

Simulation de trajectoires complexes à l'aide d'un hexapode de mouvement : application aux sports de glisse

Kévin Lestrade

▶ **To cite this version:**

Kévin Lestrade. Simulation de trajectoires complexes à l'aide d'un hexapode de mouvement : application aux sports de glisse. Automatique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2016. Français. NNT : 2016ENAM0037 . tel-01511055

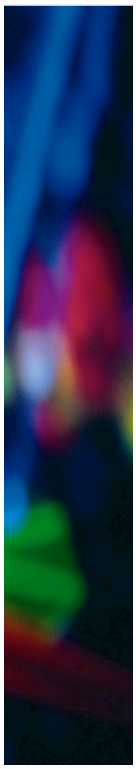
HAL Id: tel-01511055
https://pastel.hal.science/tel-01511055

Submitted on 20 Apr 2017

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.

2016-ENAM-0037



École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'ingénieur

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité " Informatique temps-réel, robotique et automatique "

présentée et soutenue publiquement par

Kévin LESTRADE

le 21 Septembre 2016

Simulation de trajectoires complexes à l'aide d'un hexapode de mouvement - Application aux sports de glisse -

Directeur de thèse : **Philippe VIOT**
Co-encadrement de la thèse : **Sandra GUERARD, Patrick LANUSSE**

Jury

M. Michel BASSET, Professeur des universités, MIPS, Université de Haute Alsace	Président du Jury
M. François PIERROT, Directeur de recherche, LIRMM CNRS, Université de Montpellier	Rapporteur
M. Eric MARKIEWICZ, Professeur des universités, LAMIH, UVHC	Rapporteur
M. Floren COLLOUD, Maitre de conférences, Institut PPrime, Université de Poitiers	Examinateur
M. Jérémy LEGARDEUR, Professeur, IMS, ESTIA	Examinateur
M. Philippe VIOT, Professeur des universités, I2M, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
Mme Sandra GUERARD, Maitre de conférences, I2M, Arts et Métiers ParisTech	Examinateur
M. Patrick LANUSSE, Maitre de conférences, IMS, Bordeaux INP	Examinateur
M. Philippe ROUCHE, Professeur, LBM, Arts et Métiers ParisTech	Invité
M. Peyo LIZARAZU, Directeur de l'innovation, Quiksilver	Invité

T H È S E

Arts et Métiers ParisTech - Campus de Bordeaux - Talence
Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) - Département DuMAS

For a surfer, it's never-ending.
There's always some wave you want to surf.

Kelly Slater

REMERCIEMENTS

Une thèse de doctorat, c'est un peu comme le déferlement d'une vague dans l'océan. Imprévisible au départ, au large de l'océan, la houle peut parfois être hésitante pour finalement suivre une trajectoire bien définie en arrivant sur les côtes. Lorsque cette houle rencontre un banc de sable exceptionnel, c'est alors que la magie de l'océan s'opère et que des vagues parfaites peuvent dérouler en harmonie. Sans ce banc de sable, la houle ne deviendra qu'un mur d'écume se brisant sur les plages. Avec ce banc de sable, les plus belles vagues du monde peuvent se dessiner et satisfaire la quête de chaque surfeur de ce monde.

Avec un peu de recul sur mon travail de thèse, je considère avoir été en quelque sorte, au démarrage du projet, comme la houle au large de l'océan. Je tiens ainsi à remercier chaleureusement le banc de sable qui a su me guider pendant mes trois années de travail et faire de ce projet de thèse une très belle vague. Un grand merci donc à mon directeur de thèse Philippe VIOT, pour m'avoir guidé spirituellement et professionnellement et pour avoir montré un dynamisme permanent dans un projet transversal original mêlant la science et la glisse. Je remercie également Sandra GUERARD et Patrick LANUSSE pour la qualité de leur encadrement, leur disponibilité à toute épreuve, la pertinence de leur réflexion scientifique et leur sens de la pédagogie. Ils m'ont appris énormément sur leurs domaines respectifs et sur la manière de mener des travaux de recherche.
Je tiens également à exprimer mes plus vifs remerciements aux membres de mon jury : Mr Michel BASSET qui m'a fait l'honneur de présider ce jury, Mr François PIERROT et Mr Eric MARKIEWICZ qui ont rapporté ces travaux de thèse avec beaucoup d'attention et de rigueur, Mr Floren COLLOUD, Mr Jérémy LEGARDEUR et Mr Philippe ROUCH qui m'ont apporté chacun leur vision quant aux possibilités d'exploitation et de mise en avant des travaux de recherche et Mr Peyo LIZARAZU qui m'a apporté son expérience critique de surfeur haut-niveau ainsi que sa vision de l'innovation dans le domaine de la glisse.

Ce projet a été mené en collaboration entre deux équipes de recherche, le département DuMAS de l'I2M et l'équipe CRONE de l'IMS et mes remerciements vont également à l'ensemble des membres respectifs de ces équipes qui ont su être à l'écoute et qui m'ont apporté des solutions à chaque écueil rencontré.

J'évoquais la houle et le banc de sable nécessaire au déferlement d'une vague sur la côte, un troisième élément est également indispensable pour avoir des conditions de glisse et de surf parfaites. Il s'agit de la « passe », ce fameux chenal tant recherché par les surfeurs car étant d'une grande aide pour atteindre la zone de déferlement de la vague. J'ai ainsi eu la chance de bénéficier ces dernières années de l'aide et du soutien de plusieurs personnes que je tiens tout particulièrement à remercier. Je remercie donc chaleureusement Jean-Luc BAROU pour tout son dévouement professionnel et humain et pour avoir été présent dans les moments

difficiles, ainsi que Jonathan MERZEAU et Christophe LEMAIRE pour leur savoir-faire expérimental, leurs précieux conseils et leur passion autour de mon projet de thèse.

Sur le plan humain, ces trois dernières années m'ont également apporté un lot de rencontres, d'expériences et de découvertes que je ne suis pas près d'oublier. L'histoire retiendra un réveil sous les palmiers, des victoires sportives et des valeurs de fair-play partagés avec des collègues devenus des amis. Nicolas, Tony, Héloïse, Didier, Christophe, Jérémie B, Jean-Luc, Jérémie G. et Jean-Benoît, merci de m'avoir supporté, de vous être intéressés à ma passion et de m'avoir donné le sourire à chaque moment passé ensemble. Une liste exhaustive de toutes les personnes que j'aimerais citer dans ces remerciements n'est pas possible mais je veux qu'elles sachent qu'elles ont toutes une place particulière dans mon esprit.

J'aimerais conclure en remerciant mes parents ainsi que mon grand frère et ma grande sœur pour leur soutien inconditionnel, leur confiance et leur patience. C'est grâce à leur présence que tout m'a toujours semblé possible, tant sur le plan professionnel que sur le plan humain.

Enfin, un grand merci à toi Jude, qui me permet de vivre tous les jours mon rêve d'été éternel, « the endless summer ». Tu es ma muse et je te dédie ce manuscrit, tu m'as accompagné et soutenu dans une large majorité de mes travaux, il y a donc un peu de toi au travers de chacune de ces pages.

Merci à tous,

TABLE DES MATIERES

Table des figures 2
Introduction générale 6

Chapitre I : État de l'art

1. La science et le surf 14
1.1 Historique et contexte 14
1.2 Méthodologies utilisées pour l'analyse du surf 15
1.2.1 La vague : un environnement instable et imprévisible 16
1.2.2 Le surfeur : un sujet instable et imprévisible 17

2. Analyse de l'architecture matérielle d'un simulateur 19
2.1 Modélisation des systèmes de restitution de mouvement 19
2.1.1 Modélisation géométrique 19
2.1.2 Espace de travail 23
2.2 Perception de mouvement 24
2.2.1 Sensation vestibulaire et visuelle 24
2.2.2 Stratégies de commande pour la restitution inertielle 26
2.2.3 Stratégie classique 27
2.3 Problématiques liées à l'utilisation d'un simulateur 31

3. Commande d'un simulateur : interactions homme/machine 33
3.1 De l'hexapode à commander au système de commande 33
3.1.1 Modèle de comportement 34
3.1.2 Synthèse d'une loi de commande mathématiques 38
3.1.3 Implantation physique d'une loi de commande 41
3.2 Interaction entre le robot et son environnement : commande en force 42
3.2.1 Compliance passive/active 42
3.2.2 Commande en impédance (sans mesure de l'effort) 43
3.2.3 Commande hybride externe 43

Approche utilisée dans le cadre du projet SIMUSURF 47

Chapitre II : Campagne expérimentale *in situ* : Matériels et Méthodes

1. Introduction 50
1.1 Description d'une campagne d'essais *in situ* 50
1.2 Objectifs de la campagne expérimentale 50
1.3 Description des paramètres d'intérêt 51
1.3.1 Trajectoire d'une planche de surf sur la vague 51
1.3.2 Phases d'appui chez le surfeur 54

2. Matériel expérimental 57
2.1 La plateforme de forces 57
2.1.1 Cahier des charges spécifique 57
2.1.2 Description du matériel retenu 61
2.2 La centrale inertielle 62
2.3 Le système d'acquisition Arduino 64
2.3.1 Acquisition et stockage des données 64
2.3.2 Déclenchement et synchronisation des mesures 65
2.4 La planche de surf 66
2.4.1 Conception et réalisation 67
2.4.2 Positionnement des capteurs et de l'électronique embarqués 72
2.4.3 Etanchéité du matériel expérimental en environnement marin 73
2.5 Caméras vidéos 75
2.5.1 Caméra embarquée 76
2.5.2 Caméra *on-shore* 77

3. Expérimentations 78
3.1 Conditions d'essais 78
3.1.1 Conditions de mer 78
3.1.2 Notre approche dans le cadre de l'étude 79
3.2 Protocole expérimental 80
3.3 Identification des phases d'actions du surfeur sur une vague 80
3.3.1 Lors du take-off 80
3.3.2 Lors de la prise de vitesse 83

Retours sur une campagne expérimentale *in situ* 84

Chapitre III : Traitement des données expérimentales

1. Validation des données mesurées 86
1.1 Trajectoire de la planche sur la vague 86
1.2 Modèle de calcul du centre de pression du pied avant 89
1.3 Caractéristiques du rebond de la planche sur la face de la vague 91

2. Identification d'un modèle mathématiques expérimental 94
2.1 Introduction 94
2.2 Vague de référence 95
2.3 Résultats 98
2.4 Validation du modèle global 101

3. Suivi de trajectoires : implantation de la base de données expérimentales dans l'hexapode 104
3.1 Introduction 104
3.2 Limites de l'architecture mécanique de l'hexapode 105
3.3 Conception de l'environnement « surf » du simulateur 108
3.4 Résultats d'intégration de la base de données 109

3.4.1 Modèle de suivi des rotations de la planche....110
3.4.2 Modèle de suivi des translations relatives de la planche....111
3.4.3 Modèle de suivi mixte....112

Approche utilisée pour valider et traiter les données expérimentales....113

Chapitre IV : Analyse et implantation physique d'une loi de commande dans le simulateur : méthodes et résultats

1. Analyse du modèle global d'interactions surfeur/vague....114
1.1 Configuration du système....114
1.2 Analyse du niveau de couplage du système....115
1.3 Découplage du système dans le cadre du projet SIMUSURF....116

2. Proposition d'un modèle global expérimental d'interactions *P*(*s*) ..117
2.1 Choix et détermination des entrées/sorties prépondérantes et caractéristiques du système P(*s*)....118
2.2 Identification du modèle expérimental *P*(*s*)....118

3. Implantation d'un modèle expérimental de commande de l'hexapode 120
3.1 Modifications nécessaires de la partie hardware de l'hexapode....120
3.2 Architecture de commande....122
3.2.1 Mise en place numérique du schéma de commande....122
3.2.2 Approche CRONE : synthèse d'un régulateur....124
3.2.3 Analyse de la robustesse du système de commande....130
4. Résultats expérimentaux de la simulation de surf en environnement contrôlé....134
4.1 Trajectoires générées en laboratoire....135
4.2 Ressenti du surfeur débutant VS le surfeur confirmé....136
4.3 Couplage avec un modèle de réalité virtuelle....137

Approche utilisée pour implanter une loi de commande réaliste et robuste dans le simulateur....139

Conclusion générale et perspectives....140
Bibliographie....142

Table des figures

Figure 1 : Machine de Gough (Gough, *et al.*, 1962) 6
Figure 2 : Hexapode SiDi 8
Figure 3 : 7ème vérin linéaire 9
Figure 4 : Objectifs du simulateur (a) environnement réel (b) environnement contrôlé 10
Figure 5 : Les surfeurs en 1778 (Bishop Museum Archive) 14
Figure 6 : Evolution des planches de surf entre 1929 (à gauche (Blake, 1929)) et 2015 (à droite, (Valverde, 2015)) 15
Figure 7 : Propagation et transformation de la houle en vague (Tribord, 2016) 16
Figure 8 : Somme de deux vagues parfaites (en continu (a) et en pointillé (b)) donnant une houle dans un état irrégulier (c) (Holthuijsen, 2007) 17
Figure 9 : Projet SurfSens d'instrumentation de planche de surf en 2011 18
Figure 10 : Exemple d'essais réalisés en laboratoire pour l'analyse du comportement d'un surfeur (Lundgren, *et al.*, 2015) 19
Figure 11 : Représentation schématique de l'hexapode 21
Figure 12 : Simulateur Ultimate/Renault où l'hexapode est monté sur un ensemble de rails (Renault, 2016) 23
Figure 13 : Architecture d'un ARI classique 28
Figure 14: Architecture d'un ARI classique pour une translation longitudinale 29
Figure 15 : Tilt coordination dans le cas d'un mouvement longitudinal 30
Figure 16 : Variation de l'accélération restituée par tilt coordination en fonction de w_{tilt} 31
Figure 17 : Vitesse de rotation produite par tilt coordination en fonction de w_{tilt} 31
Figure 18 : Principe du contrôleur ETEL (Etel Motion Technologie, 2011) 35
Figure 19 : Mode « Référence Force » 36
Figure 20 : Mesures expérimentales pour l'identification du procédé 37
Figure 21 : Identification du bloc « régulation de courant » 37
Figure 22 : Identification du bloc « moteur » 38
Figure 23 : Comparaison « Courant mesuré » et « Courant modélisé » 38
Figure 24 : Comparaison « Position réelle » et « Position mesurée » 39
Figure 25 : Exemple de compliance passive 43
Figure 26 : Exemple de commande dite « hybride externe » 45
Figure 27 : Capteur de forces tri-axes placé à l'extrémité du 7ème vérin 45
Figure 28 : Séquences illustrant la commande temps réel en effort du vérin 46
Figure 29 : Signaux Capteur effort VS Position réelle du vérin 47
Figure 30 : Sollicitations mécaniques extérieures s'exerçant sur une planche 51
Figure 31 : La trajectoire dite « du surfeur débutant » 52
Figure 32 : La trajectoire dite « du surfeur confirmé » 52
Figure 33 : La trajectoire dite « du surfeur professionnel » 53
Figure 34 : L'axe de rotation longitudinal 53
Figure 35 : L'axe de rotation transversal 54
Figure 36 : L'axe de rotation vertical 54
Figure 37 : Phases d'appui chez le surfeur 55
Figure 38 : Interactions entre le surfeur et sa planche 55
Figure 39 : Evolution du comportement du surfeur lors d'une prise de vitesse sur la vague 56
Figure 40 : Plateforme AMTI pour évaluer les étendues de mesure en laboratoire 59
Figure 41 : Efforts moyens mesurés par la plateforme AMTI en laboratoire en config. 1 59
Figure 42 : Exemple d'efforts mesurés par la plateforme AMTI en laboratoire en config. 2 60

Figure 43 : Exemple de moments mesurés par la plateforme AMTI en laboratoire en config. 2 60
Figure 44 : Photo de la plateforme de force SENSIX 62
Figure 45 : Mesures de l'accéléromètre en fonction de la gravité 63
Figure 46 : Orientation des axes du gyromètre ITG3200 63
Figure 47 : Carte Arduino Mega 2560 63
Figure 48 : SD Shield 64
Figure 49 : Schéma du déclenchement des mesures *in situ* 66
Figure 50 : Template général d'une planche de surf 67
Figure 51 : les différents types de tail 68
Figure 52 : Répartition de l'épaisseur d'une planche de surf 69
Figure 53 : Profil du rocker d'une planche de surf 70
Figure 54 : Les trois types de dessous de planche 70
Figure 55 : Définition des rails d'une planche de surf 71
Figure 56 : Forme de la planche de surf expérimentale 72
Figure 57 : Support de fixation de la plateforme de forces 72
Figure 58 : Positionnement des capteurs et de l'électronique embarqués 73
Figure 59 : Bande d'étanchéité bitumineuse 74
Figure 60 : Equipement optoélectronique pour l'analyse du mouvement 75
Figure 61 : Positionnement de la caméra embarquée 76
Figure 62 : Synchronisation caméra embarquée/mesures capteurs 77
Figure 63 : Synchronisation caméra *on-shore*/mesures capteurs 78
Figure 64 : Phase d'attente de la vague 81
Figure 65 : Phase de rame du surfeur 82
Figure 66 : Phase de redressement du surfeur sur la planche 82
Figure 67 : Phase d'appui/Allégement du surfeur sur la planche 83
Figure 68 : Processus de post-traitement des données de la campagne expérimentale 85
Figure 69 : Orientation des axes de la planche de surf expérimentale 86
Figure 70 : Conversion de mesures accéléromètres en variations relatives de position 87
Figure 71 : Exemple de variations relatives de position de la planche de surf sur la vague 87
Figure 72 : Caméra on-shore utilisée pour la validation des trajectoires 88
Figure 73 : Positionnement du repère du capteur de forces 89
Figure 74 : Positions du centre de pression du pied avant du surfeur 90
Figure 75 : Position du pied avant sur la planche 90
Figure 76 : Identification des phases d'appuis/allégements 91
Figure 77 : Images issues de la caméra on-shore 92
Figure 78 : Interactions entre dZ et Fz 93
Figure 79 : Interactions entre dX et Fz 93
Figure 80 : Exemple de données brutes enregistrées sur une vague pour identifier la sortie Ω_y en fonction des entrées (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y) 94
Figure 81 : Schéma d'identification du modèle global d'interactions surfeur/planche $W(s)$ 95
Figure 82 : Efforts bruts enregistrés sur une vague de référence 96
Figure 83 : Moments bruts enregistrés sur une vague de référence 96
Figure 84 : Accélérations brutes enregistrées sur une vague de référence 97
Figure 85 : Vitesses angulaires brutes enregistrées sur une vague de référence 97
Figure 86 : Identification des modèles (W_{ax}, W_{ay}, W_{az}) 99
Figure 87 : Identification des modèles ($W_{\Omega x}$, $W_{\Omega y}$, $W_{\Omega z}$) 100
Figure 88 : Corrélation croisée l'entrée et les résidus pour chaque paire d'entrée/sortie 101
Figure 89 : Exemple du sous-modèle Ω_y identifié pour une vague de référence et appliqué à une vague quelconque 102

Figure 90 : Diagramme du Bode du sous-modèle identifié pour la sortie Ω_y 103
Figure 91 : Mode suivi de trajectoires 104
Figure 92 : Trajectoire angulaire : vague de référence VS limites de position hexapode 105
Figure 93 : Accélérations angulaires : vague de référence VS limites de l'hexapode 106
Figure 94 : Trajectoire angulaire : vague de référence post-traitée VS limites de position hexapode 107
Figure 95 : Accélérations angulaires post-traitées : vague de référence VS limites de l'hexapode 107
Figure 96 : Trajectoire linéaire : vague de référence VS limites de position hexapode 108
Figure 97 : Environnement « surf » du simulateur 109
Figure 98 : Comparaison effort vertical en mode suivi de trajectoires en rotation 110
Figure 99 : Comparaison le moment transverse M_x en mode suivi de trajectoires en rotation 111
Figure 100 : Comparaison de l'effort vertical en mode suivi de trajectoires en translation 111
Figure 101 : Comparaison le moment transverse M_x en mode suivi de trajectoires mixte 112
Figure 102 : Commande en effort externe 114
Figure 103 : Choix des entrées du modèle simplifié 117
Figure 104 : Modèle simplifié $\mathbf{P}(s)$ des interactions surfeur/vague à identifier 118
Figure 105 : Comparaison entre la vitesse angulaire Ω_x expérimentale et modélisée 119
Figure 106 : Comparaison entre la vitesse angulaire Ω_y expérimentale et modélisée 119
Figure 107 : Schéma d'acquisition, de traitement des données d'actions mécaniques du surfeur et d'envoi des consignes de position (Tx,Ty,Tz,Rx,Ry, Rz) à l'hexapode 121
Figure 108 : Modélisation de l'architecture de commande sous Matlab/Simulink 122
Figure 109 : Diagramme de Bode du procédé $H_{11}(s)$ pour une masse M de 50, 70 et 100kg, respectivement en bleu, vert et rouge 125
Figure 110 : Diagramme de Nichols du procédé $H_{11}(s)$ nominal (en rouge) et ses domaines d'incertitude (en vert) 125
Figure 111 : Diagramme de Nichols de la fonction de transfert en boucle ouverte nominale $\beta_{011}(j\omega)$ (en bleu) et domaines d'incertitude (en vert). 127
Figure 112 : Fonctions de sensibilité en boucle fermée nominales (en vert) et aux extrémités (en rouge et en bleu), contraintes du domaine (---) 128
Figure 113 : diagramme de Nichols pour chaque élément diagonal du transfert $\mathbf{K}(s)\mathbf{H}(s)$ 128
Figure 114 : Diagrammes de Bode de $K_{R11}(s)$ (a) et $K_{R22}(s)$ (b) synthétisés 129
Figure 115 : Evolution de la stabilité du système lors de variation de la masse du surfeur 130
Figure 116 : Valeurs singulières de $(\mathbf{I}+\mathbf{K}(s)\mathbf{H}(s))^{-1}$ 131
Figure 117 : Modélisation par blocs des éléments $K_{R11}(s)$ (a) et $K_{R22}(s)$ (b) régulateur CRONE diagonal [2x2] calculé respectivement pour $H_{11}(s)$ et $H_{22}(s)$ 131
Figure 118 : Simulation numérique d'interactions entre l'appui M_x de l'utilisateur et la trajectoire angulaire de l'hexapode a_x 132
Figure 119 : Simulation numérique d'interactions entre l'appui F_z de l'utilisateur et la trajectoire angulaire de l'hexapode a_y 132
Figure 120 : Evolution des performances pour différentes masses du surfeur (illustrée pour la sortie a_x) 133
Figure 121 : Evolution des performances pour différentes masses du surfeur (illustrée pour la sortie a_y) 133
Figure 122 : Trajectoire angulaire a_x générée en temps réel par l'utilisateur 135
Figure 123 : Trajectoire angulaire a_y générée en temps réel par l'utilisateur 135
Figure 124 : Schéma de mise en place du simulateur couplé à la réalité virtuelle 138
Figure 125 : Système de réalité virtuelle utilisé 138
Figure 126 : Démonstrateur fonctionnel en environnement contrôlé 139

INTRODUCTION GENERALE

Si un objet placé dans l'espace peut suivre une infinité de trajectoires aussi complexes soient-elles, son nombre de degrés de liberté n'en reste pas moins limité à 6 (3 translations et 3 rotations). Très vite au cours des siècles derniers, il est apparu indispensable de pouvoir mettre en place des systèmes mécaniques permettant de déplacer un objet (que nous appellerons l'élément mobile terminal) à partir d'une base fixe. Des innovations techniques et technologiques sont alors allées dans ce sens jusqu'à l'apparition et la conception de robots. Les premiers robots avaient une architecture mécanique de type série à l'apparence d'un bras articulé et étaient commandés en position de manière à pouvoir piloter un ou plusieurs degrés de liberté de l'élément mobile terminal (Barrientos, *et al.*, 1999) .

