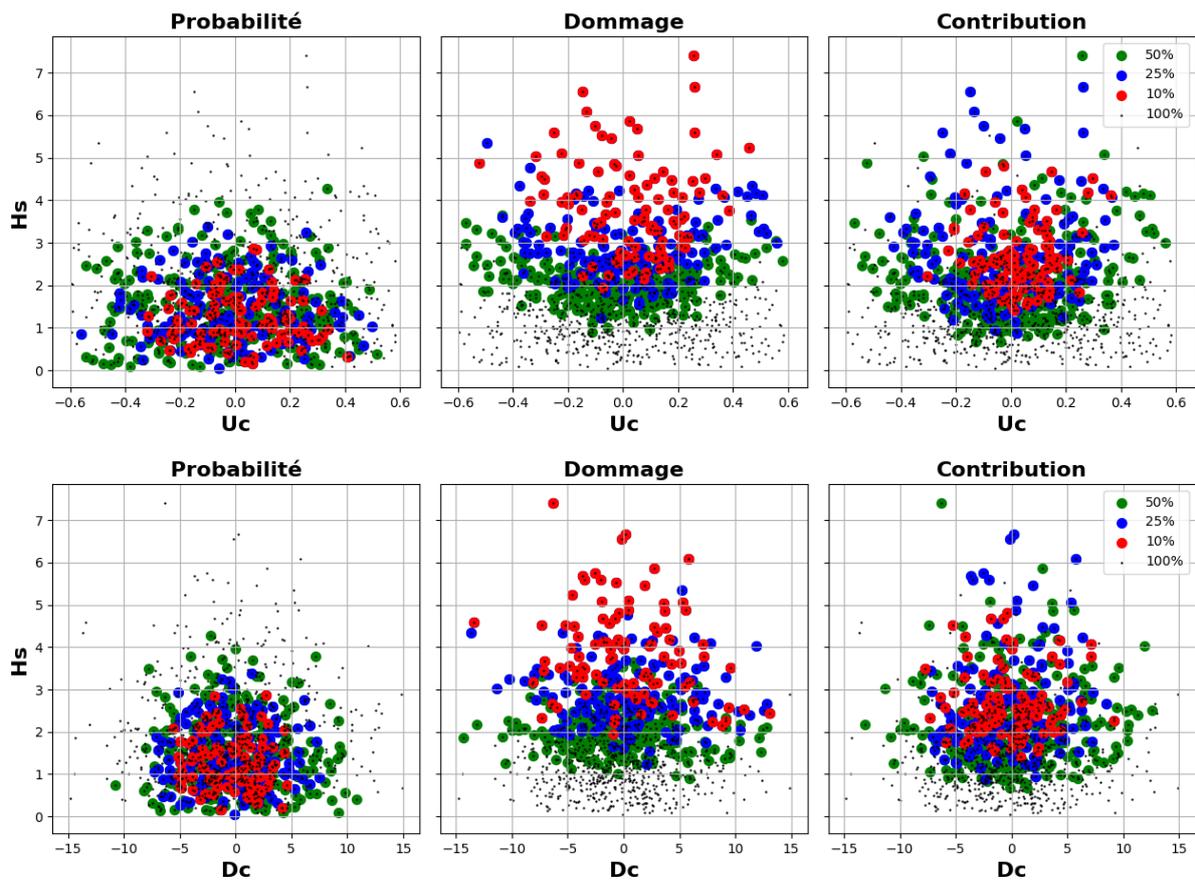
La répartition des points selon leur probabilité d'occurrence fournit simplement un rappel de la distribution de probabilité qui a été supposée pour les conditions d'environnement. L'intérêt se situe donc davantage dans la répartition des points selon le dommage qu'ils causent, ce qui permet d'observer l'influence de chaque paramètre sur le dommage, et selon leur contribution, ce qui permet d'identifier les régions les plus critiques.