Durant ces dernières années, les exigences industrielles ont mené à une démocratisation de l'utilisation des robots mais ont également fait apparaitre une limite dans les taches réalisables par ces derniers. En effet, en demandant une précision, une rapidité, une répétabilité et une flexibilité toujours plus optimisées, les robots développés au cours du XXème siècle se sont avérés inappropriés et plus particulièrement au niveau de leur architecture. C'est ainsi que de nouvelles architectures mécaniques ont vu le jour et commencent à se développer dans le monde industriel ; il s'agit tout particulièrement des manipulateurs parallèles. La première structure parallèle a été présentée par Gough en 1947 (Gough, *et al.*, 1962)(Taghirad, 2013). Il a ainsi réalisé une structure mécanique composée d'un plateau mobile relié à la base fixe par l'intermédiaire de 6 segments parallèles de longueur variable. La position et l'orientation de la plate-forme mobile peut donc être définie et contrôlée par l'intermédiaire des 6 segments. La Figure 1 montre le premier dispositif de la machine de Gough où une roue était fixée sous la plateforme mobile et était entraînée par un tapis roulant. L'intérêt de pouvoir modifier l'orientation et la position de l'élément mobile était ici d'étudier l'usure du pneumatique sous des conditions et des configurations différentes.

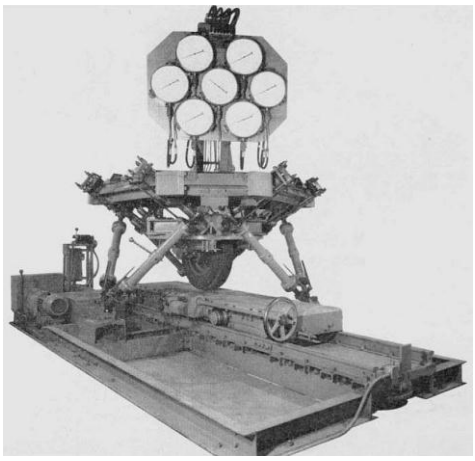


Figure 1 : Machine de Gough (Gough, *et al.*, 1962)

Une dizaine d'années après la présentation du premier système mécanique parallèle, l'industrie aéronautique a commencé à s'intéresser à ce type de machine et notamment avec le besoin de

réaliser des tests de pilotage d'appareils en environnement contrôlé. Le cahier des charges de ces industriels était alors plus exigeant dans le sens où la mise en place d'un simulateur de vol avec reproduction précise et complète d'un cockpit par exemple nécessitait une structure mécanique capable de déplacer une masse importante avec une dynamique élevée. Ainsi, si la robotique commençait à se démocratiser à cette époque au travers des manipulateurs séries, la conception de simulateurs de vol ne pouvait se contenter de tels systèmes et la plateforme de Gough est très vite apparue pour les industriels aéronautiques comme étant la solution pour répondre à leur problématique (Merlet, 1997) .

Aujourd'hui, le besoin de pouvoir reproduire en environnement contrôlé un ensemble de tâches avec une répétabilité, une précision et des vitesses d'exécution toujours plus importantes permet le développement sans cesse croissant des simulateurs utilisant l'architecture de la plateforme de Gough. En effet, si les simulateurs construits à base d'un hexapode les plus couramment présentés sont les simulateurs de vol ou de conduite, en réalité le champ d'application de ce type de machine est beaucoup plus vaste : cela peut aujourd'hui s'étendre de la caractérisation de matériaux sous sollicitations complexes (Guérard, *et al.*, 2014) ç la validation de modèles numériques de sollicitations multiaxiales (Tounsi, *et al.*, 2011) en passant par la simulation de la houle et la conception d'attractions pour les parcs à thèmes (Salazar Garcia, 2009). Aussi si de telles applications sont aujourd'hui courantes à l'image du simulateur de conduite ULTIMATE développé par Renault de 2001 à 2004, l'utilisation de robots parallèles pour des applications expérimentales est encore récente (début des années 90) et des travaux restent encore à mener et plus particulièrement au niveau de la partie commande dynamique (Paccot, 2009) et (Denoual, 2012). De plus, l'apparition des véhicules intelligents et entièrement automatisés (Attia, *et al.*, 2012) a rendu nécessaire le fait de pouvoir expérimenter de manière très précise et en environnement contrôlé les stratégies de commande à vocation de piloter un véhicule en conditions réelles.

De même, ces dernières années ont vu une nouvelle évolution des travaux de recherche autour des interactions directes entre un robot parallèle et son environnement. Si aujourd'hui la notion de cobotique (interaction réelle entre un humain et un robot) est de plus en plus présente, depuis le début des années 2000 des travaux spécifiques ont étudié différentes stratégies de commande (Dauchez, *et al.*, 2005) (Vivas, *et al.*, 2003).

Contexte et généralités

Le département Durabilité des Matériaux, Assemblages et Structures (DuMAS) de l'Institut de Mécanique et d'Ingénierie de Bordeaux (I2M) s'est associé à l'équipe CRONE du groupe automatique du laboratoire de l'Intégration du Matériau aux Systèmes (IMS) autour du projet commun de simulation de trajectoires complexes à l'aide d'un hexapode de mouvement et son application aux sports de glisse. Nouvellement équipé d'un robot hexapode de dernière génération (appelé ici l'hexapode SiDi) constitué d'une plate-forme mobile reliée, par 6 vérins pilotables indépendamment, à une plate-forme fixe, l'objectif global du projet SIMUSURF soutenu par l'EuroSIMA Cluster glisse et co-financé par l'ENSAM, Bordeaux INP et la Région

Aquitaine, est d'optimiser le pilotage de l'hexapode pour recréer en environnement contrôlé les sensations ressenties par un surfeur sur la vague.

L'hexapode de mouvement SiDi (Figure 2) permet de réaliser une trajectoire 3D en pilotant les 6 degrés de liberté de l'espace indépendamment.

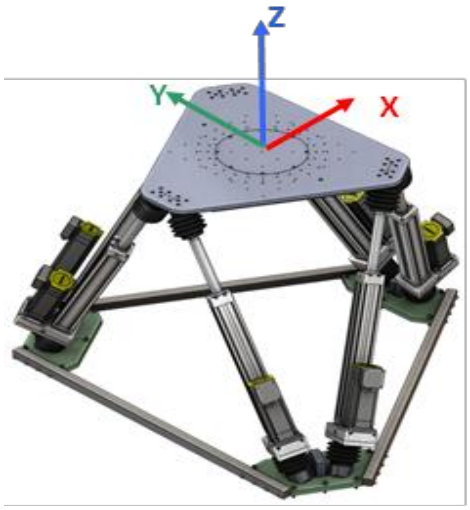


Figure 2 : Hexapode SiDi

Les 6 actionneurs reliés à la plateforme mobile permettent le mouvement d'une charge pouvant atteindre 500kg selon les 6 degrés de liberté de l'espace avec les caractéristiques définies Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques de l'hexapode SiDi

Mouvement	**Course**	**Vitesse**	**Accélération**
Translation suivant X et Y	± 400 mm	± 1.45 m/s	± 7m/s²
Translation suivant Z	± 300 mm	± 1.00 m/s	± 6.5m/s²
Rotation autour de X et Y	± 30 °	± 50 °/s	± 500°/s²
Rotation autour de Z	± 40 °	± 70 °/s	± 700°/s²

La précision du positionnement de l'hexapode est de 0.01 mm pour les translations et 0.01° pour les rotations et la position de l'hexapode en temps réel peut être mesurée avec une fréquence d'acquisition jusqu'à 10 kHz.

Pour atteindre une amplitude de mouvement et une vitesse plus élevée un 7ème vérin électromécanique (Figure 3) a été ajouté. Pouvant se monter perpendiculairement ou parallèlement à l'axe de la plateforme mobile, il a une vitesse de déplacement pouvant aller jusqu'à 3m/s et une course de ±200mm.



Figure 3 : 7ème vérin linéaire

Les deux systèmes que sont l'hexapode et le 7ème vérin présentent l'avantage de pouvoir être synchronisés même s'ils possèdent chacun un système de commande spécifique. Si le 7ème vérin ne présente pas d'intérêt direct pour le projet SIMUSURF, il sera utilisé pour expérimenter les lois de commande et les modes de pilotages que nous détaillerons par la suite.

Objectifs et verrous scientifiques

Il n'existe pas, à l'heure actuelle et à notre connaissance, de système permettant d'analyser quantitativement les mouvements d'un surfeur pour réaliser une figure donnée et de pouvoir les reproduire en environnement contrôlé. La mise en place d'un simulateur de surf, utilisant l'hexapode équipé de plates-formes de forces, permettra alors d'établir des relations entre manœuvre et réponse biomécanique du surfeur, d'étudier la variabilité interindividuelle pour exécuter un mouvement donné et d'optimiser le geste sportif dans un but d'aide à la performance.

Dans le cadre spécifique du projet SIMUSURF, l'objectif général est d'utiliser l'hexapode pour l'analyse de la réponse biomécanique d'un surfeur positionné sur le plateau mobile de l'hexapode et soumis à des mouvements représentatifs des mouvements d'une planche de surf lors de manœuvres effectués en conditions réelles (Figure 4). Les applications associées sont alors nombreuses : on retrouve naturellement l'apprentissage d'activités sportives nécessitant des conditions particulières d'équilibre. Les sports de glisse tels que le surf, le ski ou le snowboard sont des activités sportives qui nécessitent conduite de trajectoire du support (planche de surf, skis ou snowboard) et équilibre du sportif. Le développement de ce simulateur à partir de l'hexapode nécessitera donc un pilotage de la trajectoire de la plateforme mobile de l'hexapode à partir des efforts exercés par l'utilisateur. Une fois validé, ce dispositif pourra également être utilisé pour l'apprentissage du surfeur : des mouvements correspondant à des conditions de vagues programmées permettront la répétition du mouvement favorisant ainsi la pratique de figures. Le simulateur ainsi créé pourra alors être utilisé comme outil de découverte du surf ou d'apprentissage chez le surfeur occasionnel ou comme outil d'entrainement et d'aide à la performance chez le surfeur professionnel.

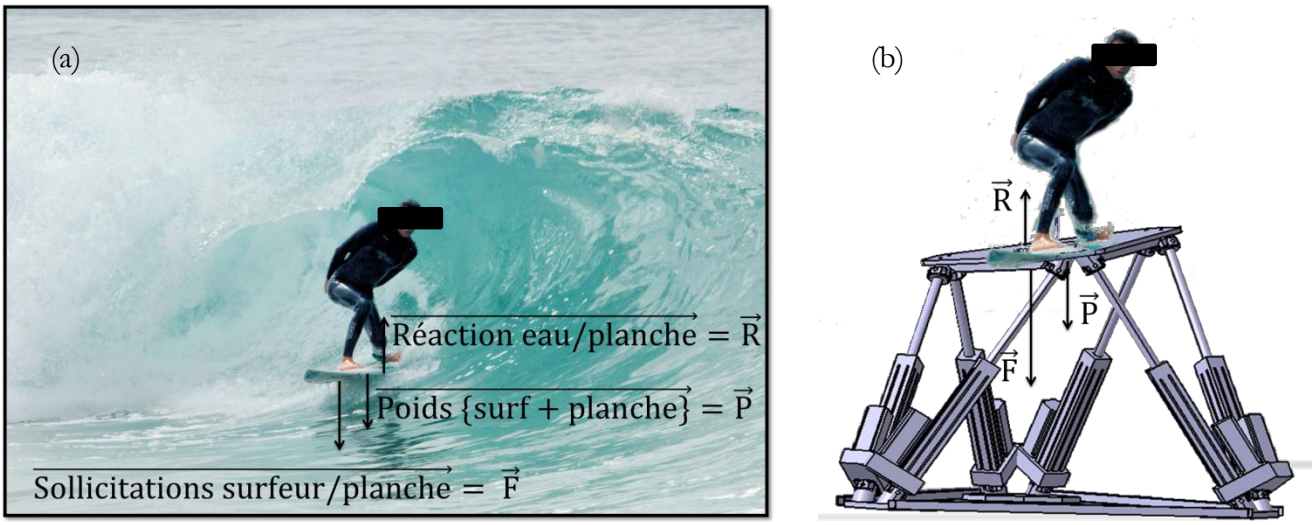


Figure 4 : Objectifs du simulateur (a) environnement réel (b) environnement contrôlé

L'étude sera abordée sous deux aspects, traduisant les verrous technologiques et scientifiques associés au projet :

- D'un point de vue mécanique et robotique, il est indispensable d'optimiser le pilotage de cette machine (au total 6 vérins avec des vitesses potentielles de 5 m/s) pour atteindre les trajectoires désirées ou les efforts multiaxiaux à imposer dans le cas particulier d'un pilotage complexe en effort. En effet, la description d'une trajectoire 3D complexe avec précision et répétabilité nécessite la prise en compte des phénomènes de couplage dynamiques existants entre les actionneurs et la mise en œuvre d'une approche de commande multi-variable efficace.

- D'un point de vue instrumentation et acquisition, la simulation des trajectoires correspondant aux mouvements de l'ensemble {surfeur + planche} sur l'eau nécessite la constitution d'une base de données expérimentales. Pour ces mesures *in situ*, l'instrumentation d'une planche est nécessaire. La conception d'une planche instrumentée, la mise en place d'un protocole d'acquisition dans les conditions extrêmes que représente l'environnement marin et l'utilisation d'un post-traitement robuste sont un des verrous technologiques associés à ce projet.

Méthodologie

La méthodologie est basée sur une approche couplée acquisition des données / reproduction en environnement contrôlé.

Dans un premier temps, un protocole expérimental sera mis en place pour effectuer des mesures *in situ*. Les premières mesures nécessiteront l'instrumentation d'un longboard intégrant une plate-forme de forces mesurant l'évolution temporelle de l'effort exercé par le surfeur sur le surf. Des caméras embarquées sur la planche fourniront une mesure qualitative de la position du surfeur sur la planche, tandis que des caméras on-shore seront utilisées pour avoir les mouvements de l'ensemble {surfeur – planche de surf} par rapport à un repère fixe (*in situ*, ce repère fixe correspond à la plage, et en laboratoire, au plateau fixe de l'hexapode). Des tests sur les matériels équipés des instruments de mesure seront effectués afin de valider les protocoles d'acquisition des mesures et la tenue des capteurs en environnement marin.

En parallèle de la mise en place de l'acquisition, un modèle dynamique de l'hexapode sera réalisé et ses paramètres seront déterminés grâce aux données (commandes, déplacements et efforts) recueillies lors d'une phase d'identification expérimentale. Ces résultats seront utilisés pour la programmation d'un modèle dynamique (utilisation de la base de simulation Matlab/Simulink) permettant l'analyse du comportement dynamique de l'hexapode ainsi que l'évaluation en simulation des différentes stratégies de commande envisagées. Une commande robuste du modèle de l'hexapode sera synthétisée pour en asservir l'attitude, puis les efforts reproduits. Le caractère incertain de la position et des réactions du surfeur porté par l'hexapode seront particulièrement considérés. L'évaluation de la commande en position sera effectuée grâce à son implantation sur l'hexapode réel, avec des variations élémentaires d'attitude et sans surfeur.

Les mesures *in situ* seront intégrées à l'hexapode et une comparaison avec les mesures en laboratoire sera effectuée. Le surfeur ayant participé à l'acquisition des données réelles participera à la validation des mouvements recréés en laboratoire. Les performances de robustesse (résistance à la variabilité des effets produits par le surfeur) seront vérifiées.

L'asservissement des efforts réalisés par l'hexapode sera utilisé pour simuler la réaction mécanique du milieu aqueux sensé porté le surf. A ce titre, c'est ici le surfeur qui sera maitre de la trajectoire réalisée.

Le chapitre 1 sera consacré à un état de l'art sur l'environnement du surfeur et l'environnement contrôlé d'un simulateur. Le chapitre 2 abordera l'ensemble des aspects matériels et des méthodes de la campagne expérimentale menée *in situ* en conditions réelles. Le chapitre 3 présentera le traitement des données expérimentales et les résultats. Enfin le chapitre 4 sera consacré à l'analyse et l'implantation physique dans le simulateur de la loi de commande définie grâce à la base de données expérimentales.

Pour valider le travail réalisé lors de ce projet, l'hexapode et la base de données de mouvement constituée représentative des figures classiques exécutées en mer pourront être testés sur un panel de surfeurs. Le simulateur ainsi créé pourra alors être utilisé comme outil d'apprentissage, d'entrainement et d'aide à la performance. Des modes « apprenti » (attitude du surf imposée), « free-ride » (trajectoire libre) et mixte (assistance au positionnement du surf) pourront être proposés.

Il est intéressant de noter également les aspects originaux du projet. En effet, au-delà du contexte ludique et grand public associé au projet (la simulation de sports de glisse), ce projet est original à plusieurs titres : par l'utilisation de moyens expérimentaux initialement développés pour générer des impacts sur structures ou matériaux sous chargement complexe pour la reproduction de mouvement en environnement contrôlé, par les acquisitions de données expérimentales off-shore qui devront être réalisées en environnement marin et par la collaboration d'équipes de recherche qui renforce et concrétise les liens sur un axe de recherche transversal. De plus, l'aspect original de ce projet permet de faire de ce moyen expérimental un excellent vecteur de communication auprès du grand public. Des articles concernant le projet SIMUSURF sont parus, dans des mensuels grand public dédiés aux sports de glisse d'une part (Surfsession, Mai 2013), (Surfsession, Juin 2015) et dans des quotidiens gratuits d'autre part (20minutes, édition Bordeaux et édition nationale, 16 mai 2013, p2). Un projet de maturation des travaux de recherche a été déposé auprès d'Aquitaine Science Transfert avec pour objectif de mener une maturation scientifique et technique d'une partie du projet de thèse dans le cadre de la création d'une start-up innovante dans les sports de glisse.

Chapitre 1

ETAT DE L'ART

1 La science et le surf

1.1 Historique et contexte

Le surf représente l'essence même du sport de glisse. Contrairement au ski ou au skate, le surf définit la capacité d'un homme à utiliser une planche pour glisser sur un élément qui est lui-même en mouvement. Il s'agit là de l'homme cherchant à affronter et utiliser les forces de la nature pour créer une relation harmonieuse d'équilibre entre son corps, sa planche et la vague. Le surf peut « être perçu comme une épure des sports de glisse puisqu'il se joue dans un mouvement perpétuel où la vague et sa pente ne sont jamais les mêmes » (Augustin, 1994). Même si le surf était certainement pratiqué avant cette date, c'est en 1778 que le premier surfeur fût observé. Lors d'une expédition du Capitaine Cook dans les îles polynésiennes du Pacifique, ayant notamment mené à la découverte d'Hawaï, ce dernier avait rapporté dans ses carnets de voyages plusieurs dessins montrant des hommes en équilibre sur des planches de bois tentant de prendre une vague (Figure 5).



Figure 5 : Les surfeurs en 1778 (Bishop Museum Archive)

Le surf est un sport jeune à tous points de vue. En premier lieu, si le fait de se déplacer sur une vague pour ressentir des sensations de glisse est une pratique ancienne, le surf n'est considéré comme sport à part entière que depuis quelques décennies. La professionnalisation aidant, la recherche de performance sur le plan du matériel (cf Figure 6), de la préparation et des entrainements est devenue inévitable les surfeurs souhaitant aller plus vite, plus haut et plus fort.



Figure 6 : Evolution des planches de surf entre 1929 (à gauche (Blake, 1929)) et 2015 (à droite, (Valverde, 2015))

La science n'a jamais été le fer de lance de cette volonté d'innovation de l'industrie du surf. Seraient-ce les surfeurs qui avaient peur des équations ou les scientifiques qui se désintéressaient totalement d'une pratique qui de par ses repères identitaires et culturels n'a pas su trouver sa place au sein de l'évolution moderne ? Certainement un peu des deux.

Quoiqu'il en soit, le surf a pu se développer, de manière tumultueuse, en profitant de l'essor et de la croissance du « Surf Business » ces 15 dernières années. Cet essor marketing a eu pour effet de montrer aux grandes entreprises de l'industrie du surf qu'un besoin nouveau était en train de naître à la fois chez les pratiquants (débutants ou professionnels) et chez les artisans de la glisse : ils voulaient en connaitre davantage sur leur pratique. Ils sont devenus désireux de pouvoir analyser leur performance, de pouvoir se comparer aux autres, de pouvoir mettre des mots et une analyse derrière leur ressenti. On a alors assisté au début du professionnalisme avec deux catégories de spécialisation. Les premiers considéraient l'analyse de la vague, le support de glisse, comme indispensable à une meilleure compréhension du surf. Tandis que les seconds prenaient le parti de se focaliser sur le surfeur et sa capacité à agir sur la vague.

1.2 Méthodologies utilisées pour l'analyse du surf

De manière générale, l'analyse sportive, technique et scientifique d'un sport en particulier se découpe en deux phases : une première analyse de l'environnement dans lequel se pratique le sport et dans lequel le sportif évolue, puis une seconde analyse plus spécifique du geste sportif et du comportement du pratiquant dans son environnement.

1.2.1 La vague : un environnement instable et imprévisible

La spécificité du surf, en comparaison avec les autres sports, réside dans le fait qu'il se pratique dans un environnement marin en constant mouvement et dont la répétabilité n'existe pas. L'environnement principal du surfeur se compose de trois principaux éléments :

- La houle évoluant en pleine mer, au large des côtes, se propageant dans une direction donnée.
- La vague qui vient se briser et dérouler lorsqu'elle rencontre une côte.
- Le vent, défini à la fois au large, en pleine mer, et également défini à proximité de la côte (souvent de caractéristiques différentes).

Pour comprendre et analyser la notion d'instabilité de l'environnement du pratiquant de surf, il est nécessaire de définir la formation d'une vague. Une vague se forme au large de la côte donc en pleine mer. Le terme de « houle » est alors employé pour définir l'onde générée en pleine mer par le vent soufflant sur une étendue d'eau calme. Ce vent génère des ondes à la surface de l'eau du fait de micro-dépressions localisées. Ce sont ces ondes qui se propagent selon une direction donnée jusqu'à venir se transformer en vagues à l'approche d'une côte. La propagation et la croissance de la houle sont régies selon trois principaux critères : la vitesse du vent, la durée pendant laquelle le vent est présent en mer et la distance parcourue par la houle.

La houle se propage librement à la surface de l'océan en formant des cercles concentriques depuis leur origine et lorsqu'elle se trouve en eau profonde, c'est-à-dire lorsque la profondeur est supérieure à la moitié de la longueur d'onde de la houle. La hauteur de la houle diminue lors de la propagation du fait de la dispersion d'énergie sur la très grande étendue de surface et considérant que les ondes avec de grandes périodes se déplaçant plus vite que les ondes à périodes courtes. Durant cette phase de propagation en pleine mer, la perte d'énergie n'est pas significative. En revanche, lors de l'approche des côtes, et en eau dite peu profonde, la problématique de propagation de houle (devenant alors vague) se complexifie. En effet, la vitesse de propagation de la houle diminue considérablement avec les phénomènes de friction dus à une profondeur d'eau réduite. Avec la différence de profondeur d'eau et la propagation de la houle (se transformant en vague) l'amplitude des ondes augmentent. Cette amplitude augmente jusqu'à ce que la vague se brise et commence à déferler (Figure 7). La direction des ondes tend à évoluer en approchant du bord pour devenir parallèle à la côte (Tribord, 2016).

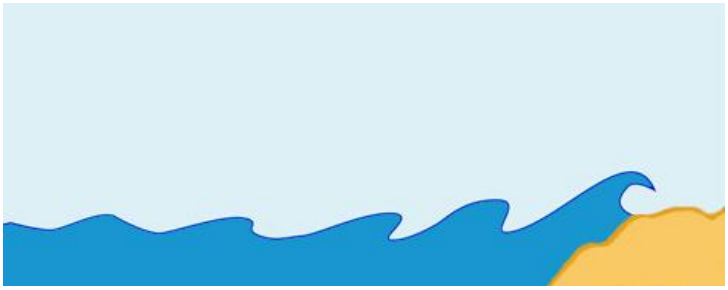


Figure 7 : Propagation et transformation de la houle en vague (Tribord, 2016)

Leo Holthuijsen a contribué à l'analyse, à la modélisation des vagues et à la prédiction de la houle en définissant notamment « la loi des séries » (Holthuijsen, 2007). Son postulat de départ consiste à considérer que l'ensemble des houles évoluant dans l'océan sont parfaites, c'est-à-dire se propageant telles des ondes sinusoïdales avec une période régulière. Les vents de mer étant différents selon le point de départ de la houle et le phénomène de propagation aidant, il est courant d'avoir ainsi deux houles dites « parfaites » qui se rencontrent, en eau profonde ou bien à l'approche des côtes. Dans ce cas, la houle qui va alors être générée de cette rencontre ne sera plus parfaite mais correspondra à une séquence de groupes de vagues devenues irrégulières, instables et pouvant être chaotiques selon les longueurs d'ondes et les périodes. La Figure 8 issue des travaux de Leo Holthuijsen montre l'état irrégulier de la houle se propageant dans ces conditions et donc la difficulté à modéliser une houle réelle telle que perçue lors de son approche des côtes.

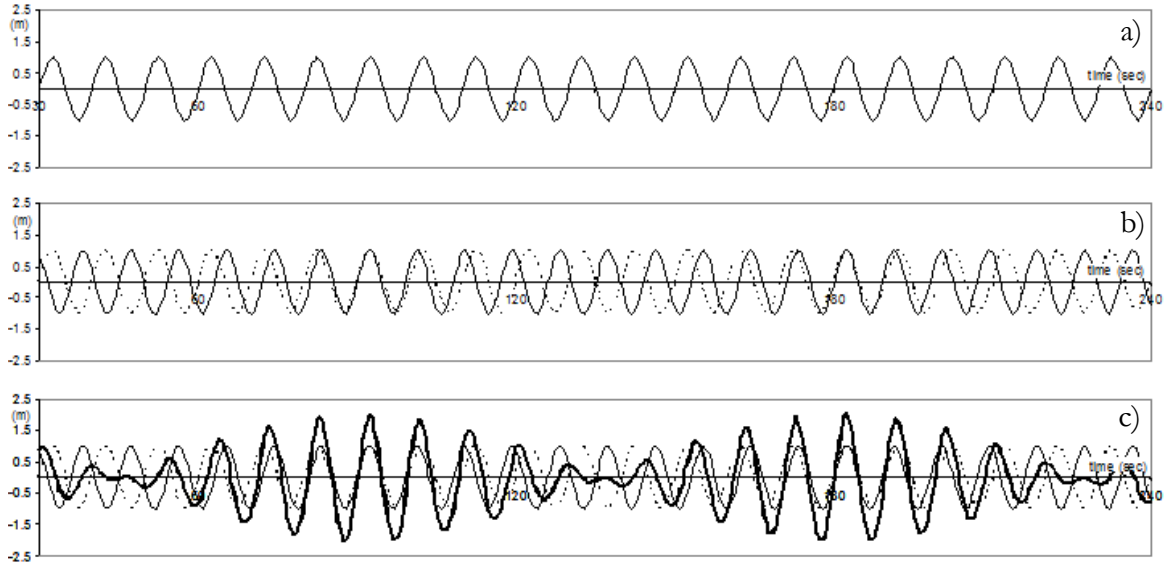


Figure 8 : Somme de deux vagues parfaites (en continu (a) et en pointillé (b)) donnant une houle dans un état irrégulier (c) (Holthuijsen, 2007)

La problématique du projet SIMUSURF et tout particulièrement dans le cas de la campagne expérimentale *in-situ* qui va être mené résidera alors dans la capacité à prendre en compte l'environnement du pratiquant de sport de glisse pour pouvoir reproduire, contrôler et simuler en laboratoire, à l'aide de l'hexapode, les interactions entre le surfeur et la vague les plus proches de la réalité.

1.2.2 Le surfeur : un sujet instable et imprévisible

L'analyse du comportement et des interactions d'un pratiquant d'une activité sportive avec son environnement est essentiel aujourd'hui. Plusieurs exemples existent aujourd'hui dans chacune des activités sportives, du sport de raquette (Andrew, *et al.*, 2003) au sport de ballon en passant par les sports d'eau (Terrien, *et al.*, 2012) et les activités artistiques (Sato, *et al.*, 2014). Dans chacun des travaux de recherche disponibles dans la littérature, deux axes de recherche se

distinguent dans l'analyse du sportif : considérant que le sportif et son matériel sont instrumentés, soient les expérimentations sont menées et analysés en conditions réelles d'utilisation, soit elles sont effectuées en laboratoire en utilisant différentes techniques de simulation ou reproduction de l'environnement du sportif.

Les entreprises Tecnalia et Pukas ont travaillé en collaboration dans le cadre du projet SurfSens en 2011 pour proposer une instrumentation de planche de surf permettant de recueillir des paramètres significatifs de la pratique du surf en conditions réelles (Urko Esnaola, Tecnalia). Leurs travaux avaient pour objectifs l'analyse d'informations liées au comportement de la planche de surf pour être capable de proposer une conception de planche de surf optimale ainsi que des retours quantitatifs au surfeur sur sa technique et le comportement de sa planche. Des jauges de déformation, des capteurs de pression ainsi qu'une centrale inertielle couplée à un GPS ont été incorporés dans une planche de surf et des tests en conditions réels ont été réalisés (Figure 9).

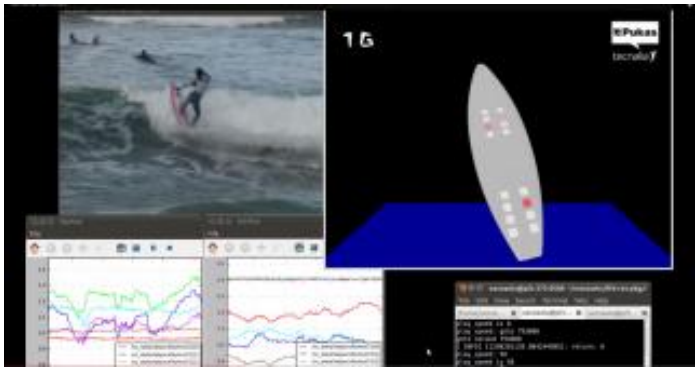


Figure 9 : Projet SurfSens d'instrumentation de planche de surf en 2011

Une fois les premiers tests réalisés, le projet SurfSens n'a pas eu de suite et aucune exploitation et analyse des données n'a été publiée.

Dans le cadre du surf, l'environnement extérieur est tout particulièrement difficile à modéliser et reproduire en laboratoire. Les travaux de recherche menés dans le cadre de l'analyse d'un surfeur sont pour la plupart réalisés en considérant soit des activités de glisse connexes (utilisation de supports de glisse urbains tels que des « skateboards ») soit les capacités de surfeurs professionnels de se projeter mentalement en conditions de surf réelles (Lundgren, *et al.*, 2014). Par exemple, Lina Lundgren a travaillé sur l'analyse des manœuvres aériennes effectuées par des surfeurs professionnels (Lundgren, *et al.*, 2015). Ses travaux de recherche avaient pour but de déterminer l'intérêt et la fiabilité de certains paramètres d'analyse du mouvement sportif (comme la force de réception maximale, le temps pour stabiliser la réception de la manœuvre en particulier). Les limites de cette étude et de celles menées précédemment résident dans le fait que les essais réalisés en amont de la phase d'analyse de la capacité du surfeur à réceptionner une manœuvre aérienne ont été réalisés dans un environnement considérablement différent de la réalité. L'objectif scientifique était alors d'étudier la fiabilité de comparaison d'une analyse dans un environnement différent de celui du

pratiquant pour déterminer sa capacité à effectuer un geste sportif lors de la pratique de son sport.



Figure 10 : Exemple d'essais réalisés en laboratoire pour l'analyse du comportement d'un surfeur (Lundgren, *et al.*, 2015)

La Figure 10 illustre la limite des travaux de recherche actuels du fait de la difficulté à analyser les gestes d'un surfeur directement sur la vague *in situ* ou bien sur un outil de simulation permettant de reproduire l'environnement d'un surfeur de manière réaliste et en gardant un sens physique cohérent. Un des objectifs du projet SIMUSURF est bien de fournir à la communauté scientifique et sportive un outil capable d'effectuer des travaux de recherche sur un outil de reproduction de l'évolution et des interactions d'un surfeur sur la vague au plus proche de la réalité. Cet outil, un hexapode de mouvement, permettra de travailler sur la simulation de trajectoires complexes et d'être utilisé dans une de ses applications, en tant que simulateur de surf.

2 Analyse de l'architecture matérielle d'un simulateur

L'architecture matérielle d'un hexapode de type Gough-Stewart peut être divisée en deux parties : une plateforme mobile et une plateforme fixe. Ces deux parties sont alors reliées par l'intermédiaire de 6 vérins électromécaniques (Figure 11).

2.1 Modélisation des systèmes de restitution de mouvement

2.1.1 Modélisation géométrique

La modélisation géométrique de l'hexapode consiste à paramétrer le déplacement et l'orientation de la plateforme mobile en fonction des positions des six vérins pour pouvoir être capable de représenter de manière précise chaque mouvement de cette dernière. Nous définirons ainsi dans cette partie les relations géométriques entre les actionneurs et la configuration de la plateforme (orientation/position).

Quelques notations :

$R_F = (O_F, \overrightarrow{x_f}, \overrightarrow{y_f}, \overrightarrow{z_f})$: repère fixe lié à la base (aussi appelé repère absolu).

$R_M = (O_M, \overrightarrow{x_m}, \overrightarrow{y_m}, \overrightarrow{z_m})$: repère mobile lié à la plateforme.

Soient B_i et M_i les extrémités des actionneurs respectivement au niveau de la base fixe et de la plateforme mobile.

Soit AB la notation d'un vecteur orienté allant du point A au point B.

Soit w le vecteur vitesse de rotation.

Soit **M** une matrice carrée (lettre majuscule en gras).

Les fonctions cosinus et sinus seront respectivement notées c et s.

La longueur et le vecteur unitaire correspondant à chaque vérin i ($\in$ [1;6]) sont respectivement notés L_i et u_i ce qui donnera :

$$B_iM_i = L_iu_i \tag{1.1}$$

De plus, avec $[x,y,z]^t$ les coordonnées du point O_M dans le repère fixe R_F, le vecteur X correspondant aux coordonnées opérationnelles est

$$X = [x,y,z,a,\beta,\gamma]^t \tag{1.2}$$

En pratique cela revient à définir les vecteurs $X_t = [x,y,z]^t$ et $X_r = [a,\beta,\gamma]^t$ qui représentent l'ensemble des translations et des rotations de la plateforme mobile de l'hexapode. Le vecteur X définit la configuration géométrique de l'hexapode et va nous permettre de définir très précisément les mouvements et les trajectoires de celui-ci.

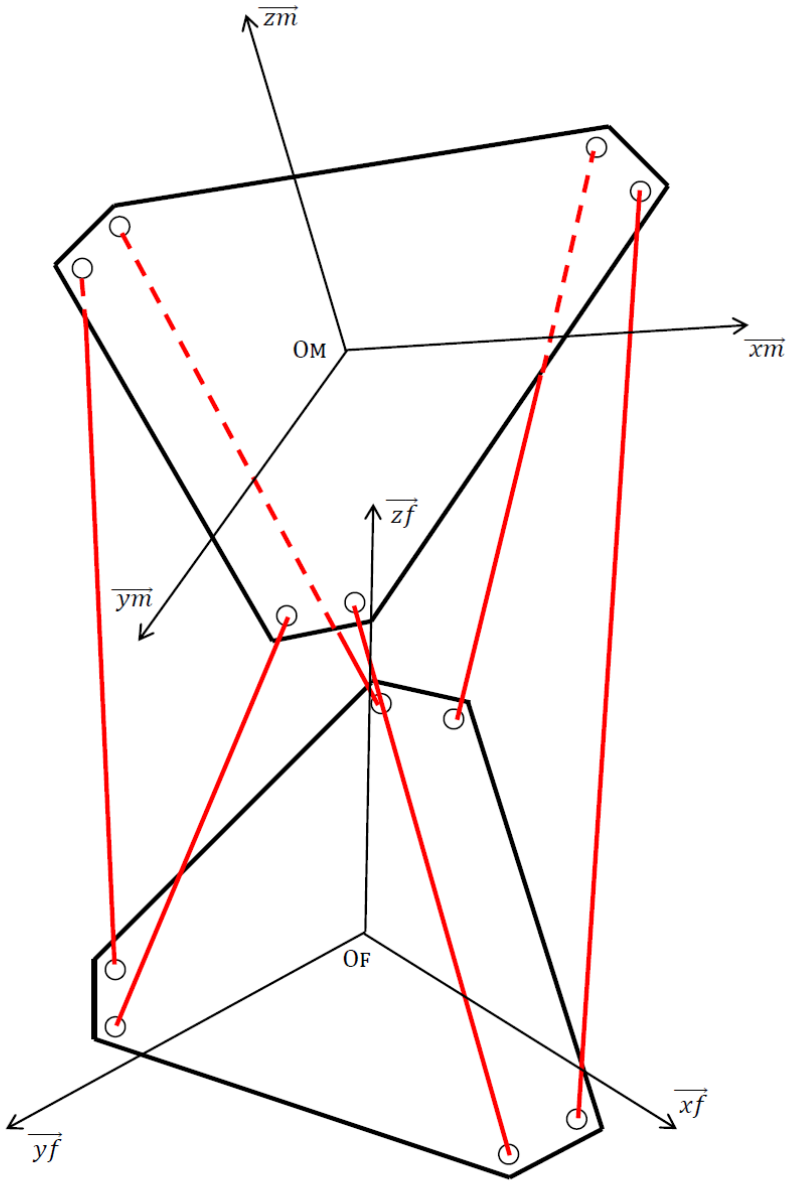


Figure 11 : Représentation schématique de l'hexapode

La première étape de la modélisation géométrique de l'hexapode consiste à définir la matrice de rotation qui va permettre de calculer les coordonnées d'un vecteur donné dans le repère mobile R_M à partir de ses coordonnées données dans le repère absolu de la base fixe R_F (Figure 11).

L'orientation de la plateforme mobile est définie à partir des angles d'Euler de type II : cette convention est couramment utilisée en aéronautique (norme concernant la mécanique du vol ISO1151). Cette convention utilise plus particulièrement les rotations autour d'axes fixes pour la construction de la matrice de rotation **R**. L'ordre des rotations est R_x, R_y, R_z. Soient *a, β, γ*, les angles correspondant au roulis (R_x), tangage (R_y) et lacet (R_z). La matrice de rotation **R** est alors donnée par

$$\mathbf{R} = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_x(\alpha),$$

$$\text{soit } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} c\gamma & -s\gamma & 0 \\ s\gamma & c\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} c\beta & 0 & s\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\beta & 0 & c\beta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\alpha & s\alpha \\ 0 & -s\alpha & c\alpha \end{pmatrix},$$

$$\text{ou } \mathbf{R} = \begin{pmatrix} c\gamma c\beta & -s\gamma c\alpha + s\alpha c\gamma s\beta & c\alpha c\gamma s\beta + s\gamma s\alpha \\ s\gamma s\beta & c\gamma c\alpha + s\alpha s\gamma s\beta & s\gamma s\beta c\alpha - s\alpha c\gamma \\ -s\beta & s\alpha c\beta & c\beta c\alpha \end{pmatrix}. \quad (1.3)$$

R représente donc la matrice de changement de base permettant le passage du repère R_M au repère R_F. Aussi, si P est un point quelconque nous pouvons écrire :

$$\overrightarrow{O_F P}|_{RF} = \mathbf{R}.\overrightarrow{O_M P}|_{RF.} \quad (1.4)$$

Ces différents repères seront utilisés pour représenter la position et l'orientation de l'organe terminal, la plateforme mobile. Nous pouvons désormais définir les modèles géométriques inverse (MGI) et direct (MGD).

Modèle géométrique inverse (MGI)

Le MGI consiste à exprimer les coordonnées articulaires en fonction des coordonnées opérationnelles. Les coordonnées opérationnelles ont déjà été fixées ($X = [x,y,z,a,\beta,\gamma]^t$) et les variables articulaires vont ici être définies par la longueur des actionneurs L_i ($i \in [1;6]$).

Soit la relation suivante correspondant à chaque vérin :

$$B_iM_{i/RF} = B_iO_{F/RF} + O_FO_{M/RF} + O_MM_{i/RF} \ .$$

En utilisant la matrice de rotation **R** définie précédemment on obtient :

$$B_iM_{i/RF} = B_iO_{F/RF} + O_FO_{M/RF} + \mathbf{R}.O_MM_{i/RM} \ . \quad (1.5)$$

Sachant que

- $O_M M_{i|RM}$ est constant
- $O_F O_M$ dépend directement des coordonnées opérationnelles X d'où $O_F O_M = f(X)$

le choix des actionneurs se reporte sur les 2 termes restants de l'équation. Ainsi,

- soit on fixe $B_i M_i$ la longueur des vérins, alors il faut pouvoir modifier la position des articulations i.e $B_i OF$.

- soit on fixe $B_i O_F$ et il faut alors pouvoir modifier la longueur des vérins $B_i M_i$.

La géométrie de notre hexapode impose cette dernière configuration dans le sens où nous ne disposons pas de rails (contrairement au simulateur ULTIMATE développé par Renault et présenté Figure 12 permettant de modifier la position des articulations $B_i O_F$. Nous obtenons donc bien une écriture du modèle géométrique inverse exprimant les coordonnées articulaires sont exprimées en fonction des coordonnées opérationnelles :

$$L_i = f(X). \tag{1.6}$$

Il est alors possible d'exprimer et de fixer chaque longueur des 6 vérins en fonction de la position souhaitée de la plateforme mobile de l'hexapode.



Figure 12 : Simulateur Ultimate/Renault où l'hexapode est monté sur un ensemble de rails (Renault, 2016)

Modèle géométrique direct (MGD)

Pour les robots parallèles type hexapode, le MGD consiste à déterminer les coordonnées opérationnelles en fonction des coordonnées articulaires. Il s'agit donc de caractériser la position et l'orientation X de la plateforme mobile en fonction des longueurs des actionneurs L_i. Cependant, la mise en place d'un tel modèle n'est pas aussi explicite que pour la modélisation géométrique inverse. La fonction f définie dans le MGI n'étant pas inversible Merlet (Merlet, 2004) a montré qu'il pouvait y avoir jusqu'à 40 solutions à ce problème) la détermination analytique du MGD peut s'avérer être difficile et lourde en temps de calcul. C'est la raison pour laquelle de nombreux auteurs ont mis en place des modèles numériques (couramment utilisés aujourd'hui dans les boucles de commande) permettant de calculer la

position et l'orientation X de la plateforme en utilisant la mesure de la longueur Li de chaque actionneur et en considérant une estimation X_0 de X à chaque pas de temps. Plusieurs méthodes numériques sont utilisées aujourd'hui, la plus employée étant la méthode de Newton-Raphson, et notons que Merlet (Merlet, 2000) a recensé et détaillé plusieurs de ces méthodes numériques.

2.1.2 Espace de travail

L'espace de travail peut être défini comme étant l'espace regroupant chaque configuration opérationnelle *X* physiquement atteignable par l'élément terminal mobile, ici la plateforme mobile. La représentation d'un tel espace, pour un robot parallèle à 6 degrés de liberté, n'est pas explicite d'autant plus qu'il faut tenir compte des couplages importants entre les translations et les rotations possibles de la plateforme. Par exemple, le calcul des translations limites va être directement lié à l'orientation de la plateforme. Merlet (Merlet, 2005) a proposé une méthode permettant d'illustrer l'espace de travail d'un robot parallèle (une représentation exacte étant rendue impossible du fait d'un espace de dimension 6) au travers de sous-ensembles de l'espace de travail, appelés « types d'espace de travail ». Sont alors définis l'espace de travail en translation, l'espace de travail à orientation constante, l'espace de travail à centre fixé, l'espace de travail maximal et enfin l'espace dextre.

- L'espace de travail en translation représente le volume défini par la position dans l'espace ou dans le plan d'un point caractéristique de la plateforme mobile.

- L'espace de travail à orientation constante représente le volume défini par les positions physiquement atteignables d'un point caractéristique de la plateforme mobile lorsque l'orientation de celle-ci est fixe.

- L'espace de travail à centre fixé représente le volume que définit l'ensemble des rotations autour d'un point caractéristique physiquement jouables par la plateforme mobile de l'hexapode lorsque la position de ce point est fixe dans le repère absolu.

- L'espace maximal représente le volume défini par l'ensemble des positions d'un point caractéristique de la plateforme physiquement atteignables pour au moins une orientation de celle-ci.

- L'espace dextre représente l'ensemble des positions d'un point caractéristique physiquement atteignables quelle que soit l'orientation de la plateforme.

Différentes méthodes permettent aujourd'hui de déterminer chacun de ces sous-ensembles de l'espace de travail, de la méthode géométrique à la méthode de discrétisation. Merlet (Merlet, 2005) a présenté des travaux très aboutis sur ces méthodes.

La caractérisation de l'espace de travail doit également tenir compte de certaines configurations particulières de l'hexapode et de sa plateforme mobile pour lesquelles celui-ci devient hors de contrôle et où les efforts subis par les articulations du mécanisme se retrouvent à tendre vers

l'infini. Les conséquences de ces configurations peuvent aller de la perte de robustesse du système à la détérioration du mécanisme et peuvent être désastreuses dans le cas d'une interaction avec un utilisateur (Merlet, 1998) . L'interprétation et le calcul de ces positions singulières peuvent être menés à partir de modèles cinématiques ou bien à partir des relations entre les forces opérationnelles et les forces articulaires (Elloumi, 2006).

2.2 Perception de mouvement

La simulation de trajectoires complexes dans le cadre d'une interaction directe avec un utilisateur induit nécessairement la notion et la perception de mouvement propre. Un simulateur de vol ou un simulateur de conduite a intégré depuis un certain nombre d'années maintenant cette notion de mouvement propre. En effet, si l'hexapode de mouvement va permettre de reproduire un maximum de trajectoires réelles, les déplacements linéaires et angulaires n'en resteront pas moins toujours limités par l'architecture mécanique du système. Si des industriels comme Renault ont rajouté des rails à leur simulateur de conduite Ultimate (Figure 12) augmentant ainsi le déplacement linéaire selon un axe, cela reste toujours infime à côté des déplacements qui vont être reproduits dans le cas d'un simulateur de vol, de conduite ou encore dans notre cas de sports de glisse. L'astuce consiste donc à tromper l'utilisateur en faisant intervenir la notion de sensation visuelle et de sensation vestibulaire pour amplifier la notion de mouvement.

Dans notre cas, ce sujet est d'autant plus important que le suivi de trajectoires complexes à l'aide de l'hexapode doit être impérativement associé à la notion de ressenti et de sensations perçus par l'utilisateur.

2.2.1 Sensation vestibulaire et visuelle

L'être humain est constitué de différents organes qui lui permettent de prendre conscience de la notion de mouvement et de déplacement dans l'espace. Parmi ces organes, on répertorie tout particulièrement la vision et le système vestibulaire auxquels peuvent venir se rajouter l'ouïe et divers récepteurs articulaires par exemple. Nous concentrerons nos efforts sur les organes les plus influents dans la perception de mouvement à savoir le système vestibulaire et la vision. En effet, la perception de mouvement chez l'être humain passe principalement par le système vestibulaire. Si les premières recherches menés par Gibson (Gibson, 1954) prenaient le pari d'affirmer que la notion de déplacement était dûe de manière prépondérante à la vision et au flux optique, plus récemment les avancées concernant les simulateurs de vol notamment par Parrish et Martin (Parrish, *et al.*, 1976) ou encore les simulateurs de conduite par Reymond et Kemeny (Reymond, *et al.*, 2001) ainsi que celui de Siegler (Siegler, *et al.*, 2001) ont mis en avant l'importance de la restitution inertielle. Encore plus récemment, Elloumi (Elloumi, 2006) et Dagdelen (Dagdelen, 2005) ont ainsi détaillé de manière significative la prise en compte de la perception de mouvement via le système vestibulaire dans le cadre de la simulation.

Sans entrer dans les détails des neurosciences, il est intéressant de considérer le système vestibulaire comme une centrale inertielle avec différents capteurs permettant de détecter des déplacements inertiels linéaires et angulaires. Nous trouvons aujourd'hui dans la littérature des

modèles mécaniques et mathématiques de l'organe vestibulaire et des éléments qui le constituent ce qui permet d'avoir une meilleure compréhension du phénomène de perception de mouvement. Nous retiendrons deux caractéristiques du système vestibulaire que nous prendrons en compte pour la conception des lois de commande du simulateur : le seuil de détection et la tilt-coordination.