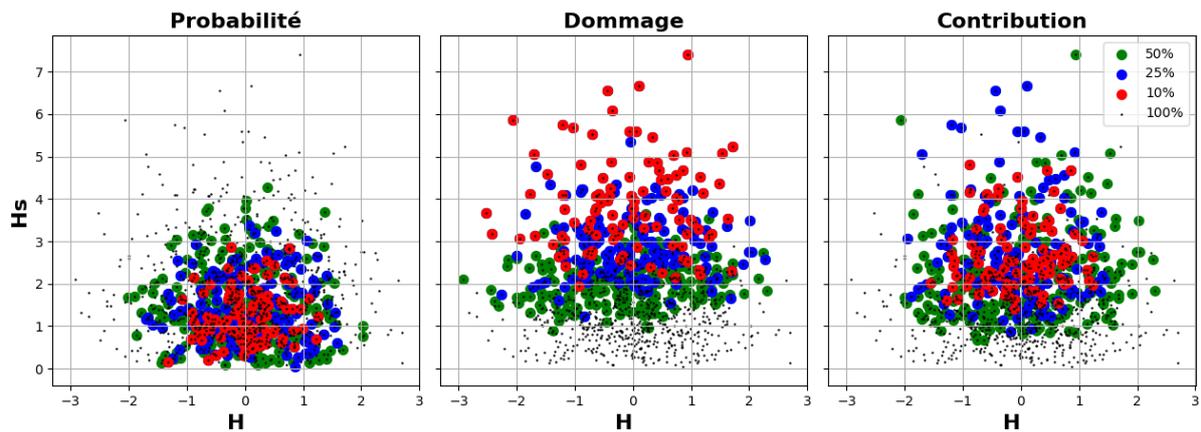
Chacune des figures qui suivent présente ces différentes répartitions en projection sur un plan spécifique. La hauteur significative de la houle étant de loin le paramètre le plus influent, les plans qu'il est proposé d'observer sont les plans (H_s , X) où X est l'un des 7 autres paramètres environnementaux.



Un plan particulièrement intéressant à observer est le plan (Hs, Uc). En effet il apparait clairement que lorsque l'intensité du courant est importante (quelle qu'en soit le sens), le dommage est moindre à hauteur de houle constante. Cela s'explique par le fait que le plan dans lequel le câble est déployé est orthogonal à la direction principale du courant. Celui-ci a donc pour effet d'éloigner la partie centrale de l'ombilical de son plan, augmentant ainsi la tension et diminuant les valeurs extrêmes de courbure. La probabilité d'occurrence étant ici plus importante pour les faibles intensités de courant, ceci a pour effet de concentrer les points à forte contribution sur une zone plus réduite.

Avec la direction de propagation de la houle (Dm), l'effet opposé est observé. Le dommage est plus important pour les valeurs situées aux extrémités de la distribution de probabilité (0° et -45°). Ces directions de propagation ayant de plus faibles probabilité d'occurrence, la contribution semble au final dépendre assez peu de ce paramètre. Il est cependant également intéressant de remarquer que le gradient du dommage semble varier avec la direction de propagation de la houle. Les variations de Hs semblent en effet avoir davantage d'influence autour de 0° que de -45°.

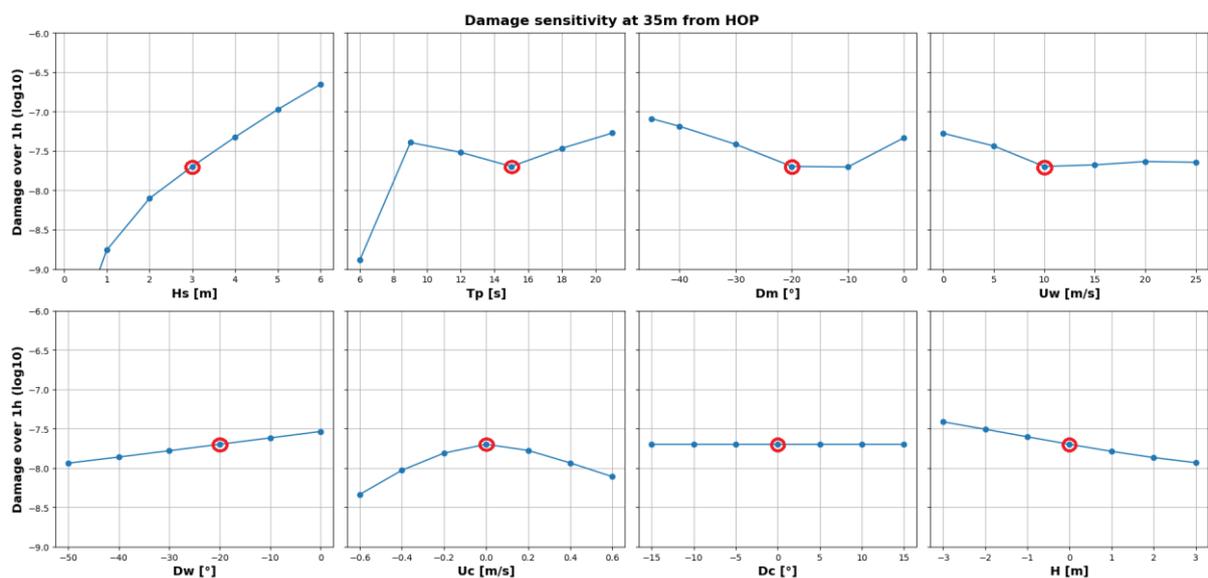




L'influence des autres paramètres sur le dommage apparaît est plus difficile à observer sur ces figures.

D. Analyse de sensibilité sur les paramètres environnementaux

L'analyse de sensibilité locale conduite ici confirme les observations précédentes. Le point de référence est repéré par les marqueurs rouges. Le paramètre H_s apparaît bien comme très dominant, un maximum local est observé pour $U_c=0\text{m/s}$, et un minimum local entre $D_m=-20^\circ$ et $D_m=-10^\circ$.



Il apparaît en outre que le niveau de marée H a une influence relativement linéaire sur le dommage qui est plus faible lorsque la mer est haute. En effet lorsque la mer est haute l'ombilical est plus tendu et les courbures maximales diminuent.

De même le dommage est moindre lorsque la direction du vent (D_w) tend à pousser le flotteur de l'éolienne à l'opposé du point d'ancrage de l'ombilical. À nouveau cela s'explique par une diminution de la courbure maximale.

Une analyse de sensibilité globale a également été conduite dans le cadre d'un article de conférence (Spraul et al. 2017, Juin) sur une configuration très similaire. La figure ci-dessous en présente les résultats. Il s'agit des indices de Sobol d'ordre total qui ont été calculés pour chaque paramètres avec un méta-modèle de type PCE.

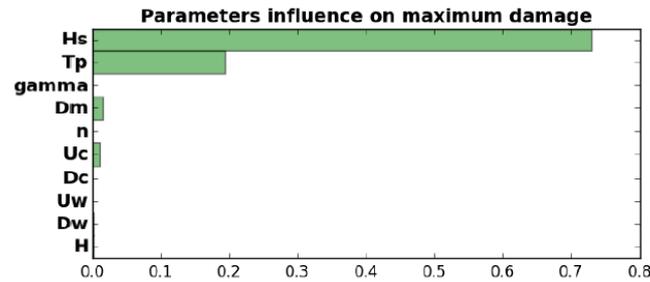


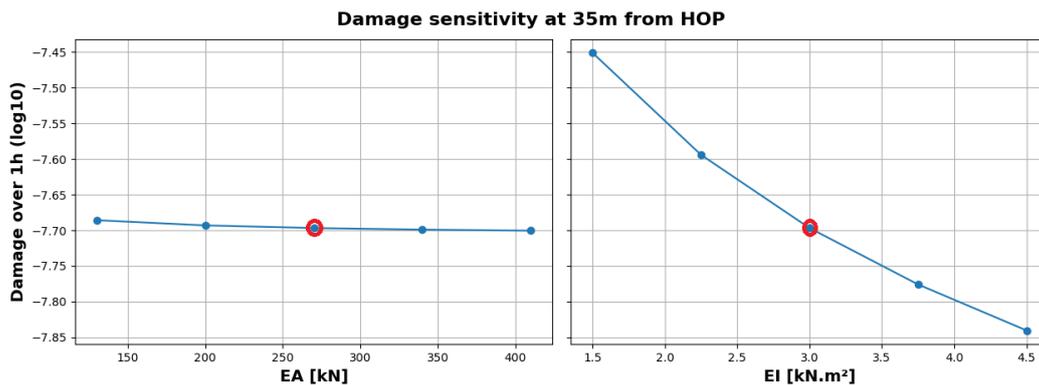
Figure 7: Total order Sobol indices of environment parameters with respect to maximum damage

La très forte dominance des paramètres définissant le spectre de houle apparait de façon évidente.

E. Analyse de sensibilité sur les paramètres structurels

Les paramètres régissant les caractéristiques structurelles de l'ombilical n'ont pas été étudiés dans le cadre de ce manuscrit.