En effet, il a été mis en avant la présence d'un seuil de détection des accélérations linéaires. Ce seuil a pu être mesuré par différents procédés expérimentaux (Berthoz, *et al.*, 1980) et aujourd'hui nous considérons les valeurs moyennes des seuils de perception d'échelons d'accélérations linéaires et d'échelons de vitesse linéaires comme étant égales respectivement à 5 $cm.s^{-2}$ et 21 $cm.s^{-1}$. Il faut cependant garder à l'esprit que ces valeurs représentent simplement une moyenne du fait que la perception est utilisateur-dépendante et reste subjective puisque donnée par l'utilisateur. Aussi, nous proposerons au travers d'une méthode expérimentale nouvelle et grâce à l'hexapode une palette de tests permettant de caractériser précisément le seuil de détection limite des accélérations linéaires pour chaque utilisateur susceptible d'utiliser le simulateur. Ce seront alors ces valeurs qui seront utilisées dans le système de commande et de pilotage de l'hexapode de manière à proposer une perception des sensations la plus réaliste possible.

La tilt coordination est un principe né en 1970 (Parrish, *et al.*, 1975) qui est basé sur la perception d'une accélération linéaire au travers d'une rotation physique (perception basée sur les canaux semi-circulaires présents dans le système vestibulaire). Un cas particulier permet d'expliciter clairement en quoi consistent la mise en place et l'utilisation de la tilt coordination. Supposons que la plateforme supérieure mobile de l'hexapode s'incline d'un angle θ autour de l'axe de tangage avec une vitesse de rotation inférieure au seuil de détection des canaux semi-circulaires ($< 3°/s$) et que les indices visuels ne permettent pas de « voir » cette inclinaison. Alors la personne sur l'hexapode va « ressentir » une accélération longitudinale (selon l'axe X) d'une amplitude égale à $g.sin\theta$. Nous pourrons considérer par la suite l'amplitude de l'accélération longitudinale ressentie égale à $g.\theta$ après approximation pour un angle θ petit.

Aussi, si l'organe vestibulaire va nous permettre de tromper l'utilisateur en lui procurant la sensation de mouvement propre, celui-ci devra impérativement être accompagné de stimuli visuels mettant ainsi en place la cohérence des récepteurs sensoriels. En effet, si nous considérons le système vestibulaire comme un générateur de sensations, ces sensations ne pourront être ressenties comme réelles de la part de l'utilisateur uniquement si les récepteurs sensoriels tels que les yeux perçoivent également une illusion de mouvement. Il s'agira dans la cadre de la conception du simulateur de surf de prévoir un système permettant de plonger l'utilisateur dans un monde virtuel (lunettes de réalité virtuelle) où chaque mouvement généré ou provoqué par l'hexapode devra être synchronisé avec les mouvements du monde virtuel.

2.2.2 Stratégies de commande pour la restitution inertielle

L'objectif principal d'un simulateur est de reproduire les sensations de déplacement et de mouvement chez l'utilisateur à défaut de pouvoir reproduire exactement le déplacement réel. En effet, il apparaît indispensable de considérer que les mouvements physiques de la plateforme mobile seront limités par l'architecture mécanique de l'hexapode (limites de position, limites de vitesses et limites d'accélérations notamment). Aussi si nous ne pouvons pas reproduire exactement le mouvement réel, une restitution partielle reste possible. C'est dans ce contexte qu'apparaît alors la stratégie de commande dont découlent les Algorithmes de Restitution Inertielle (ARI).

La stratégie de commande correspond à la partie du logiciel de simulation définissant les lois de commande permettant de piloter la plateforme mobile à travers le pilotage des 6 vérins. Etant donnés les déplacements très limités du simulateur, le principal défi concerne la restitution inertielle. En ce qui concerne les simulateurs de conduite, Elloumi (Elloumi, 2006) a défini la restitution inertielle comme la reproduction dans le simulateur des indices vestibulaires qu'engendrerait la conduite d'un vrai véhicule.

Nous étendrons cette définition pour l'adapter à notre problématique : nous définissons alors la restitution inertielle comme la transformation des trajectoires complexes réelles d'une planche de surf réalisant une figure dans l'eau en trajectoires réduites jouables par l'hexapode. Cette transformation passe alors par la mise en place d'un ARI et devra répondre à un cahier des charges (CdC) composé de deux parties :

- CdC physique qui correspond aux mouvements physiques limités par l'architecture mécanique de l'hexapode,

- CdC perceptif qui correspond aux sensations de mouvements et de déplacements induites par l'hexapode. Le système vestibulaire étant sensible aux accélérations linéaires et aux vitesses angulaires (donc aux forces), ce sont donc ces quantités qui contribueront à définir une trajectoire (dans le cadre de la restitution inertielle).

Afin de compenser la connaissance actuelle imparfaite du système de perception humain, quatre principales techniques de développement d'un ARI ont été développé (classique, adaptatif, optimal et prédictif). Chaque stratégie de commande repose sur les deux mêmes concepts de base cependant, alors que la plateforme mobile de l'hexapode va reproduire les déplacements dans la mesure de son architecture mécanique, le concept de « retour en position neutre » (dans la littérature parfois dit « de washout ») va permettre de ramener sans cesse la plateforme à une position initiale de manière imperceptible pour éviter tout conflit sensoriel. Le deuxième concept basé sur la tilt coordination a pour but de reproduire des accélérations longitudinales et latérales au travers de rotations autour des angles de roulis et de tangage. La technique classique va être présentée en détail par la suite car bien que surpassée aujourd'hui dans le cadre de simulateur de vol ou de conduite, les principes qui sont appliqués dans cette stratégie de commande vont pouvoir être utilisés dans le cadre du simulateur de surf.

2.2.3 Stratégie classique

Schmidt et Conrad (Schmidt, *et al.*, 1970) ont été les premiers à avoir proposé, en l'occurrence pour la plate-forme de simulation de Gough-Stewart de la NASA, une approche de restitution inertielle à partir de la méthode de séparation fréquentielle. Ainsi, nous pouvons adapter cette stratégie de commande à la problématique du projet SIMUSURF. Le mouvement réel de la planche de surf peut être séparé en deux parties : les mouvements de translation (qui seront définis par l'accélération linéaire réelle a_r) et les mouvements de rotation (qui seront définis par la vitesse de rotation réelle ω_r). En ce qui concerne les trajectoires réelles d'une planche de surf, nous séparerons les mouvements lents (soutenus) des mouvements rapides et instantanés. Au vu des contraintes en déplacement de la plateforme mobile, seuls les déplacements instantanés pourront être reproduits. Cependant, en ce qui concerne les accélérations soutenues latérales et longitudinales, la technique classique consiste à utiliser la coordination pour restituer ce mouvement en restituant la partie « basses fréquences ». Un filtre passe-haut est, quant à lui, utilisé pour les déplacements verticaux. Nous distinguons alors :

- les accélérations linéaires (hautes fréquences).
- les vitesses de rotation réelles (hautes fréquences).
- la coordination (qui n'est rien d'autre que l'influence de la gravité et qui permet pour les modes longitudinal et latéral de reproduire les basses fréquences).

Même s'il apparaît que c'est une technique qui est relativement facile à mettre en place, le réglage et la détermination des différents coefficients et paramètres se trouvent être longs. En effet, ils sont déterminés de manière expérimentale en essayant de réduire les erreurs au maximum et la subjectivité de l'utilisateur rajoute une dépendance à l'utilisateur qui doit pouvoir être paramétrable. Nous rappelons également que la plateforme mobile doit revenir en permanence à une position neutre de manière imperceptible (mouvements en dessous du seuil de détection) : afin notamment d'éviter le blocage des vérins au niveau des butées minimales et maximales.

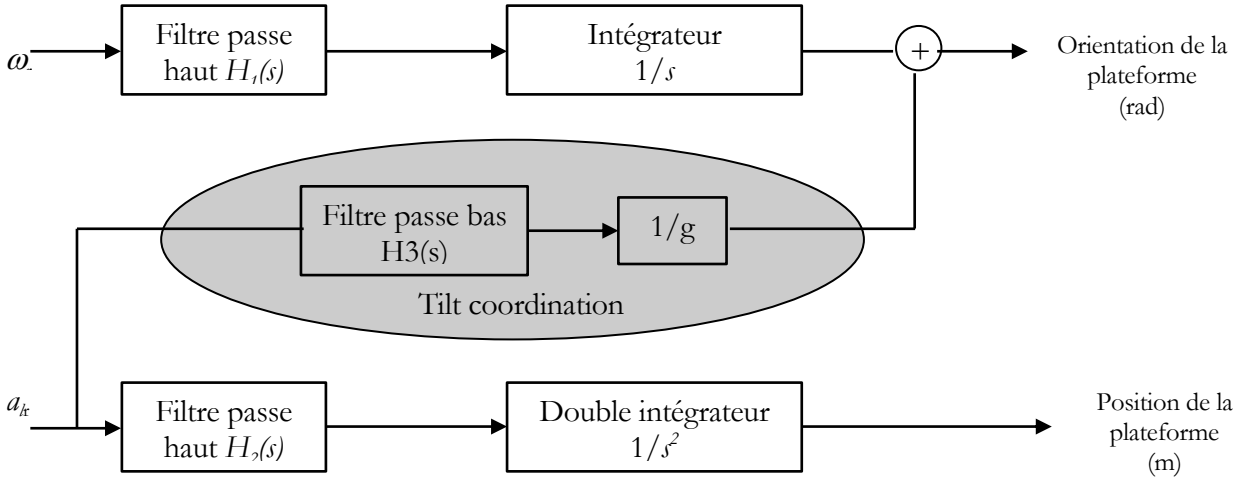


Figure 13 : Architecture d'un ARI classique

Les fonctions de transfert de la Figure 13 sont définies par

$$H_1(s) = \frac{K1\,.\,s}{s + \alpha}$$

$$H_2(s) = \frac{K.s^2}{s^2 + 2.\xi.\omega.s + \omega^2}$$

$$H_3(s) = \frac{K_R}{(t1.s + 1)(t2.s + 1)}$$

De manière à illustrer l'application et l'intégration d'un tel système de commande, nous considérons un mouvement réel de translation uniquement et défini par une accélération linéaire. Cela peut correspondre à un surfeur évoluant sur une vague sans perturbations. On obtient alors le schéma suivant :

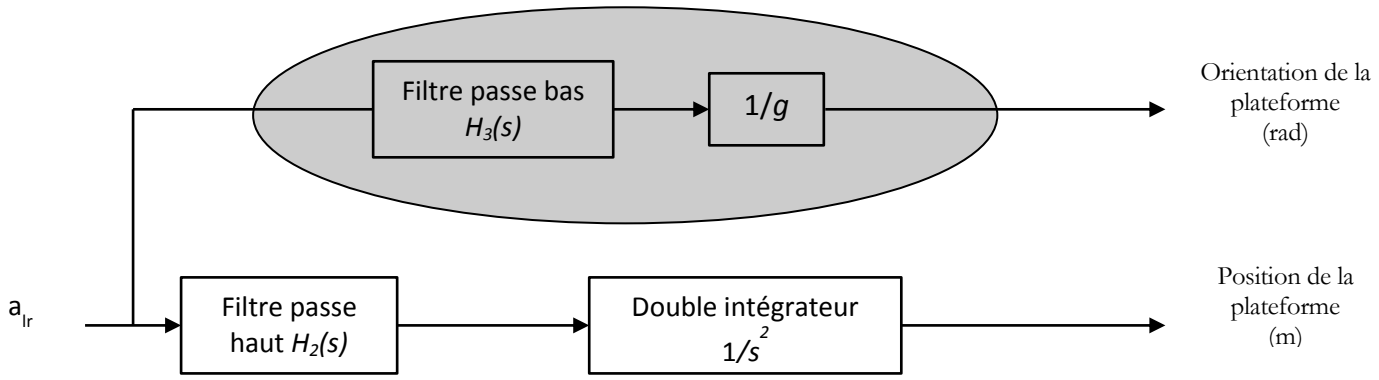


Figure 14: Architecture d'un ARI classique pour une translation longitudinale

Où :

a_{lr} = accélération linéaire longitudinale de référence

$$H_2(s) = \frac{K.s^2}{s^2 + 2.\xi.\omega_2.s + \omega^2}$$

$$H_3(s) = \frac{K_R}{(t1.s + 1)(t2.s + 1)}$$

Après la double intégration pour obtenir la position X et en considérant le régime permanent, l'expression suivante va nous permettre de régler la pulsation caractéristique :

$$\omega_2{}^2 = \frac{K.a_{lr}}{X_{limite}}$$

L'hexapode de mouvement utilisé pour la simulation possède des caractéristiques bien précises en termes de performances et d'espace de travail. Le Tableau 2 résume les principales caractéristiques de l'hexapode.

Tableau 2 : Caractéristiques limites de l'hexapode utilisé

Degrés de liberté	Courses	Vitesses	Accélérations
Mouvement linéaire TX / Surge	± 400 mm	± 1450 mm/s	± 10 m/s²
Mouvement linéaire TY / Sway	± 400 mm	± 1450 mm/s	± 10 m/s²
Mouvement linéaire TZ / Heave	± 300 mm	± 1000 mm/s	± 8 m/s²
Mouvement angulaire RX / Roll	± 30 °	± 50 °/s	± 500 °/s²
Mouvement angulaire RY / Pitch	± 30 °	± 50 °/s	± 500 °/s²
Mouvement angulaire RZ / Yaw	± 40 °	± 70 °/s	± 700 °/s²

(1) Les déplacements sont indiqués avec le centre de rotation situé au centre du plateau supérieur
(2) Déplacements axes par axes, les autres étant à mi-course

Pour un mouvement linéaire TX, nous pouvons déterminer la vitesse de rotation ω_2.

$$\omega_{2limite} = 3{,}54\ rad/s$$

Ainsi, les déplacements X de la plateforme permettent ici de reproduire les mouvements instantanés. Pour ce qui est des mouvements lents, la tilt coordination est utilisée.

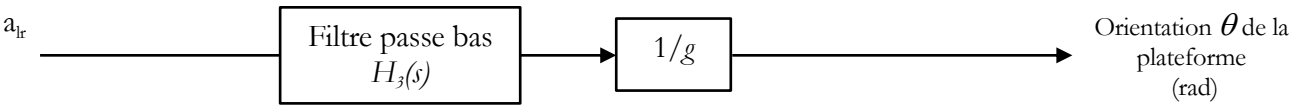


Figure 15 : Tilt coordination dans le cas d'un mouvement longitudinal

Il est important de rappeler que, pour que la tilt coordination soit effective, la vitesse de rotation doit être inférieure au seuil de détection des canaux semi-circulaires (<3°/s) et que les indices visuels ne doivent pas permettre de « voir » cette inclinaison. Pour déterminer les paramètres (ramenés à une pulsation w_{tilt}) de la fonction de transfert H_3, nous devons donc d'un côté optimiser la somme d'accélérations restituées directement et par tilt coordination pour être le plus proche de l'accélération réelle et dans le même temps nous devons avoir une vitesse de rotation induite par coordination inférieure au seuil de détection du système vestibulaire.

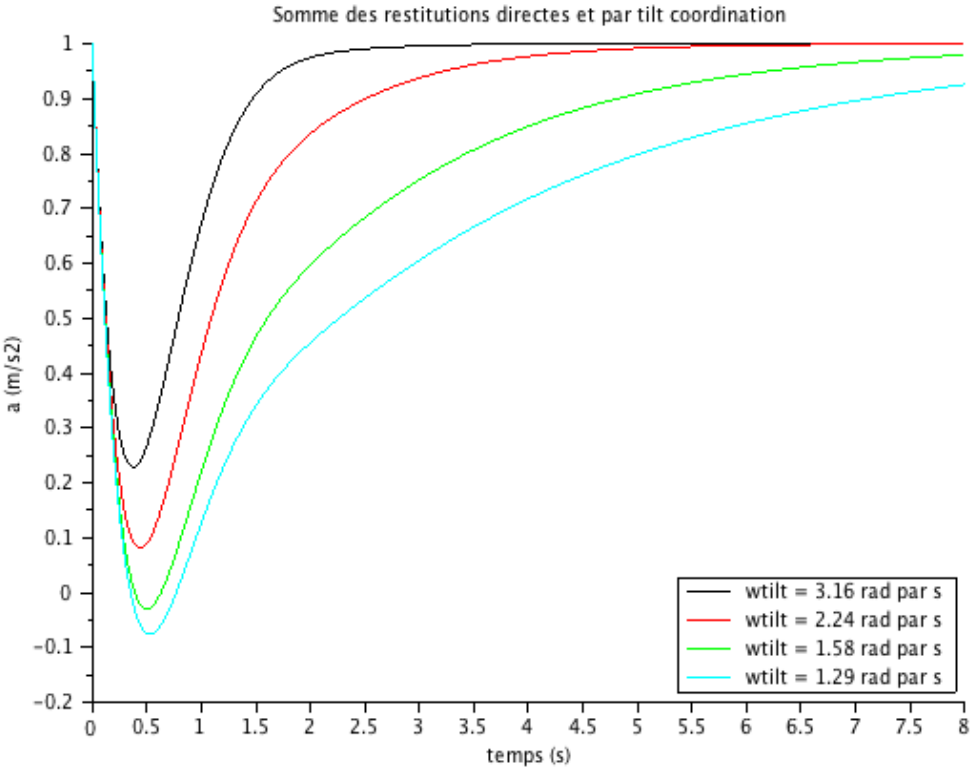


Figure 16 : Variation de l'accélération restituée par tilt coordination en fonction de w_{tilt}

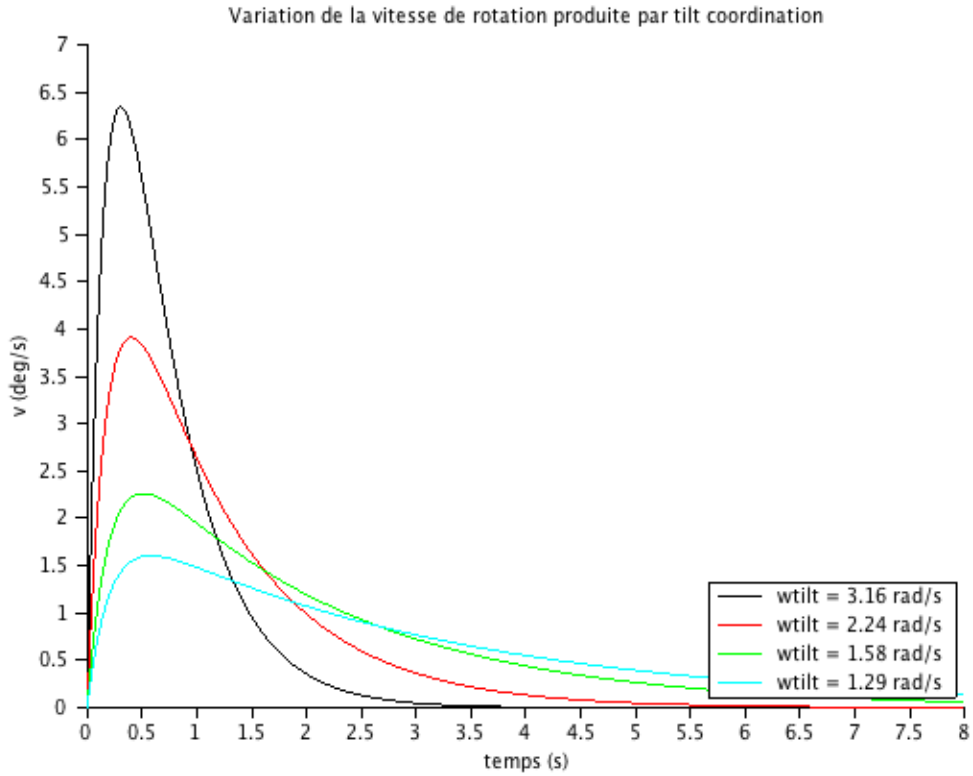


Figure 17 : Vitesse de rotation produite par tilt coordination en fonction de w_{tilt}

Au vu de la Figure 16, il apparaît qu'augmenter la borne supérieure de la plage de fréquences restituées par tilt coordination permet de diminuer la différence entre le créneau d'accélération d'entrée et la somme des restitutions. Autrement dit, l'accélération d'entrée est reproduite avec une plus grande fidélité. Cependant, si nous prenons en considération la Figure 17, nous remarquons que pour w_{tilt} égal à 3.16 rad/s et w_{tilt} égal à 2.24 rad/s la vitesse de rotation induite par la branche de la tilt coordination est supérieure au seuil de perception humaine qui a été fixé à 3°/s. Ainsi, les vitesses d'inclinaison de la plateforme de l'hexapode étant supérieures au seuil de détection des canaux semi-circulaires, la technique dite de tilt coordination perd alors tout son sens. Il est donc nécessaire de trouver un compromis entre les différents paramètres des filtres pour obtenir une solution optimale.
Un exemple d'optimisation pour un mouvement longitudinal et correspondant aux limites physiques de l'hexapode utilisé pour le projet SIMUSURF a pu être proposé en considérant les paramètres suivants :

$$Kr = 1$$
$$t1 = 0.2 \text{ s}$$
$$t2 = 1.45 \text{ s} \quad \text{pour } H_3(s) \text{ et}$$

$$K = 1$$
$$\xi = 0.75$$
$$\omega = 3.54 \text{ rad/s} \quad \text{pour } H_2(s).$$

Différentes caractéristiques ont alors été analysées avec pour chacune un critère de validation précis :

- L'accélération restituée par tilt coordination : elle doit permettre de reproduire le plus fidèlement possible les basses fréquences de l'accélération réelle.

- La somme des accélérations restituées (directement et par tilt coordination) : elle doit être la plus proche de l'accélération réelle.

- L'angle d'inclinaison de la plateforme : il est limité par l'architecture mécanique de l'hexapode (cf. espace de travail).

- La vitesse de rotation induite par la tilt coordination : elle doit être inférieure aux seuils de perception humains (dépendent de l'utilisateur, ce critère se doit d'être approfondi par une méthode expérimentale robuste).

- Le déplacement de la plateforme : limité également par l'architecture mécanique de l'hexapode (cf. espace de travail).

2.3 Problématiques liées à l'utilisation d'un simulateur

Les deux grandes familles de simulateur considérées aujourd'hui comme des exemples dans le domaine de la reproduction de mouvement sont les simulateurs de vol et les simulateurs de conduite. Historiquement, les simulateurs de vol sont les premiers outils apparus dans le

paysage de la simulation de mouvement en environnement contrôlé. Les premiers simulateurs de conduite ont été élaborés en modifiant la réalité virtuelle et l'habitacle d'un simulateur de vol. Si ces premiers simulateurs de conduite se sont considérablement inspirés des simulateurs de vol sur le plan de l'architecture mécanique et de la commande, des limites sont vite apparues. Elloumi (Elloumi, 2006) a défini les principales différences entre la simulation de vol et la simulation de conduite tout particulièrement. En effet, le cahier des charges définissant les stratégies de commande à adopter fait apparaître de nombreuses différences dans la conception à la fois software et hardware du simulateur. Dans les principales différences peuvent être notées les suivantes (sans être exhaustives) :

- Les bandes passantes des simulateurs seront différentes selon la simulation de vol ou la simulation de conduite. En effet, dans le cas de la simulation des mouvements d'un avion, ces derniers sont sensiblement plus lents en comparaison à l'alternance de freinages/accélérations à reproduire dans le cas d'un simulateur de conduite (Elloumi, 2006).

- L'environnement extérieur n'est en aucun point similaire. D'un point de vue de la simulation et de la reproduction d'un environnement réaliste, il est important de considérer l'interaction avec ce dernier. Un simulateur de conduite doit être capable de reproduire l'interaction avec la route et les sensations et actions mécaniques que celle-ci produit sur le cockpit de commande. De plus, un simulateur de conduite doit être capable de reproduire l'environnement réel d'un véhicule en considérant notamment les autres usagers de la route. Autant de problématiques qui n'ont pas eu à être abordées dans le cadre de la simulation de vol. Par ailleurs, la simulation de la portance et de la trainée de l'air est éloignée de la simulation des actions mécaniques de la route à la fois en terme d'amplitude et de fréquences. Les modèles de commande et les algorithmes de pilotage sont donc indépendants et non corrélables.

- Le comportement d'un pilote d'avion n'est pas similaire au comportement d'un conducteur de voiture. Les moyens de contrôle de l'habitacle (boutons, interrupteur, commandes manuelles et automatiques, …) sont plus nombreux et plus complexes dans un simulateur de vol que dans un simulateur de conduite.

Ces principales différences de caractéristiques et de problématiques liées à la mise en place et l'utilisation d'un simulateur peuvent être transposées à la problématique du projet SIMUSURF.

En effet deux principales spécificités font qu'un simulateur de surf ne peut de manière que très limitée se référer aux architectures mécaniques et logicielles des simulateurs de vol ou de conduite déjà existants. La première étant que dans le cadre de la simulation de mouvement d'un pratiquant de sport de glisse, celui-ci ne peut pas être placé dans un habitacle identique à son environnement de pratique. Il ne peut être relié au simulateur de glisse que par l'intermédiaire de son support de glisse (ici la planche de surf). L'interaction entre l'utilisateur (le surfeur) et l'environnement (la vague) est directe. La commande du simulateur passe ainsi par une commande en effort imposée par les mouvements de l'utilisateur sur le simulateur.

Tandis que les simulateurs de vol et de conduite définissent le retour d'effort comme étant le retour fourni à l'utilisateur, dans le cadre du projet SIMUSURF, la commande ne peut être réalisée par un actionneur et le retour d'effort ne suffit pas. Dans ce cas, l'actionneur sera l'utilisateur lui-même. La seconde spécificité réside dans le fait que l'environnement (la vague) est en mouvement permanent et n'est pas prévisible. De ce fait, les objectifs de simulation et de commande du simulateur de sports de glisse, et plus particulièrement de surf, doivent permettre de travailler sur deux verrous scientifiques précis :

- l'interaction directe entre les efforts et mouvement d'un utilisateur et un simulateur,
- la prise en compte d'un environnement marin complexe et en mouvement perpétuel.

3 Commande d'un simulateur : interactions homme/machine

3.1 De l'hexapode à commander au système de commande

Un système peut être défini comme un ensemble au comportement dynamique sollicité par des entrées extérieures au système et générant des sorties. On distingue deux types d'entrées, celles qui sont imposées (objectifs, commande) et celles qui sont subies (perturbations, bruit). Dans le cas d'un robot parallèle de type hexapode, nous pouvons définir les sorties de ce système comme étant les déplacements de la plateforme mobile. Les lois de commande qui sont alors mises en place nous permettent de maîtriser l'évolution de la plateforme en tenant compte de la connaissance du système. Ces lois de commande sont mises en place en fonction d'un cahier des charges précis définissant notamment les spécifications de performance, les contraintes, les objectifs et les évolutions du contexte (contexte jouant un rôle important dans le cadre de la conception d'un simulateur où le milieu ambiant, l'environnement de l'utilisateur peut s'avérer très différent du milieu ambiant de l'hexapode). Aujourd'hui, les commandes sont divisées en deux catégories, les proprioceptives et les extéroceptives. Lorsque les commandes proprioceptives vont utiliser des capteurs internes au système commandé, les extéroceptives vont utiliser des capteurs extérieurs.

Les stratégies de commande envisagées dans le cadre du simulateur de sports de glisse vont devoir permettre, dans un premier temps, de reproduire des trajectoires définies par les données (commandes, déplacements et efforts) issues de la phase d'identification expérimentale. On parlera alors ici de suivi de trajectoires. Dans un deuxième temps, l'objectif de commande ne concernera plus le suivi mais la génération de trajectoires. En effet, la réaction des efforts réalisés par l'hexapode sera utilisé pour simuler la réaction mécanique du milieu aqueux sensé porter le surf. Le surfeur, l'utilisateur du simulateur, sera alors maître de la trajectoire. C'est cette dernière stratégie de commande qui représente un défi et un des verrous scientifiques majeurs à lever. Si ce type de pilotage est assez novateur il faut noter le dispositif d'entrainement à la mêlée pour des joueurs de rugby développé par Thalès (Lacome, 2013). Ce simulateur intègre une plateforme de simulation de type hexapode

sur laquelle est monté un joug d'entraînement équipé de capteurs d'effort et d'un dispositif numérique de commande incluant un modèle de la réaction des joueurs adverses. Si les objectifs du simulateur sont similaires (mesure d'efforts et asservissement en fonction de ces derniers), les contraintes, les perturbations et la prise en compte de l'environnement du milieu aqueux vont imposer un comportement dynamique plus complexe.

Les stratégies de commande étant bien identifiées (suivi de trajectoires d'une part et pilotage en effort de l'autre), et dans le but de s'affranchir dans un premier temps des phénomènes de couplage dynamique existants entre les différents actionneurs de l'hexapode, les premières études de comportement et d'implantation des stratégies de commande envisagées ont été intégrées sur un 7ème vérin. Ce 7ème vérin est celui dont les caractéristiques ont été présentées précédemment en introduction. L'architecture de programmation de ce vérin est relativement libre et ouverte, elle permet d'implémenter et de tester facilement différentes fonctionnalités de commande.

Le processus de mise en place des systèmes de commande du 7ème vérin peut se découper en trois étapes : identification, définition et implantation. L'identification du comportement dynamique du 7ème vérin utilise des mesures et données physiques. Ensuite, la définition d'une loi de commande est effectuée en fonction du modèle défini à l'étape précédente et en fonction du cahier des charges des stratégies de commande envisagées. Enfin, l'implantation physique de la loi de commande dans le vérin utilise des procédés numérique, algorithmique et analogique propre au système.

3.1.1 Modèle de comportement

L'objectif de l'identification d'un modèle est de parvenir à construire un modèle numérique reproduisant le comportement dynamique du procédé. La Figure 18 présente le principe du contrôleur du 7ème vérin

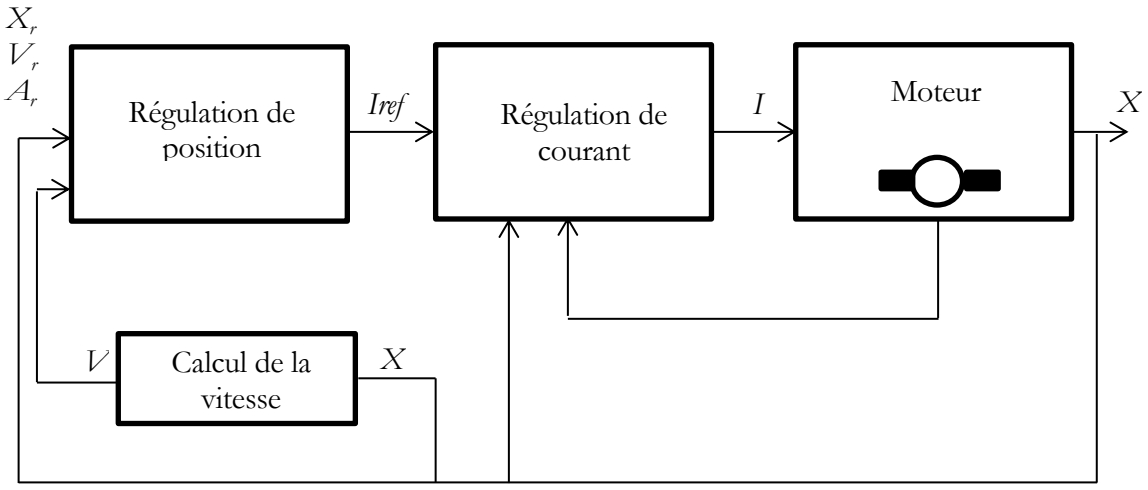


Figure 18 : Principe du contrôleur ETEL (Etel Motion Technologie, 2011)

La boucle de position calcule le courant de référence à partir des positions, vitesses et accélérations de référence. Cette force est alors transmise à la boucle de courant qui génère alors le courant envoyé aux phases du moteur générant ainsi le déplacement X du vérin.

De plus, les fonctionnalités de ce 7ème vérin permettent de rendre inactive la boucle de position et de piloter le déplacement non plus en fonction de la position, vitesse et accélération de référence mais directement à partir du courant de référence. Il s'agit du mode « Force référence mode ».

Il est important de préciser que le courant I (en A) est ici proportionnel à la force F (en N) :

$$F = Kt.I \tag{1.7}$$

avec K_t = 81.4 N/A.

Aussi il n'est pas rare de voir les raccourcis faits par la suite entre consigne en courant/consigne en effort qui pour l'architecture de commande du 7ème vérin représente la même donnée à un coefficient prêt. C'est uniquement ce mode de pilotage du 7ème vérin «Force référence mode» qui est ici modélisé (Figure 19).

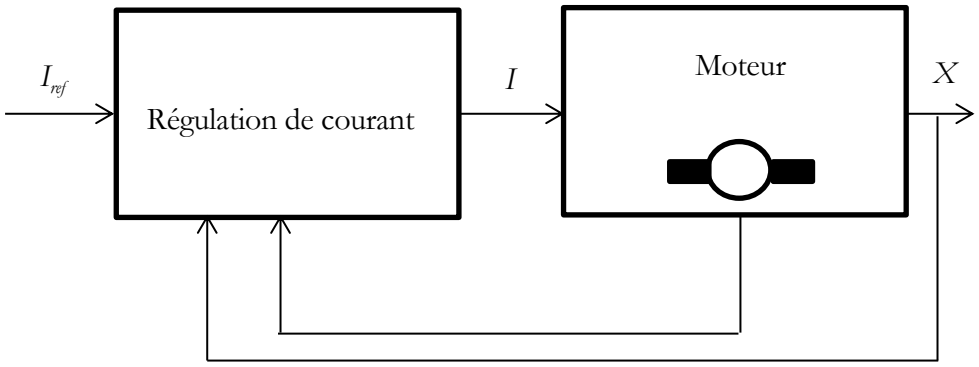


Figure 19 : Mode « Référence Force »

Pour la mise en place d'un modèle de comportement des différents éléments de la Figure 19, la consigne d'entrée (*Iref*), le courant mesuré (*I*) et le déplacement du vérin X (en m) ont été obtenues grâce à un système d'acquisition interne au 7ème vérin.

Les Figure 21 et Figure 22 présentent les modèles développés et dont les paramètres ont été identifiés afin de pouvoir reproduire des données expérimentales enregistrées.

La Figure 20 représente un exemple de mesures expérimentales utilisées pour l'identification du procédé.

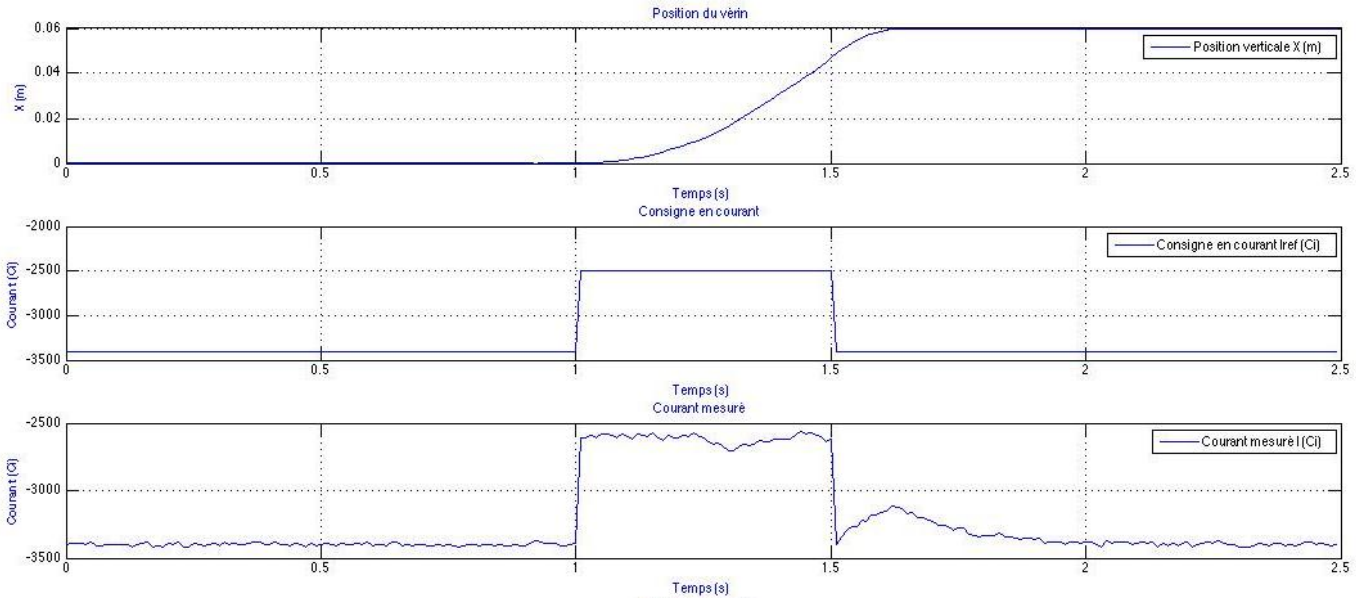


Figure 20 : Mesures expérimentales pour l'identification du procédé

Les Figure 21 et Figure 22 représentent les différents blocs identifiés.

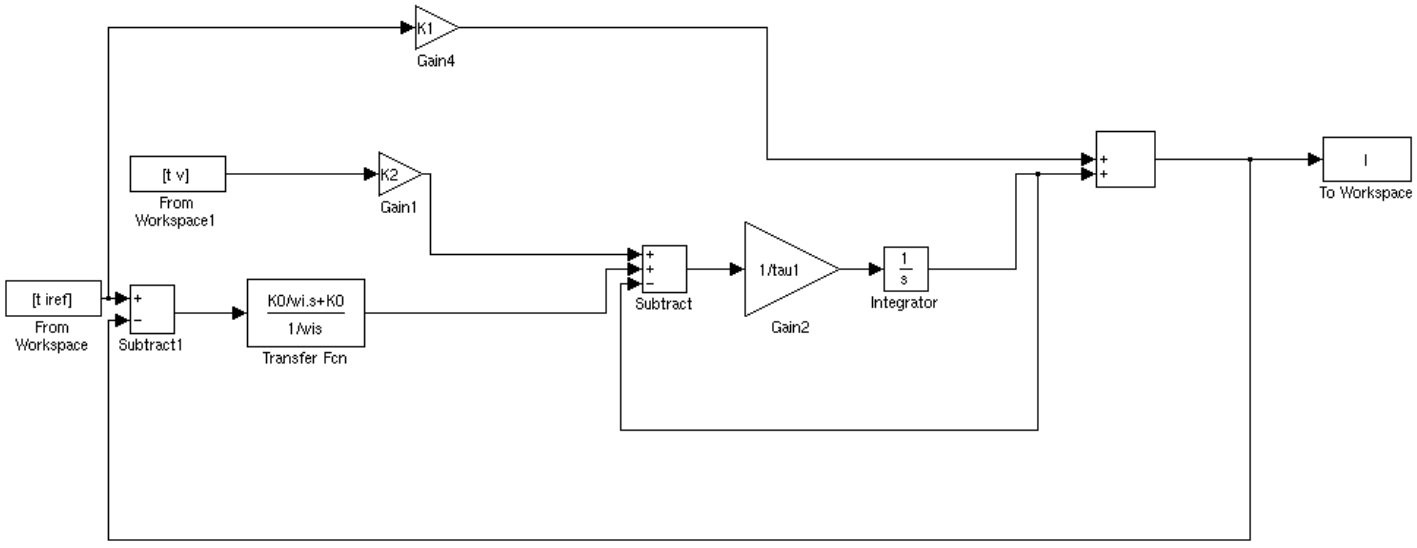


Figure 21 : Identification du bloc « régulation de courant »

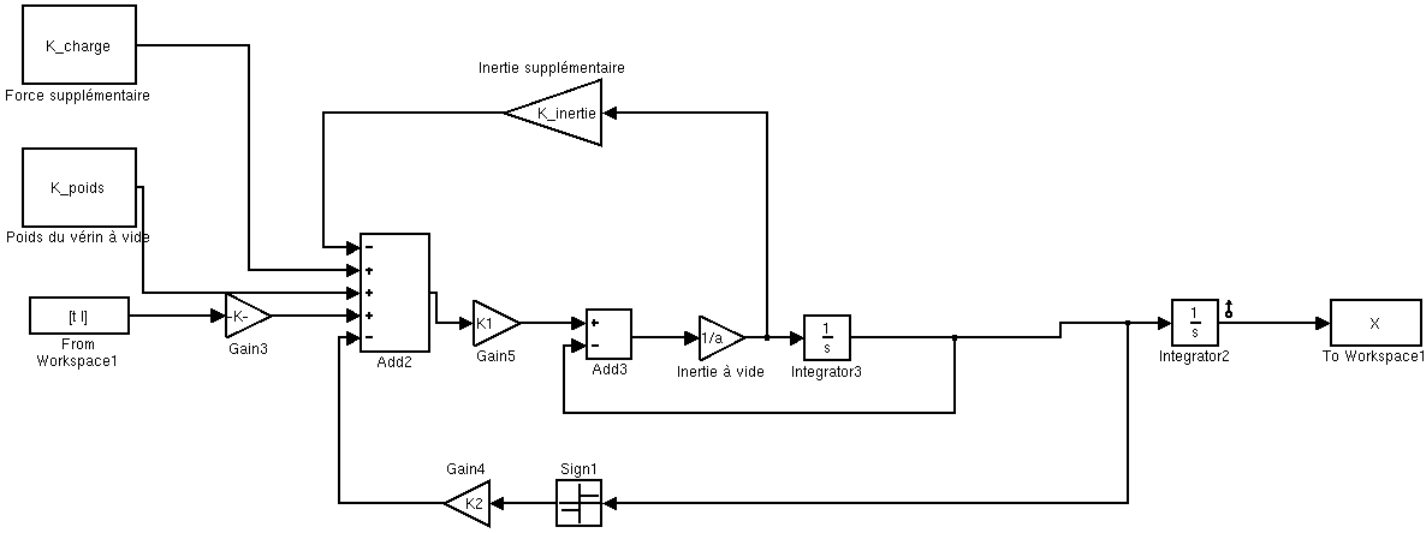


Figure 22 : Identification du bloc « moteur »

La comparaison des mesures expérimentales *I* et *X* avec les résultats de la simulation pour la même consigne d'entrée I_{ref} permet de valider le modèle identifié du comportement dynamique du vérin (Figure 23 et Figure 24).

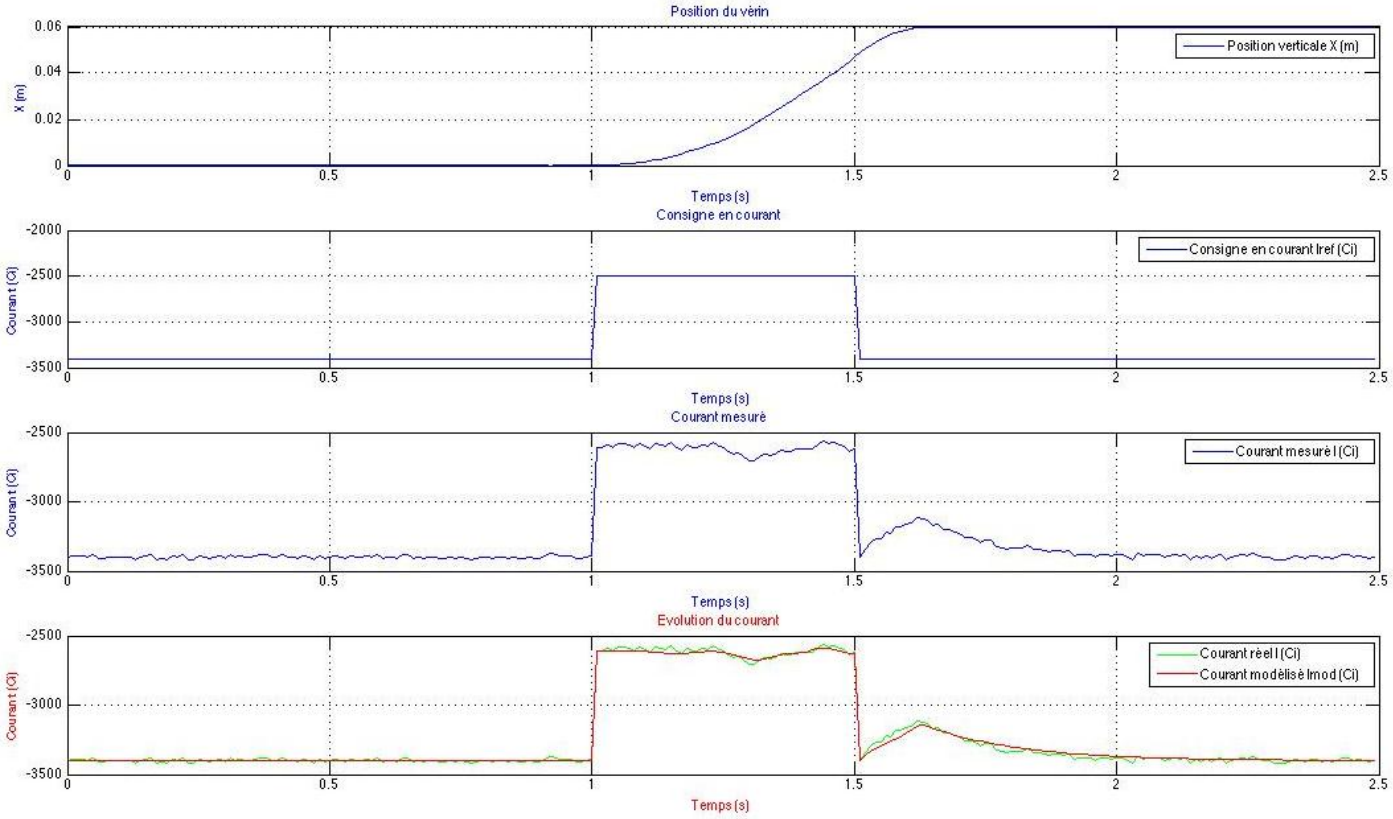


Figure 23 : Comparaison « Courant mesuré » et « Courant modélisé »

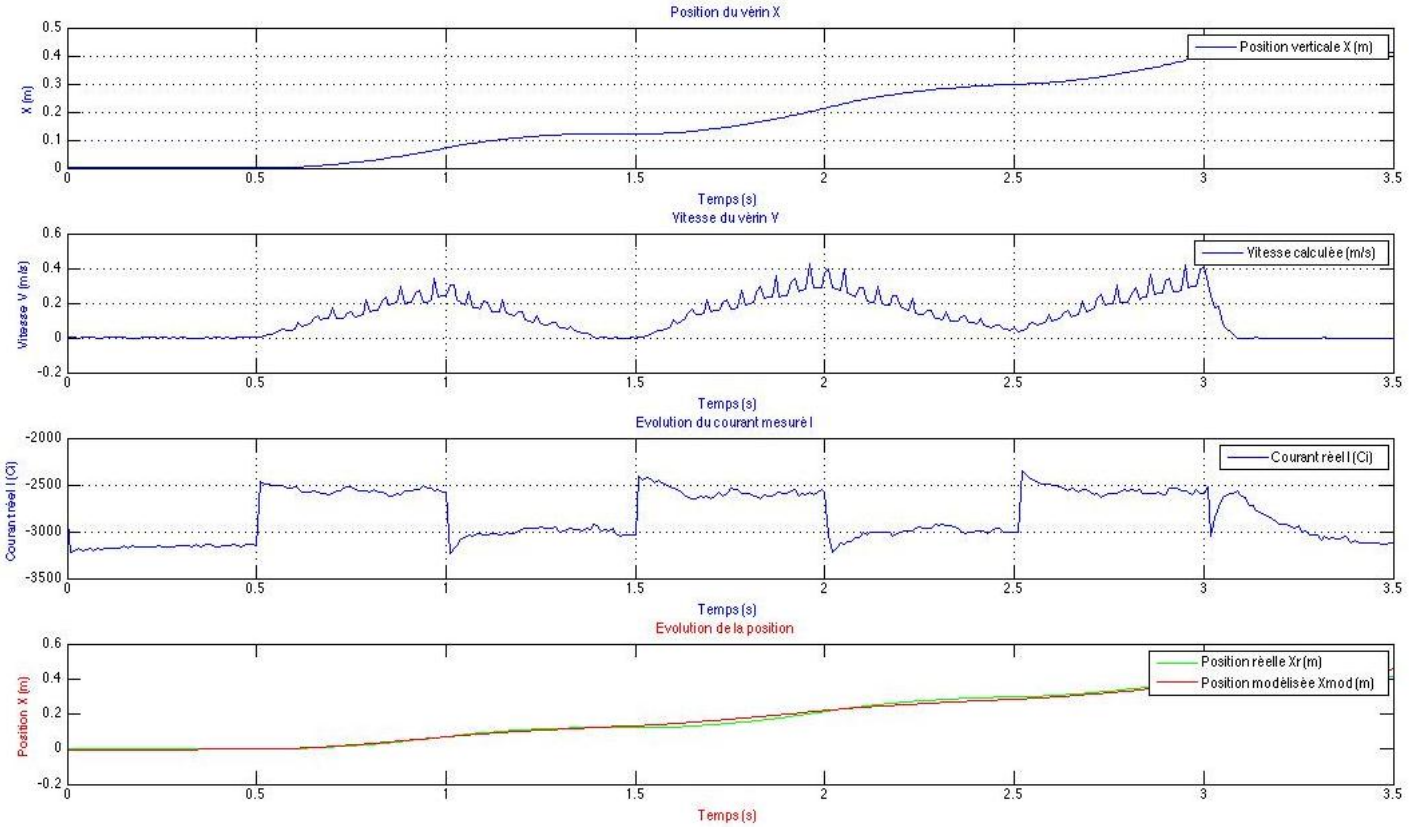


Figure 24 : Comparaison « Position réelle » et « Position mesurée »

3.1.2 Synthèse d'une loi de commande mathématiques

Le modèle du comportement dynamique du système obtenu est utilisé pour proposer et définir les lois de commande principales qui correspondent à nos objectifs de commande globale à savoir d'une part le suivi de trajectoires et d'une autre part la génération de trajectoires à partir de l'effort de l'utilisateur/surfeur. La première loi de commande correspond ainsi à un asservissement en position du système avec une consigne d'entrée représentant le déplacement souhaité. La seconde loi de commande est représentative d'un asservissement en effort avec une consigne d'entrée correspondant à l'effort souhaité. Dans les deux cas, l'objectif de la loi de commande est d'asservir l'évolution de la sortie du vérin aux variations de la consigne, de générer des performances conformes au cahier des charges et d'assurer des performances indépendantes de l'état réel du vérin (variations, incertitudes paramétriques). Afin d'asservir le vérin en position tout en considérant les performances de précision, rapidité et stabilité définies par le cahier des charges, le régulateur couramment utilisé de nos jours dans le monde industriel est un régulateur PID. Un correcteur PID(F) permet de conjuguer à la fois une action proportionnelle, intégrale, dérivateur ainsi qu'une action de filtrage assurant un gain décroissant du régulateur en haute fréquence.