Une rapide analyse de sensibilité locale est donc présentée ici afin de quantifier l'influence de la raideur axiale (EA) d'une part et de la raideur en flexion (EI) d'autre part.



La raideur axiale est variée sur un intervalle très large pourtant son influence apparait limitée. En effet l'ombilical peut être considéré comme très raide, la déformation axiale est donc faible et la tension dépend très peu de la raideur.

L'effet de la raideur en flexion, sur une plage de variation relativement proche en proportion, apparait nettement plus important. Quantifier l'amplitude des variations de raideur en flexion qui peuvent être attendue n'est cependant pas aisé. A priori lorsque l'ombilical est installé, des essais doivent avoir permis d'identifier la valeur de ce paramètre, qui ne doit pas varier par la suite sans détérioration du câble. Toutefois il n'est pas nécessairement pertinent de modéliser le comportement en flexion du câble de manière complètement linéaire. En effet, du fait de la friction et des glissements entre les composants internes, le comportement du câble est a priori hystérétique. Il apparait donc important de quantifier l'erreur commise lorsqu'un modèle linéaire est employé.

Thèse de Doctorat

Charles SPRAUL

Titre : Suivi en service de la durée de vie des ombilicaux dynamiques pour l'éolien flottant

Title of thesis: Fatigue monitoring of dynamic power cables for floating wind turbines

Résumé

Le travail présenté vise à mettre en place une méthodologie pour le suivi en service de la fatigue mécanique pour l'ombilical dynamique d'un système EMR flottant. L'approche envisagée consiste à simuler à l'aide d'outils numériques la réponse de l'ombilical aux cas de chargement observés sur site. Le post-traitement des résultats de ces simulations devant permettre d'accéder à différentes quantités d'intérêt en tout point du câble. Pour quantifier et réduire l'incertitude sur la réponse calculée de l'ombilical ce dernier doit être instrumenté. Un certain nombre de paramètres du modèle numérique feront alors l'objet d'une calibration régulière pour suivre l'évolution des caractéristiques de l'ombilical susceptibles d'évoluer.

Dans ce contexte ce manuscrit présente et compare différentes méthodes pour analyser la sensibilité de la réponse de l'ombilical aux paramètres susceptibles d'être suivis. L'objectif est notamment d'orienter le choix des mesures à mettre en œuvre. L'analyse en composantes principales permet pour cela d'identifier les principaux modes de variation de la réponse de l'ombilical en réponse aux variations des paramètres étudiés. Différentes approches sont également envisagées pour la calibration des paramètres suivis, avec en particulier le souci de quantifier l'incertitude restante sur le dommage. Les méthodes envisagées sont coûteuses en nombre d'évaluations du modèle numérique et ce dernier est relativement long à évaluer. L'emploi de méta-modèles en substitution des simulations numériques apparaît donc nécessaire, et là encore différentes options sont considérées. La méthodologie proposée est appliquée à une configuration simplifiée d'ombilical dans des conditions inspirées du projet FLOATGEN.

Mots clés

Fatigue, Ombilical dynamique, Éolien flottant, Incertitudes, Calibration, Méta-modèle

Abstract

The present work introduces a methodology to monitor fatigue damage of the dynamic power cable of a floating wind turbine. The suggested approach consists in using numerical simulations to compute the power cable response at the sea states observed on site. The quantities of interest are then obtained in any location along the cable length through the post-treatment of the simulations results. The cable has to be instrumented to quantify and to reduce the uncertainties on the calculated response of the power cable. Indeed some parameters of the numerical model should be calibrated on a regular basis in order to monitor the evolution of the cable properties that might change over time.

In this context, this manuscript describes and compares various approaches to analyze the sensitivity of the power cable response to the variations of the parameters to be monitored. The purpose is to provide guidance in the choice of the instrumentation for the cable. Principal components analysis allows identifying the main modes of power cable response variations when the studied parameters are varied. Various methods are also assessed for the calibration of the monitored cable parameters. Special care is given to the quantification of the remaining uncertainty on the fatigue damage. The considered approaches are expensive to apply as they require a large number of model evaluations and as the numerical simulations durations are quite long. Surrogate models are thus employed to replace the numerical model and again different options are considered. The proposed methodology is applied to a simplified configuration which is inspired by the FLOATGEN project.

Key Words

Fatigue, Dynamic power cable, Floating wind turbines, Reliability, Calibration, Surrogate modelling