Dans le cadre global du projet SIMUSURF, l'objectif de la conception de ce régulateur est avant tout de montrer la faisabilité de programmer, extérieurement au système de commande

du 7ème vérin, un bloc de régulation permettant de générer un signal de commande externe qui viendra être injecté dans la boucle de courant défini précédemment. Que ce soit pour l'asservissement en position ou l'asservissement en effort, Quoiqu'il en soit, la synthèse et le calcul des paramètres des différents régulateurs qui seront mis en place adopte une méthodologie classique avec un régulateur PID(F) défini par une fonction de transfert *K(p)* (Sabatier, *et al.*, 2015).

$$K(p) = K_0 \underbrace{\frac{1+p/\omega_i}{p/\omega_i}}_{K_I} \underbrace{\frac{1+p/\omega_1}{1+p/\omega_2}}_{K_D} \underbrace{\frac{1}{1+p/\omega_f}}_{K_F} \tag{1.8}$$

Suivant la bande de fréquence, différents effets peuvent être dissociés :

$\omega \in]0 , \omega_i]$: effet intégrateur

$\omega \in [\omega_i , \omega_1]$: effet proportionnel

$\omega \in [\omega_1 , \omega_2]$: effet dérivateur

$\omega \in [\omega_2 , \omega_f]$: effet amplicateur

$\omega \in [\omega_f , \infty[$: effet filtre passe-bas

Pour déterminer successivement ω_i, ω_f, ω_1, ω_2, puis K_0 en fonction du cahier des charges, les relations suivantes sont utilisées :

- la pulsation ω_u au gain unité en BO étant proche de la fréquence de coupure en BF, on la choisit de l'ordre de $3/t_r$ avec t_r le temps de réponse souhaité et défini dans le cahier des charges
- la pulsation ω_i est alors définie par $\omega_i = \omega_u / 5$ pour un effet intégral efficace
- la pulsation ω_f est également définie par $\omega_f = \omega_u . 5$.

ω_1 et ω_2 sont déterminés en fonction de l'avance de phase ϕ_m à apporter afin que la marge de phase $M\phi$ soit satisfaisante. Pour régler l'avance de phase, un paramètre a est utilisé tel que :

$$\omega_1 = \omega_u / a \quad \text{et} \quad \omega_2 = \omega_u . a \tag{1.9}$$

Le module et l'argument du terme à avance de phase sont alors définis par

$$\left|K_{\mathrm{D}}(\mathrm{j}\omega)\right| = K_0 \sqrt{\frac{\omega_{\mathrm{u}}^2 + a^2\omega^{\ 2}}{a^2\omega_{\mathrm{u}}^2 + \omega^2}} \tag{1.10}$$

$$\arg K_{\mathrm{D}}(\mathrm{j}\omega) = \arctan\frac{a\omega}{\omega_{\mathrm{u}}} - \arctan\frac{\omega}{a\omega_{\mathrm{u}}} \tag{1.11}$$

A la pulsation ω_{u},

$$\phi_{\mathrm{m}} = \arg K_{\mathrm{D}}(\mathrm{j}\omega_u) = 2\arctan a - 90° \tag{1.12}$$

Compte tenu d'un objectif de marge de phase $M\phi$ donné, l'avance de phase à apporter peut être calculée en fonction des différents paramètres :

$$\phi_{\mathrm{m}} = \arg K_{\mathrm{D}}(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{u}}) = \text{-}180° + M_{\phi} \text{ - } \arg G(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{u}}) \text{ - } \arg K_{\mathrm{I}}(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{u}}) \text{ - } \arg K_{\mathrm{F}}(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{u}}) \tag{1.13}$$

La relation (1.11) permet donc d'obtenir a :

$$a = tg\left(\frac{\phi_{\mathrm{m}} + 90°}{2}\right), \tag{1.14}$$

et donc les pulsations ω_1 et ω_2 grâce à (1.8) :

$$\omega_1 = \omega_{\mathrm{u}}/a$$

$$\omega_2 = \omega_{\mathrm{u}}.\, a$$

Le paramètre K_0 qui assure que le gain de la boucle ouverte est unitaire à ω_{u} est donné par :

$$K_0 = \frac{1}{\left|G(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{u}})\right|\left|K_{\mathrm{I}}(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{u}})\right|\left|K_{\mathrm{D}}(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{u}})\right|\left|K_{\mathrm{F}}(\mathrm{j}\omega_{\mathrm{u}})\right|}$$

Alors que le réglage des régulateurs du type PID(F) sont souvent déterminés empiriquement avec une approche essais/erreurs, nous avons choisi une méthode complète de calcul permettant de déterminer de manière précise et systématique les valeurs des différents coefficients. Aussi, quel que soit l'asservissement souhaité, cette méthode sera utilisée pour

déterminer précisément le régulateur. On peut remarquer que seule la connaissance du gain et de la phase du système à commander à la fréquence ω_u sont en fait nécessaires.

L'étape suivante concerne alors l'intégration et l'implantation physique de ce régulateur dans le système de commande du 7ème vérin.

3.1.3 Implantation physique d'une loi de commande

Le vérin utilisé pour montrer la faisabilité des modes de pilotages souhaités possède son propre langage de programmation. Des séquences peuvent être programmées et importées dans le variateur du 7ème vérin. L'implantation de la régulation du système nécessite donc la programmation logicielle d'une séquence qui va générer le signal de commande en temps réel. Cela implique alors la traduction d'un régulateur discret en une équation récurrente intégrée à la régulation en boucle fermée du système. En effet, il est nécessaire d'avoir accès en continu à la position réelle du 7ème vérin ainsi qu'à une mesure de l'effort à son extrémité, ce qui correspond à nos informations de retour concernant la régulation en position et en effort.

L'obtention du régulateur discret se fait par étapes successives où nous avons utilisé à la fois la transformée en Z et la méthode de transformation bilinéaire (aussi appelé méthode de Tustin). Ces étapes consistent alors à :

- Considérer le système G(p) et déterminer sa transformée en z $G_{ZOH}(z)$.

- Appliquer l'approximation de Tustin à la fonction de transfert $G_{ZOH}(z)$. Il s'agit de considérer $z = (2 + T_s . \omega) / (2 - T_s . \omega)$ avec T_s la période d'échantillonnage. On obtient alors $G(\omega)$.

- On applique donc la méthode présentée au 3.1.2 afin de déterminer les coefficients K_I, K_D, K_F et K_0 du régulateur en considérant cette fois-ci non plus G(s) mais $G(\omega)$. On obtient alors le régulateur PID écrit dans le domaine pseudo-continu $K(\omega)$.

- Une fois le régulateur calculé, nous pouvons appliquer la transformation bilinéaire inverse consistant à utiliser $\omega = (2/ T_s) . ((z -1)/(z+1))$ autrement appelée la transformation de Tustin inverse. Cela nous donne ainsi le régulateur dans le domaine discret K(z).

Le régulateur dans le domaine discret permet alors facilement d'obtenir une loi de commande mathématique sous la forme d'une équation récurrente. Cette équation pourra être implémentée dans une séquence de programmation du 7ème vérin et qui permettra ainsi la régulation de celui-ci en fonction des objectifs et des modes de pilotage souhaités. De plus, une décomposition en éléments simples de la fonction $K(\omega)$ du régulateur, dans le domaine pseudo-continu, pourra être utilisée de manière à implémenter une équation récurrente avec des éléments de rang n-1 et ne pas cumuler ainsi des erreurs dues à la prise en compte de valeurs aux rangs tels que n-5 ou n-6.

3.2 Interaction entre le robot et son environnement : commande en forces

Afin de caractériser la notion d'interaction entre un élément robotisé et son environnement, le terme de « compliance » est couramment utilisé. Il s'agit de la capacité d'un robot à avoir un comportement souple et à réagir en fonction des forces extérieures qui lui sont appliquées par l'environnement (Prelle, 1997). La compliance, pouvant être définie comme l'inverse de la raideur, correspond ainsi à l'adaptabilité du robot vis-à-vis d'une interaction avec un objet ou avec un utilisateur extérieur. Pour être effectif, l'objectif du robot est de tenter de s'adapter en permanence aux efforts qu'il exerce sur l'environnement ou qui sont exercés sur lui. C'est la raison pour laquelle la notion de compliance s'applique à la fois au robot et à son environnement extérieur.

Cette prise en compte des interactions robot/environnement nécessite de mettre en place une commande en force. Aujourd'hui plusieurs solutions existent afin de prendre implicitement ou explicitement en compte l'effort d'interaction entre l'organe terminal du robot (dans le cadre de l'hexapode il s'agira de la plateforme mobile) et son environnement. Il s'agit principalement de la compliance passive, de la compliance active, de la commande en impédance (sans mesure de l'effort) et de la commande hybride. Afin de l'illustrer, cette dernière sera implémentée dans le système de commande du 7ème vérin identifié précédemment.

3.2.1 Compliance passive/active

La principale différence entre la compliance active et la compliance passive réside dans l'utilisation ou non de capteurs de forces pour prendre en compte les interactions entre le robot et son environnement. La compliance permet de caractériser si la déformabilité d'une structure est naturelle ou si elle est contrôlée.

Dans le cadre de la compliance passive, le système d'interactions robot/environnement est relativement simple à mettre en place. Il s'agit d'utiliser un système mécanique pouvant se déformer lors d'une interaction avec un utilisateur ou un objet extérieur. Ces systèmes mécaniques sont principalement construits à l'aide de ressorts et pièces déformables.

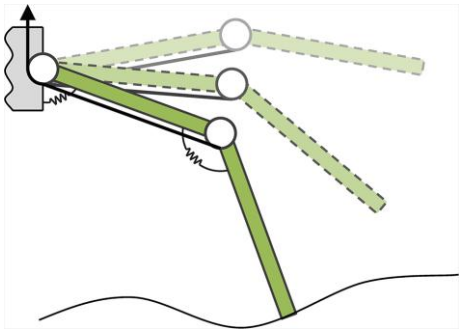


Figure 25 : Exemple de compliance passive

La Figure 25 permet d'illustrer un exemple de mise en place de compliance passive. Les deux ressorts, placés respectivement entre le bâti et le premier bras et entre les deux bras, représentent le système mécanique prenant en compte les interactions avec l'environnement. Dans cet exemple, les bras manipulateurs peuvent s'adapter aux variations de l'environnement.

La compliance active nécessite souvent la mise en place de capteurs de forces ou de couples sur le robot. Ses capteurs doivent être placés au plus près des interactions avec l'environnement afin de fournir des retours d'informations au contrôleur du robot. Le robot pourra alors adapter sa commande, la mesure de l'effort étant utilisée pour corriger le signal d'entrée. De manière générale, la compliance active est dépendante de la capacité du contrôleur à traiter le retour d'informations du capteur ainsi que de la précision de ce dernier. Les temps de traitement peuvent être importants et la partie mécanique des robots ne pouvant absorber beaucoup d'énergie du fait de leur rigidité, le moindre choc dû à un retard peut endommager la structure physique du robot ou de son environnement. La littérature propose aujourd'hui plusieurs approches numériques pour prendre en compte de manière efficiente le retour d'informations issues des capteurs de forces et/ou moments.

3.2.2 Commande en impédance (sans mesure de l'effort)

La commande en impédance (Hogan, 1985) (Ombede, 1996) se caractérise par le principe d'impédance/admittance mécanique. L'impédance définit la mesure de la résistance mécanique face aux contraintes en position imposées par un environnement et un mouvement d'une structure soumise à une force donnée. L'impédance mécanique est en opposition avec l'admittance mécanique, autrement définie comme la mobilité d'un système.

L'impédance mécanique se caractérise par le rapport entre un potentiel de forces et une variation (couramment de vitesse ou de position). L'équation (1.15) est un exemple d'impédance mécanique Z(s) définie par un potentiel de force et une variation de position.

$$Z(s) = \frac{F(s)}{\Delta x(s)} \tag{1.15}$$

L'avantage principal d'utiliser une commande en impédance est de s'affranchir de la mesure de l'effort. Dans le cas de la mise en place d'une commande en impédance du second ordre, les résultats obtenus sont semblables à une commande par retour d'effort explicite (Volpe, *et al.*, 1995).

3.2.3 Commande hybride externe

La commande hybride externe (Perdereau, 1991) permet de traduire une variation d'effort en variation de position avec l'asservissement de position inclus dans la boucle d'effort. Une schéma de commande hybride est représenté Figure 26.

On y trouve :

- Γ le signal de commande
- LCPO la loi de Commande de la Partie Opérative
- MGD le Modèle Géométrique Direct
- q les variables articulaires du robot
- Kd la raideur désirée suivant les différents axes à commander.

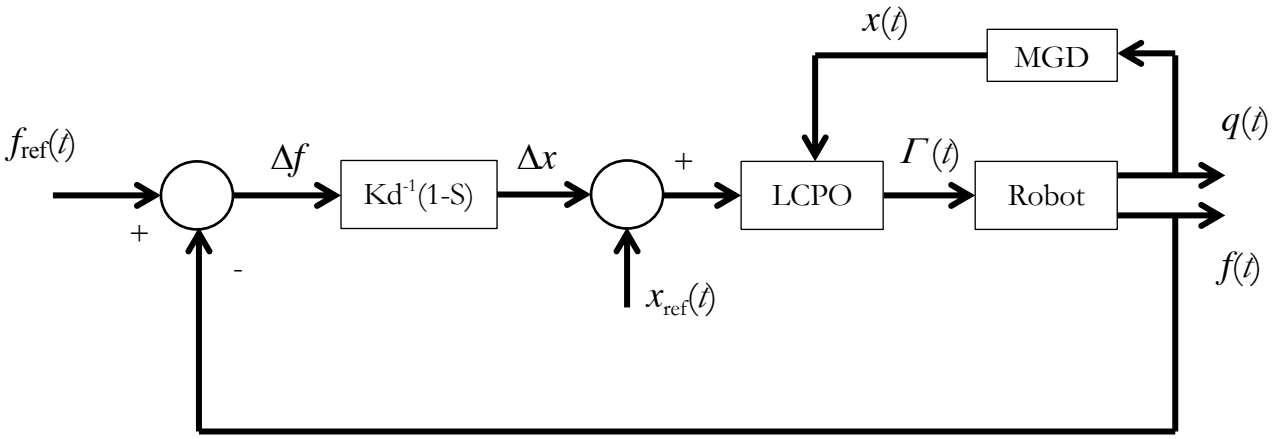


Figure 26 : Exemple de commande dite « hybride externe »

Le 7ème vérin a été utilisé pour mettre en œuvre un exemple de commande hybride externe. L'objectif est de placer à l'extrémité du vérin un capteur de force comme indiqué sur la Figure 27 et de déterminer une raideur souhaitée pour le comportement du vérin. Le capteur de forces utilisé dans le cadre de cette manipulation est un capteur 3 axes dont seul la composante verticale est considérée pour mettre en place la commande.

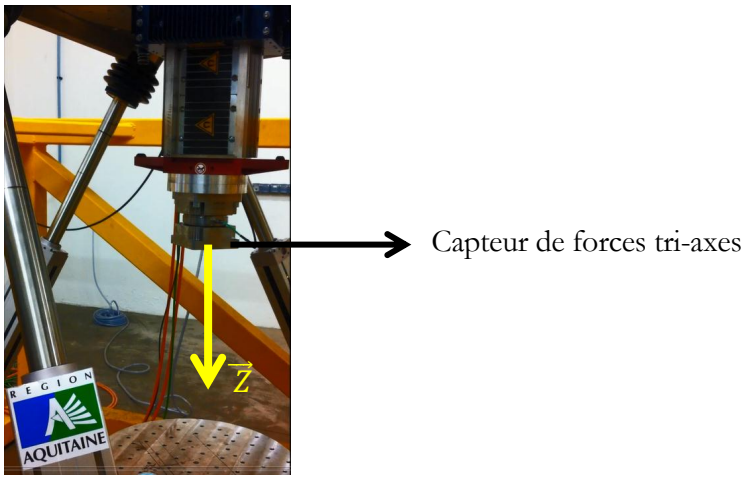


Figure 27 : Capteur de forces tri-axes placé à l'extrémité du 7ème vérin

En suivant la méthodologie détaillée dans la partie précédente 3.1, le mode « Force reference » du 7ème vérin a été utilisé pour implanter directement notre système de commande au sein du logiciel de pilotage du vérin. Un régulateur K a été conçu pour satisfaire certains critères de stabilité, l'objectif étant d'illustrer la fonctionnalité de ce type de commande en effort. L'ensemble des équations récurrentes correspondant à la commande discrète a été implanté dans une séquence de programmation du contrôleur.

L'exercice mis en place pour contrôler et valider l'asservissement du vérin est le suivant : la commande étant opérationnelle en continu, un opérateur interagit en temps réel sur l'extrémité basse du vérin afin de le déplacer à la position souhaitée. La Figure 28 représente les différentes étapes de manipulation du vérin par un opérateur extérieur et le Tableau 3 le descriptif de ces étapes en fonction des objectifs de la commande.

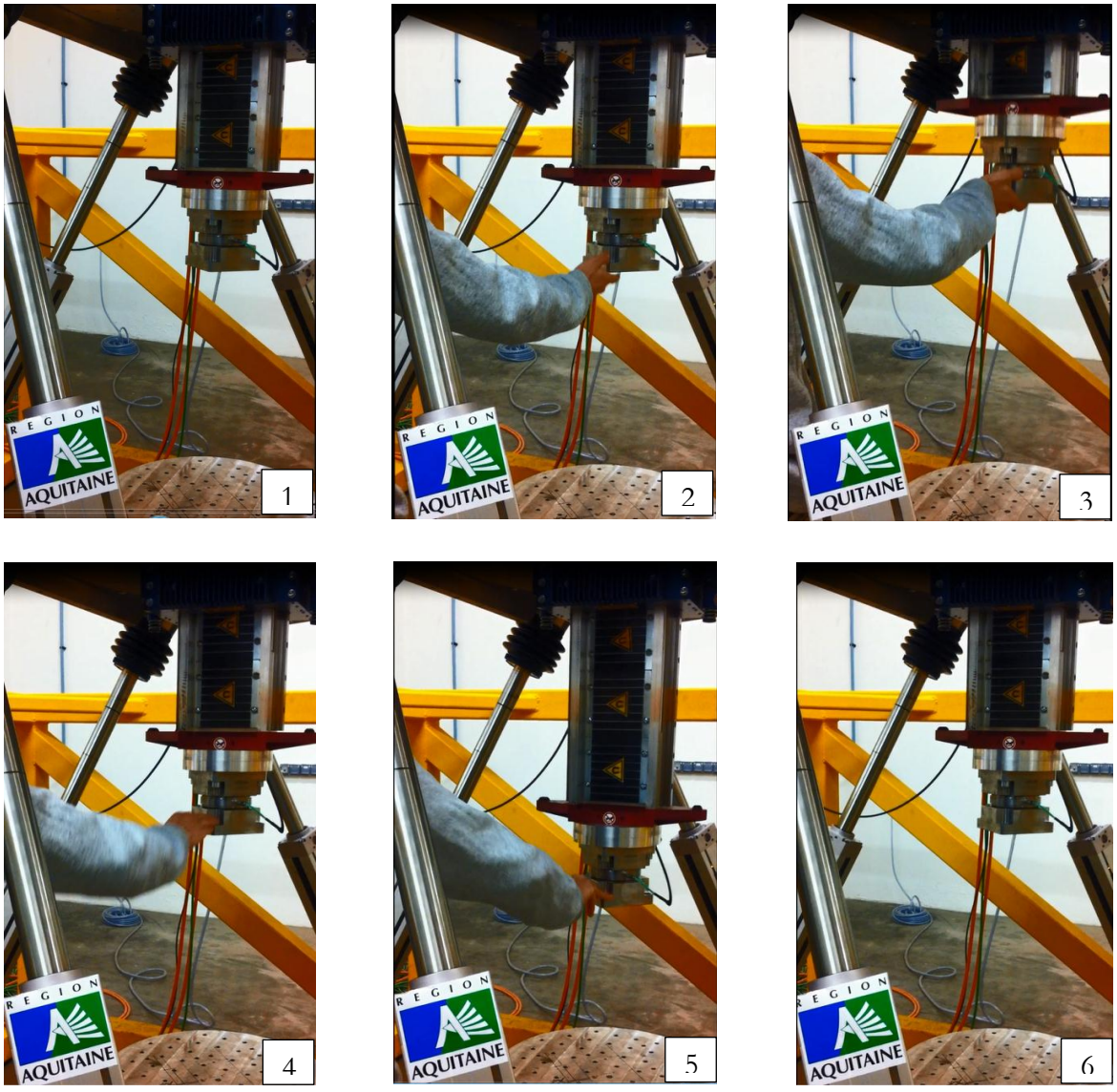


Figure 28 : Séquences illustrant la commande temps réel en effort du vérin

Tableau 3 : Description des étapes de la manipulation du vérin en temps réel

Phase 1 : le système de pilotage en effort du 7ème vérin est activé et la régulation. Sans effort détecté, la commande maintient le vérin en position initiale (photo 1).	Phase 2 : un utilisateur est en contact avec le capteur d'effort placé à l'extrémité du vérin. Le système détecte et de mesure en temps réel l'effort vertical imposé par l'utilisateur (photo 2).	Phase 3 : la commande calcule la variation de position correspondante à l'effort imposé par l'utilisateur (en fonction de la raideur choisie). L'utilisateur peut alors déplacer le vérin jusqu'à la position souhaitée (photo 3).
Phase 4 : l'effort vertical mesuré pas le capteur de force permet de détecter selon son signe la direction de l'interaction entre l'utilisateur et le vérin. Sur la photo 4, l'opérateur fait descendre le vérin à une nouvelle position désirée.	Phase 5 : A l'image de la phase 3 la commande calcule la variation de position correspondante à l'effort imposé par l'utilisateur (en fonction de la raideur choisie). L'utilisateur déplace donc le vérin jusqu'à la position souhaitée mais dans ce cas en position basse (photo 5).	Phase 6 : Dès que l'utilisateur relâche son effort sur le vérin, celui-ci est commandé pour revenir dans la position initiale désirée (photo 6).

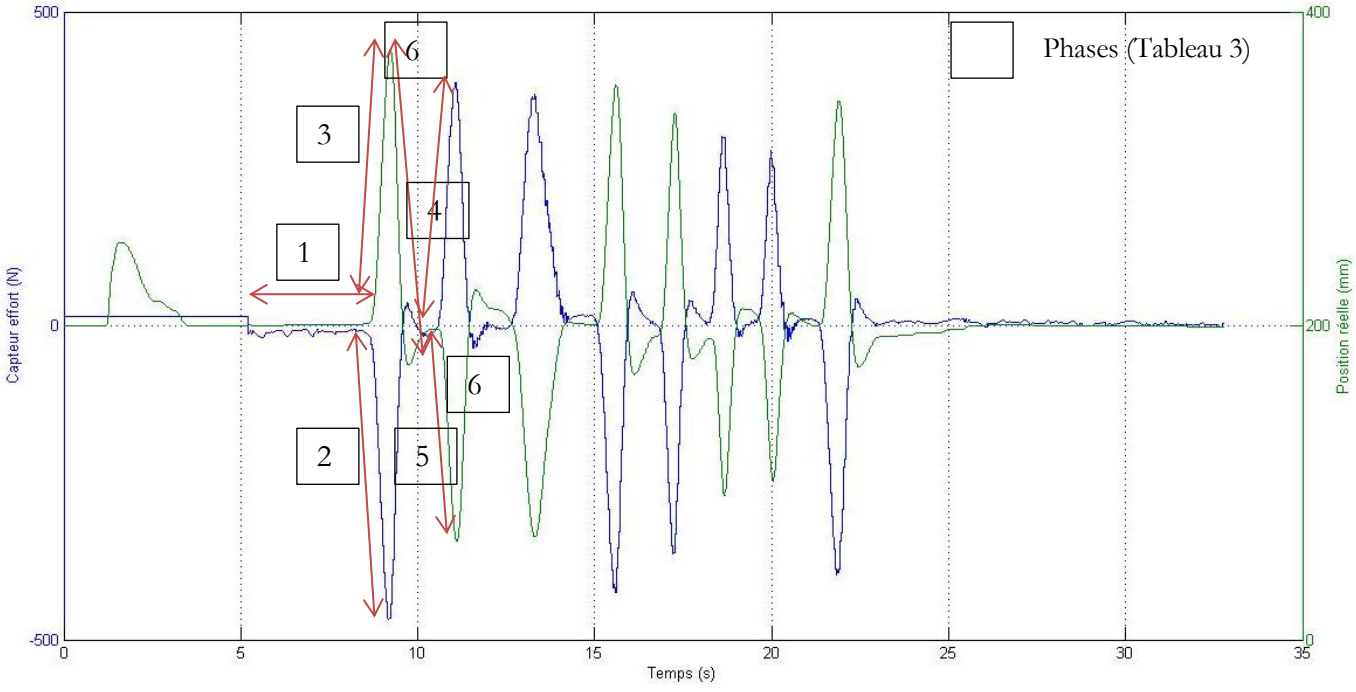


Figure 29 : Signaux Capteur effort VS Position réelle du vérin

La Figure 29 illustre la régulation mise en place sur le 7ème vérin et les différentes phases définies dans le Tableau 3. Comme on le voit, ces phases ont été reproduites plusieurs fois. L'objectif ne résidait pas dans l'optimisation de la régulation du vérin mais dans

l'implémentation d'une nouvelle stratégie de contrôle direct du vérin par un utilisateur. Cette régulation hybride pourrait tout à fait être rendue optimale.

Approche utilisée dans le cadre du projet SIMUSURF

L'objectif général du projet SIMUSURF est d'utiliser l'hexapode pour l'analyse de la réponse d'un surfeur positionné sur le plateau mobile de l'hexapode et soumis à des mouvements représentatifs des mouvements d'une planche de surf lors de manœuvres effectués en conditions réelles. Pour mener à bien cet objectif et lever les verrous scientifiques identifiés, différentes étapes sont nécessaires. Après avoir apprivoisé l'architecture matérielle d'un hexapode de type Gough-Stewart au travers d'une modélisation analytique, une étude sur la perception de mouvement chez l'être humain a été menée. En effet, lors de la conception d'un simulateur, la notion de mouvement et de perception de mouvement propre induisent la nécessité de mettre en place des algorithmes de restitution inertielle. Dans le même temps, la partie commande et intégration des données de l'hexapode constitue une deuxième étape majeure du projet de recherche. Des stratégies de commande allant du suivi de trajectoires préenregistrées à la génération de trajectoires en fonction d'un effort extérieur ont alors été définies et évaluées grâce à la modélisation et l'asservissement d'un 7ème vérin. Après avoir défini numériquement le système ainsi que les lois de commande, l'implantation physique de celles-ci ont permis l'implémentation d'une nouvelle stratégie de pilotage de ce 7ème vérin.

La prochaine étape consiste donc à mettre en place une large campagne expérimentale pour effectuer des mesures *in situ* d'interactions entre un surfeur et son environnement. Un choix d'instrumentations pertinentes est effectué pour équiper une planche de surf de capteurs de force, de caméras embarquées pour suivre en temps réel la position du surfeur sur sa planche et d'une centrale inertielle (ensemble d'accéléromètres et de gyroscopes) dans le but de recueillir des informations sur les mouvements réalisés et sur les trajectoires réelles lors de l'évolution d'un surfeur sur la vague. Ces informations constitueront une base de données de mouvements à analyser, traiter et intégrer dans l'hexapode de manière efficace.

Chapitre 2

CAMPAGNE EXPERIMENTALE *IN SITU* : MATERIELS ET METHODES

1 Introduction

1.1 Description d'une campagne d'essais *in situ*

Une campagne d'essais a généralement pour rôle de mesurer et d'évaluer des paramètres servant à alimenter ou identifier un modèle mathématique ou numérique. Pour des raisons principales de coût et de temps, il est courant d'effectuer les campagnes d'essais en laboratoire. En effet, dans le cadre d'instrumentations d'une éprouvette ou d'une structure, la mise en place d'un dispositif d'essais en laboratoire, dans la mesure du possible, simplifie la réalisation d'une campagne expérimentale. Dans ce cas, une campagne expérimentale *in situ,* c'est-à-dire dans l'environnement d'utilisation et de sollicitations des éléments instrumentés, est réalisée en aval d'une campagne d'essais en laboratoire afin d'évaluer par exemple les sollicitations à appliquer sur une structure.

Si aucun dispositif en laboratoire n'est capable de représenter les phénomènes devant être mesurés, une campagne expérimentale *in situ* peut être réalisée avec un objectif double : constituer une base de données permettant d'identifier a posteriori un modèle de connaissances physiques et développer un dispositif expérimental qui permettra de reproduire les phénomènes mesurés en environnement contrôlé.

1.2 Objectifs de la campagne expérimentale

La méthodologie des travaux de recherche est basée sur une approche couplée 'acquisition des données expérimentales / reproduction en environnement contrôlé. L'acquisition de données issues d'une campagne d'essais *in situ* permet de mettre en place des lois de comportement réel. En effet, cela concerne l'analyse du geste du surfeur, du comportement de son matériel (la planche de surf) et des interactions Surfeur/Planche/Vague. Les objectifs de la campagne expérimentale sont donc d'enregistrer à la fois les données de vitesse et d'accélérations d'une planche de surf lors de son évolution sur la vague mais également les interactions entre le surfeur et sa planche. Il est primordial qu'une base de données expérimentales soit créée afin de définir *a posteriori* les lois de comportement réelles du surfeur et de son matériel. Les interactions directes Surfeur/Planche/Vague sont résumées sur la Figure 30.

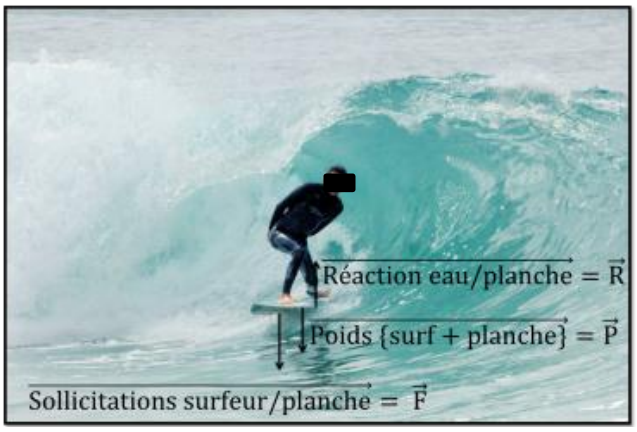


Figure 30 : Sollicitations mécaniques extérieures s'exerçant sur une planche

1.3 Description des paramètres d'intérêt

Les facteurs à étudier peuvent se répartir en deux catégories : la trajectoire d'une planche de surf sur la vague et les phases d'appui chez le surfeur.

1.3.1 Trajectoire d'une planche de surf sur la vague

Avant les années 1980, la définition de surf, de l'action de surfer sur une vague était la suivante : glisser sur l'océan en adéquation avec la vitesse de la vague (rejoint la définition du « trim » en « single fin », c'est-à-dire une planche de surf avec une dérive centrale unique). Avec l'apparition des premiers « thrusters » (planche de surf à trois dérives) de Simon Anderson en 1981, la définition du surf a changé. C'est devenu un surf de propulsion permettant au surfeur de rythmer sa vitesse par rapport à celle de la vague et ainsi d'augmenter l'amplitude de ses manœuvres. Ainsi, aujourd'hui « surfer une vague » se définit par l'action d'effectuer différentes trajectoires sur la vague. Ces trajectoires de la planche de surf doivent correspondre au rythme du déferlement de la vague. Elles dépendent principalement de deux facteurs : le type de vague et le niveau du surfeur. Nous considérons ici un type de vague le plus général possible, c'est-à-dire surfable aussi bien par le débutant que par le surfeur professionnel. Aussi, nous pouvons définir trois types de trajectoires du surfeur et de sa planche sur la vague, la trajectoire dite « du surfeur débutant », la trajectoire dite « du surfeur confirmé » et la trajectoire dite « du surfeur professionnel ».

La trajectoire dite « du surfeur débutant »

Le surfeur débutant effectue des trajectoires limitées du fait qu'il ne se déplace que de manière linéaire sur la vague. Sa trajectoire n'évolue pas au cours du temps et au cours du déferlement de la vague. Lorsque le surfeur choisit une direction (droite ou gauche), la planche suit cette direction jusqu'à la fin de la vague en utilisant une partie de la pente de la vague appelée la « Trim Line ». La « Trim Line » désigne la ligne de plus forte énergie de la vague et est positionnée généralement au 1/3 supérieur de la hauteur de la vague (voir Figure 31).

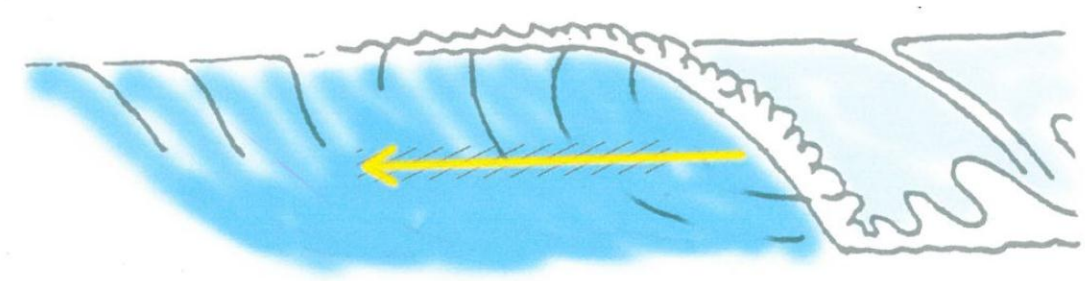


Figure 31 : La trajectoire dite « du surfeur débutant »

La trajectoire dite « du surfeur confirmé »

A la différence du surfeur débutant, les trajectoires du surfeur confirmé évoluent au cours du temps. En effet, le surfeur confirmé est actif sur sa planche et ses mouvements du corps lui permettent de conduire sa planche selon plusieurs directions en fonction du déferlement de la vague. Ce n'est pas seulement la vague qui agit sur le surfeur en le portant, celui-ci devient également acteur. Il est ainsi capable de se déplacer afin d'aller affronter ou fuir les zones critiques la pente de la vague (voir Figure 32). En plus de cela, les actions impulsées par le surfeur lui permettent de générer de la vitesse. La vitesse du surfeur et de sa planche se retrouve ainsi supérieure à celle du déferlement de la vague.

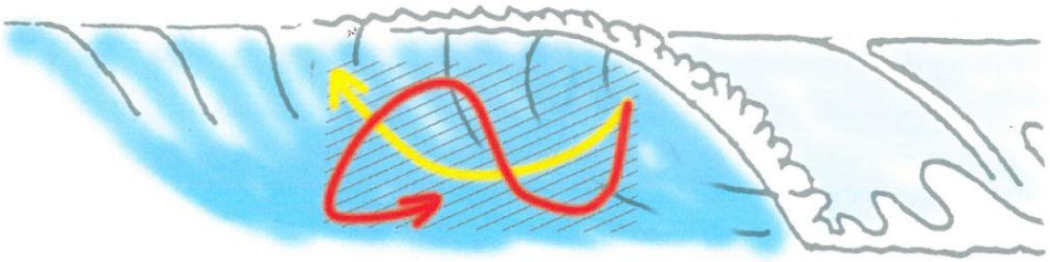


Figure 32 : La trajectoire dite « du surfeur confirmé »

Cependant, la principale différence entre le surfeur « confirmé » et le surfeur « professionnel » vient du fait que le premier est limité techniquement et donc que ses actions sur la planche se résument à des appuis directionnels et non pas fonctionnels. De plus, le surfeur confirmé a une perception limitée de son espace de surf et de l'espace que la vague lui offre pour se déplacer.

La trajectoire dite « du surfeur professionnel »

La trajectoire du surfeur « professionnel » se définit par sa capacité à venir évoluer sur l'ensemble de la vague en fonction du rythme, de la vitesse, de la forme et des caractéristiques intrinsèques de celle-ci (la taille, la longueur ou encore la période de la houle). En effet, le surfeur professionnel interagit avec sa planche de manière à acquérir de la vitesse en continu et de pouvoir contrôler celle-ci sans aucune perte. Les trajectoires sont donc plus verticales,

peuvent se croiser et les interactions entre la planche et la vague sont poussées à l'extrême limite de la rupture d'équilibre (voir Figure 33 tracé jaune). Ces trajectoires peuvent même sortir de la vague (voir Figure 33 tracé rouge), permettant au surfeur d'agrandir encore son espace de travail en s'affranchissant de celui de la vague ; la vitesse qu'il est capable d'acquérir lui permet de pouvoir décoller dans les airs sans pour autant perdre le fil de son enchainement.

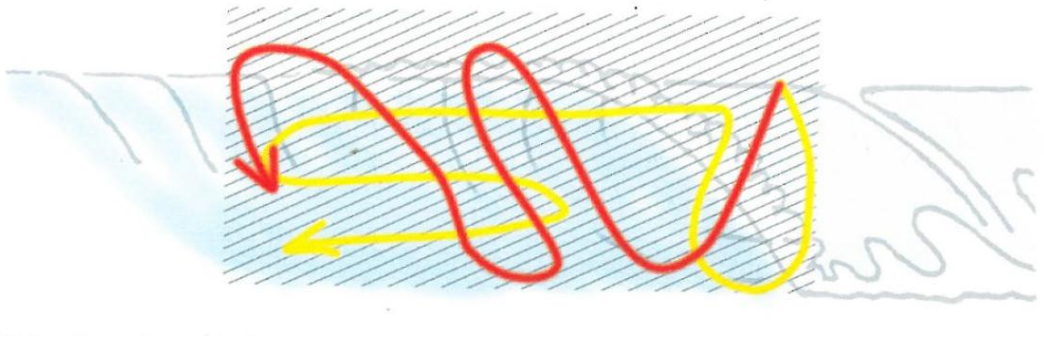


Figure 33 : La trajectoire dite « du surfeur professionnel »

Afin d'étudier les différents types de trajectoires définis ci-dessus, nous pouvons préciser les trois axes de rotation d'une planche de surf sur la vague : l'axe de rotation longitudinal, l'axe de rotation transversal et l'axe de rotation vertical (Figure 34, Figure 35, Figure 36).

L'axe de rotation longitudinal

Cet axe de rotation est sollicité lorsque le surfeur désire placer sa planche de surf sur un rail pour exécuter un virage sur la vague. Plus le surfeur va chercher à effectuer un virage serré avec un rayon de courbure court, plus l'angle de rotation autour de cet axe sera grand. Un appui sur la pointe ou le talon des pieds avant et arrière ainsi qu'un basculement du corps vers l'avant ou l'arrière permet d'interagir avec la planche de surf autour de cet axe.

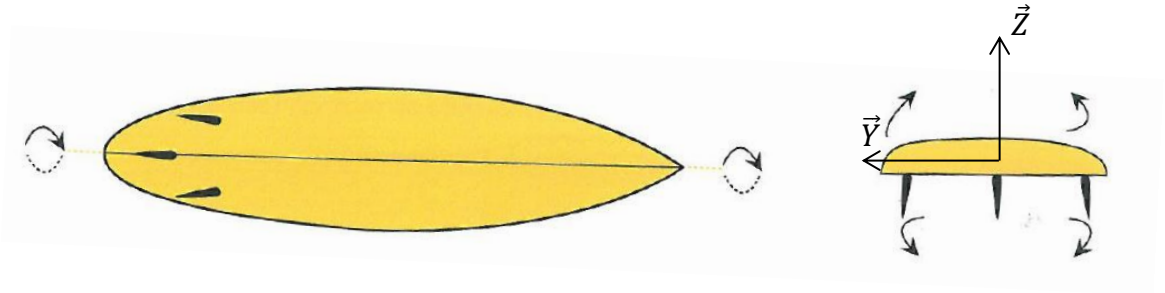


Figure 34 : L'axe de rotation longitudinal

L'axe de rotation transversal

Cet axe de rotation est sollicité lorsque le surfeur effectue des transferts d'appuis entre le pied avant et le pied arrière. Un appui sur le pied arrière va accentuer la manœuvrabilité de la

planche de surf en créant un point de pivot autour de l'arrière de la planche. Cependant, cette position de la planche va avoir tendance à faire perdre de la vitesse du fait d'une force de frottement devenue très importante. Un appui constant sur le pied avant va permettre de positionner la planche de surf bien à plat sur le plan d'eau et va donc favoriser la prise de vitesse.

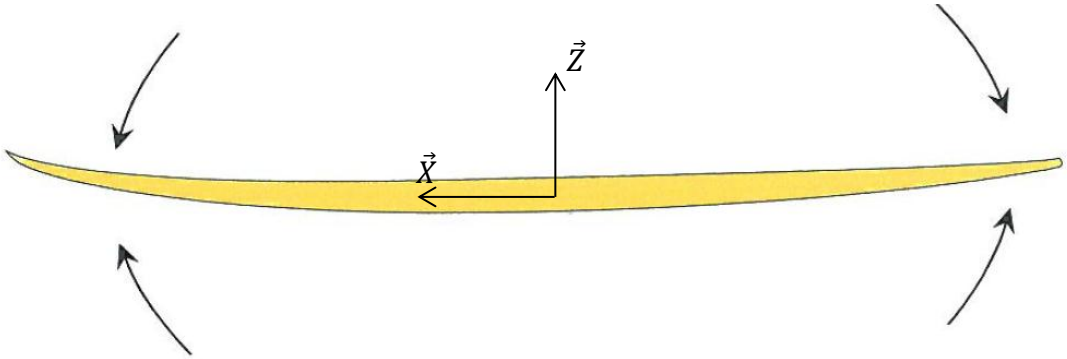


Figure 35 : L'axe de rotation transversal

L'axe de rotation vertical

Cet axe de rotation perpendiculaire à la planche de surf est sollicité lorsque celle-ci tourne « à plat » sur la vague. Il est difficilement sollicité seul étant donné la présence de dérives placées sous la planche de surf créant une force de frottement importante. Les actions du surfeur seules ne permettent pas de générer une rotation autour de cet axe.

Les trois axes de rotation sont couplés lors de chaque trajectoire de la planche de surf. Cependant, dans la plupart des trajectoires de la planche sur la vague, l'utilisation par le surfeur des axes transversal et longitudinal est prépondérante. L'utilisation de l'axe vertical va principalement permettre au surfeur de venir radicaliser l'ensemble de ses manœuvres.

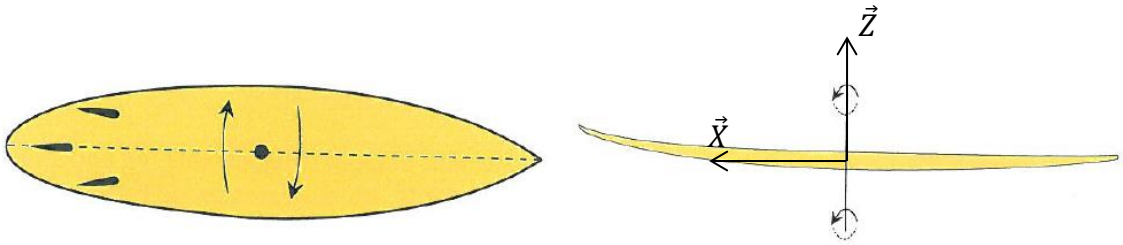


Figure 36 : L'axe de rotation vertical

1.3.2 Phases d'appuis chez le surfeur

Considérant le surfeur debout sur sa planche de surf et évoluant sur une vague, les actions entre le surfeur et sa planche sont définies par les notions de poussée/allégement, flexion/extension et appuis/relâchement. En effet, lorsque le surfeur est debout et immobile sur sa planche, il exerce une force normale à la surface de sa planche. La force exercée par l'eau sur le dessous de la planche est égale en norme à cette force exercée par le surfeur étant donné le système isolé {planche de surf} en équilibre. Les variations de la force normale exercée par le

surfeur est donc dépendante de la pression exercées au niveau des appuis. Si l'utilisateur réalise plusieurs flexions/extensions, la force normale varie comme la Figure 37.

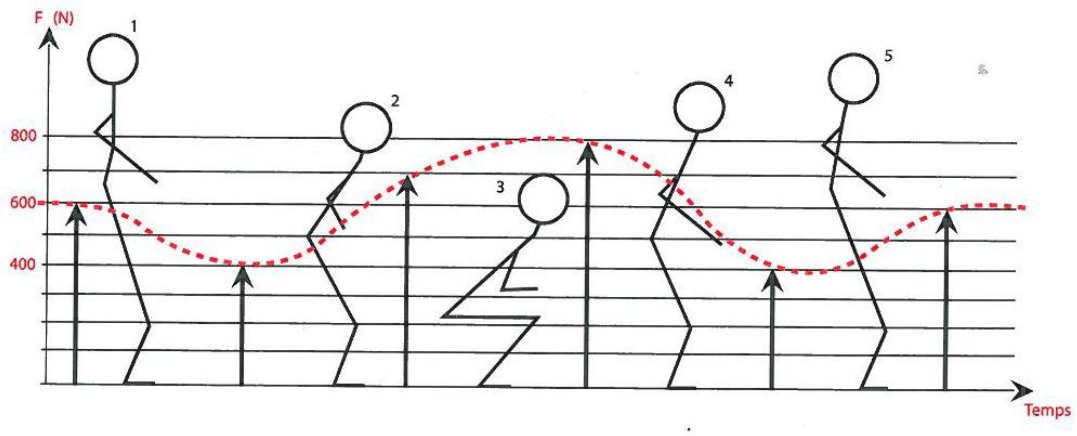


Figure 37 : Phases d'appui chez le surfeur

Le comportement de la planche en réaction aux sollicitations du surfeur définit la réactivité de la planche. La succession d'actions appui/relâchement, de poussée/allégement produit une force ascendante sur le système {planche de surf}. Cette force ascendante est due à la poussée d'Archimède. Elle permet principalement au surfeur de générer de la vitesse.

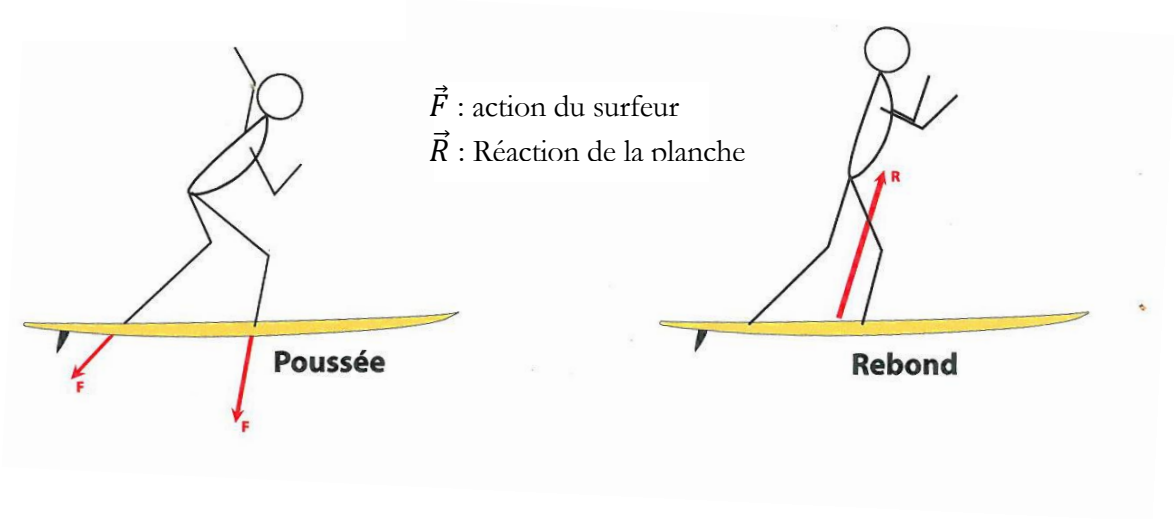


Figure 38 : Interactions entre le surfeur et sa planche

La prise de vitesse en surf

Nous avons évoqué précédemment que pour acquérir de la vitesse sur une vague, le surfeur doit maitriser les notions d'appuis et de relâchement sur la planche de surf lorsqu'il évolue sur la pente de la vague. La prise de vitesse correspond ainsi à une succession d'appuis/relâchements du surfeur permettant à la planche d'effectuer une trajectoire

ondulatoire sur la vague (montées/descentes). La séquence présentée Figure 39 détaille les interactions entre le surfeur, sa planche et la vague lors d'une prise de vitesse.



Figure 39 : Evolution du comportement du surfeur lors d'une prise de vitesse sur la vague

Photo 1 : Le surfeur est en position semi-fléchie afin d'avoir des appuis efficaces sur la planche et de pouvoir anticiper la prochaine action consistant à pousser sur les jambes.

Photo 2 : Le surfeur a poussé sur ses jambes. Ses jambes sont presque en extension complète. Cette poussée du surfeur provoque une action de rebond vertical de la planche de surf. Cette action se traduit également par une accroche du rail intérieur de la planche. Le mouvement des bras est également significatif et permet d'accentuer le phénomène de rebond de la planche. Le surfeur se contente d'accompagner la planche qui réagit à sa poussée précédente.

Photo 3 : Le surfeur profite alors de la relance et du rebond obtenus pour alléger l'appui sur sa planche (position plus fléchie). Le surfeur et sa planche sont remontés sur la vague par rapport à la phase précédente. La planche de surf est alors posée pratiquement à plat sur la vague. La position des bras est également significative étant donné qu'ils permettent d'équilibrer la planche lorsque celle-ci revient à une position neutre (à plat sur la vague).

Photo 4 : le surfeur appuie à nouveau sur la planche pour redescendre sur la vague et obtenir ainsi un appui qui lui permettra de se relancer. Le surfeur a donc généré une trajectoire sinusoïdale autour de la « Trim-Line » faite d'une succession d'appuis et de relâchement d'appuis.

En résumé, générer de la vitesse sur la vague suppose :

- d'utiliser toute l'énergie de la vague grâce à une trajectoire sinusoïdale

- d'interagir avec sa planche par des actions de poussées/allégements

- d'être capable d'accompagner le rebond de la planche lorsque celle-ci cherche à s'extraire de l'eau (poussée d'Archimède).

2 Matériel expérimental

2.1 La plateforme de forces

Une plateforme de forces permet de mesurer les 6 composantes du torseur d'action mécaniques traduisant les sollicitations exercées sur le plateau supérieure de la plateforme.. Notons que ces mesures permettent aussi le calcul de la position du centre de pression (COP) au cours de l'exécution d'un mouvement sur la plateforme. Le COP est le point d'application théorique des forces exercées. Dans le cadre de l'étude biomécanique de la marche humaine, le COP est systématiquement déterminé afin d'évaluer le point d'application théorique de la force de réaction du support (Besser, *et al.*, 1993) . Cependant, cela consiste donc à faire une hypothèse forte en considérant que l'appui plantaire est un appui ponctuel. Or, en réalité l'appui plantaire correspond à une surface déformable. Cette surface déformable peut, si nécessaire, être mesurée par des nappes de pressions ou autres systèmes de mesure de l'évolution de la pression plantaire (Delacroix, 2014).

Une plateforme de forces se révèle être un outil indispensable pour évaluer des efforts lors de l'exécution d'un mouvement et plus particulièrement lorsque la surface de contact est importante. Dans le cadre du projet SIMUSURF, une plateforme de forces sera donc utilisée pour mesurer, en conditions réelles donc *in situ*, les interactions entre le surfeur et sa planche. Ainsi, cette plateforme de forces sera intégrée dans une planche de surf et devra répondre à un cahier des charges précis.

2.1.1 Cahier des charges spécifique

Lors de la phase de conception préliminaire d'une plateforme de forces, il est important d'établir un cahier des charges précis quant à l'intégration du capteur dans les dispositifs à instrumenter : l'encombrement, la masse et l'étendue de mesure sont les paramètres pilotant la conception de cette plateforme.

Intégration du capteur

L'analyse des phases d'appui chez le surfeur permet de mettre en avant le fait que l'appui prépondérant permettant de générer de la vitesse avant, pendant et après l'exécution d'une figure sur la vague, est l'appui de la jambe avant.

D'après la Figure 39 et l'évolution des appuis du surfeur sur la vague, nous remarquons qu'avant d'entamer une figure ou une prise de vitesse, le surfeur est bas sur ses appuis. Dans la phase d'extension, il est important de s'alléger au maximum afin de gagner le plus de vitesse possible. Lorsque la planche est arrivée à l'endroit où le surfeur désirait se placer, il est nécessaire d'effectuer un nouveau transfert avec un appui fort vers l'avant afin de remettre la planche dans la pente de la vague et reprendre de la vitesse pour se préparer à effectuer la

manœuvre suivante. Cet appui fort vers l'avant est caractérisé par une flexion importante de la jambe avant mais également par un positionnement des bras et du haut du corps au-dessus du pied avant également.

Ainsi, il est primordial d'évaluer la dynamique de ce transfert d'appui vers l'avant. Une des contraintes d'intégration du capteur dans la planche concerne donc le positionnement sous le pied avant.

Encombrement de la plateforme

Le positionnement de la plateforme de forces étant défini sous le pied avant, cela impose donc une surface de contact couvrant la totalité du pied. Afin de permettre l'intégration du capteur à l'intérieur de la planche, cela nécessite également une contrainte au niveau de l'épaisseur maximum relative à l'épaisseur d'une planche de surf (entre 40 et 70 mm en moyenne). Ainsi, le cahier des charges préliminaires définit les dimensions maximales suivantes pour le capteur : 300*400*60 (mm) respectivement selon les axes X, Y et Z.
En plus de cela, une des contraintes majeures concerne la masse de la plateforme. Le dispositif à instrumenter, à savoir la planche de surf, pèse selon les modèles de planche de 2 à 6 kg. Pour une planche de surfeur professionnel, dite performante, la masse ne dépassera pas les 2,5 kg. Pour une planche de débutant ou intermédiaire, dite évolutive, elle pourra atteindre jusqu'à 6kg. Afin de limiter au maximum l'impact de la masse sur la performance de la planche, une planche de surf spécifique a été fabriquée (cf 2.4) et une masse maximale de 2,5 kg a été ajoutée comme critère au cahier des charges de la conception préliminaire de la plateforme de forces.

Etendues de mesure

Considérant encore une fois que le capteur sera placé sous le pied avant du surfeur, deux configurations différentes vont alors se produire lors de l'exécution d'un mouvement du surfeur sur la vague. La première configuration (notée config. 1) correspond à la mise en position initiale du surfeur, encore appelée phase de redressement ou de « take-off ». La seconde configuration (notée config. 2) correspond à une utilisation classique du dispositif instrumenté, la planche de surf, où le surfeur aura son pied avant posé sur le capteur. Il imposera alors des mouvements tels que flexion/extension, rotation du buste, balancement des épaules et tout autre mouvement dynamique significatifs lors de l'exécution d'un mouvement sur une vague.

Afin de déterminer et d'évaluer les étendues de mesure de la plateforme de forces, une campagne d'essais a été menée en laboratoire avec une plateforme de de force AMTI 6 composantes. Cette plateforme de laboratoire permet d'évaluer les 6 composantes (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) du torseur d'actions mécaniques des efforts exercés sur celle-ci en utilisant une matrice de sensibilité préétablie (Figure 40).

SI Units: INVERTED SENSITIVITY MATRIX B(i, j)
Input to channel i (N, N-m) is B(i,j) times the electrical output j (uV/Vex)

j i	VFx	VFy	VFz	VMx	VMy	VMz
fx|	2.9129	.0347	-.0187	-.0036	-.0089	.0111
fy|	-.0287	2.9213	-.0240	-.0185	-.0051	.0101
fz|	.0193	-.0164	11.3726	-.0392	.0006	.0073
mx|	-.0002	-.0022	.0003	1.2607	.0001	-.0018
my|	-.0022	-.0016	-.0013	.0026	1.2612	-.0023
mz|	-.0006	.0029	-.0090	.0034	.0007	.5828

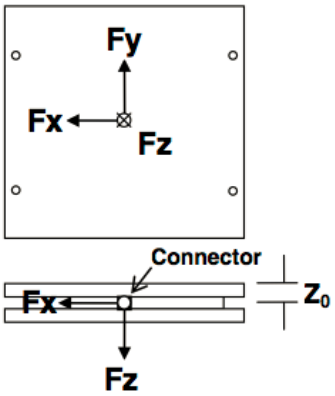


Figure 40 : Plateforme AMTI pour évaluer les étendues de mesure en laboratoire

La config.1 a été réalisée en laboratoire. Le surfeur qui effectuera la campagne expérimentale *in situ* a exécuté une série de dix « takeoff » à la verticale de la plateforme AMTI, son pied avant venant se positionner dynamiquement au centre de la plateforme. Afin de déterminer une valeur moyenne critique des efforts subis par la plateforme lors de ce mouvement, le surfeur avait pour consigne de placer la plus grande partie de son poids sur sa jambe avant. Les trois composantes des efforts moyens mesurés en laboratoire, pour un surfeur d'une masse de 60 kg, lors de la config. 1 sont représentées sur la Figure 41 :

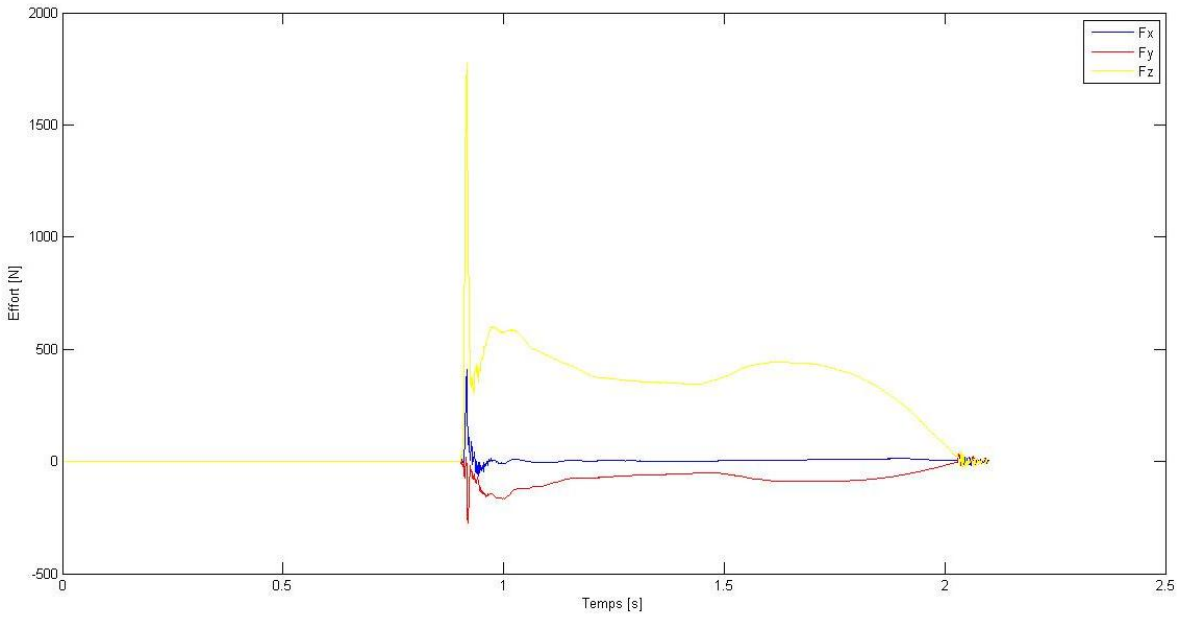


Figure 41 : Efforts moyens mesurés par la plateforme AMTI en laboratoire en config. 1

La config.2, également réalisée en laboratoire, permet d'évaluer l'ordre de grandeur moyen des efforts mesurés en utilisation classique. Sur la Figure 42, le surfeur exécute par exemple, en laboratoire avec uniquement son pied avant sur la plateforme (son pied arrière reposant sur un support à la même hauteur), trois mouvements de flexion/extension.

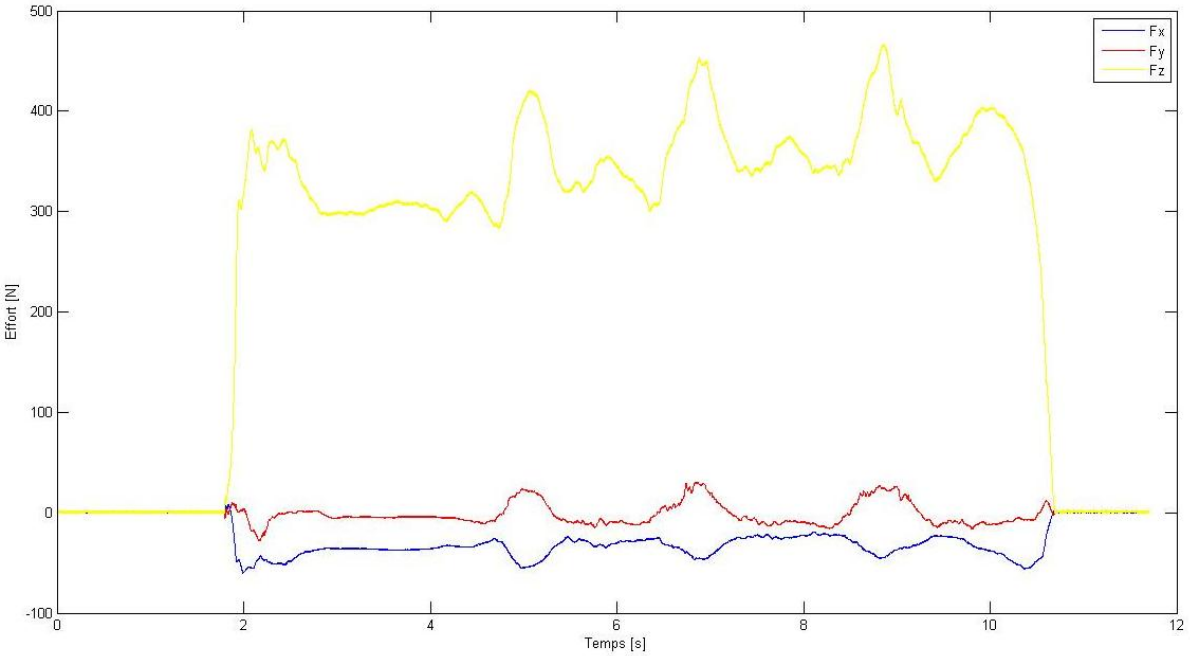


Figure 42 : Exemple d'efforts mesurés par la plateforme AMTI en laboratoire en config. 2

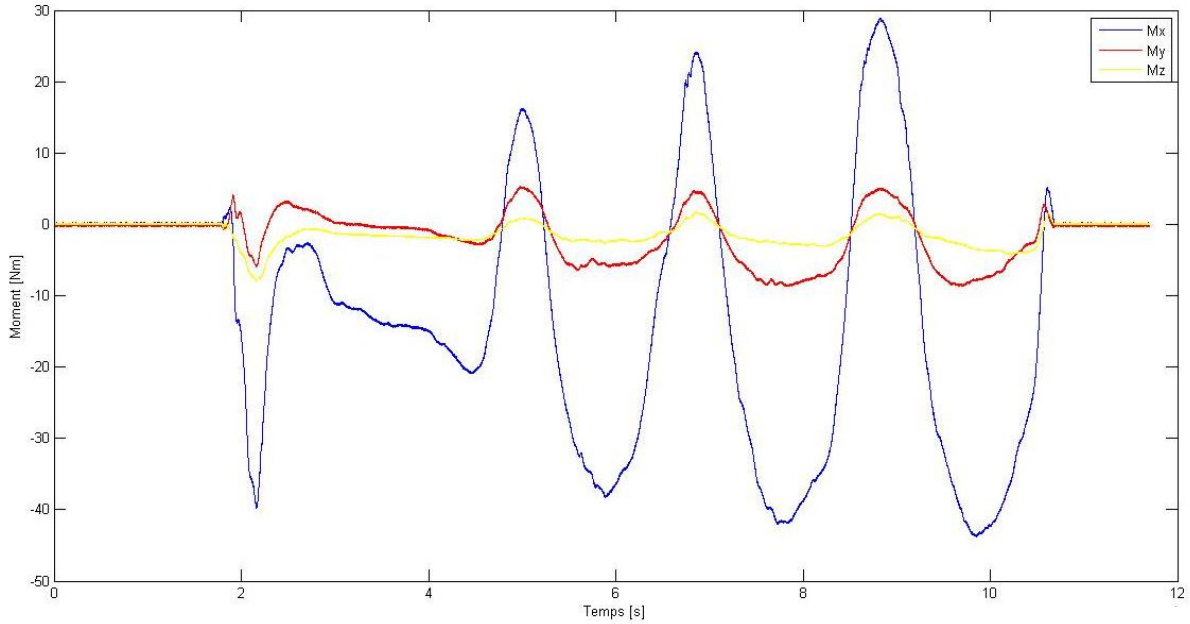


Figure 43 : Exemple de moments mesurés par la plateforme AMTI en laboratoire en config. 2

Dans le cadre d'une conception préliminaire, il est nécessaire de définir les étendues de mesure du capteur en considérant un coefficient de sécurité. Le cahier des charges précise donc que le capteur de forces ne doit pas saturer sur les mesures précédemment effectuées en prenant un coefficient de sécurité de 1,5. En généralisant les exemples de mouvements des Figure 42 et Figure 43 et considérant les efforts moyens lors de la phase de takeoff (Figure 41), les étendues de mesure nécessaires pour la plateforme embarquée sont résumées dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Etendues de mesure simultanées du cahier des charges du capteur de forces

Fx [N]	Fy [N]	Fz [N]	Mx [N.m]	My [N.m]	Mz [N.m]
600	600	2500	350	350	120

2.1.2 Description du matériel retenu

A partir du cahier des charges spécifique de la plateforme qui sera intégrée dans la planche de surf, la société SENSIX (Sensix, 2016), spécialisée dans la conception de capteur de forces sur-mesure et plus particulièrement de capteurs de forces embarqués, a conçu un capteur d'effort six composantes répondant aux critères définis à partir des travaux de (Boucher, 2005).

Il s'agit donc d'un capteur constitué d'un corps d'épreuve, pièce mécanique se déformant sous l'action des efforts à mesurer dont les extrémités rigides inférieures et supérieures sont reliés par l'intermédiaire de six poutres déformables. Ces six poutres sont équipées de jauges de déformations afin de mesurer la déformation de chaque poutre et ainsi de déduire par une relation linéaire les composantes d'effort. La disposition des jauges de déformation ont été choisies afin de former six ponts complets de Wheatstone à 5000 ohms qui, alimentés par une tension de référence stabilisée, fourniront une tension de mesure amplifiée par un amplificateur d'instrumentation. Le conditionnement intégré permet ainsi de s'affranchir d'une instrumentation externe supplémentaire pour obtenir la tension de mesure. Les six tensions de mesure obtenues permettent alors de calculer les six composantes d'effort en utilisant la relation suivante :

$$F = G \times U \tag{2.1}$$

Avec :

- F le torseur d'actions mécaniques dont les composantes $(F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^t$ sont exprimées en N pour les forces et en Nm pour les moments.
- U le vecteur regroupant :
  - Les 6 tensions de mesure exprimées en V $(U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6)^t$
  - Les 6 éléments quadratiques $(U_1^2, U_2^2, U_3^2, U_4^2, U_5^2, U_6^2)^t$
  - Les 15 éléments d'interactions U_iU_j obtenus en effectuant le produit des tensions Ui et Uj tels que $i \neq j$, $j > i$ et, i et j compris entre 1 et 6
- G la matrice d'étalonnage 6x27 d'ordre 2 fournies par SENSIX.

Les étendues de mesure simultanées ci-dessous sont établies en considérant la sollicitation maximale du capteur lorsque l'effort est multi-composantes. En stimulant une seule composante à la fois, ces étendues de mesure sont considérablement supérieures (voir Tableau 5).

Tableau 5 : Etendues de mesure de la plateforme de forces

	F_x (N)	F_y (N)	F_z (N)	M_x (Nm)	M_y (Nm)	M_z (Nm)
Etendue de mesure simultanée	600	600	2500	305	305	120
Etendue de mesure par composante	500	5400	14500	560	650	750

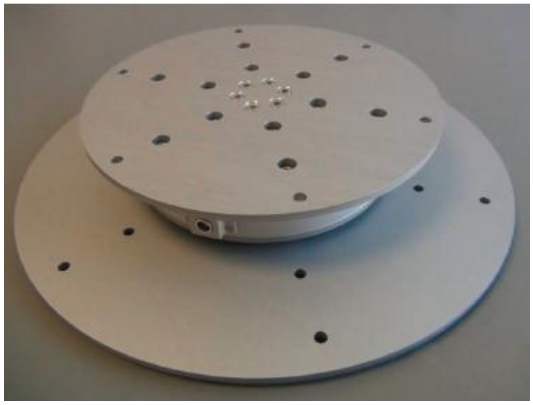


Figure 44 : Photo de la plateforme de force SENSIX

La plateforme de forces SENSIX (Figure 44) est munie d'un ensemble de brides ; une bride inférieure permettant la fixation à l'intérieur de la planche et une bride supérieure jouant le rôle de plateau support pour le pied avant du surfeur.

2.2 La centrale inertielle

L'objectif de la centrale inertielle intégrée à la planche de surf est de mesurer les accélérations longitudinales et les vitesses angulaires de celle-ci lors de l'évolution d'un surfeur sur la vague. Un accéléromètre trois axes et un gyromètre trois axes sont alors utilisés afin de mesurer respectivement les accélérations (a_x, a_y, a_z) et les vitesses angulaires (Ω_x, Ω_y, Ω_z).

Accéléromètre 3-axes ADXL345

L'accéléromètre 3-axes ADXL345 (Analog Devices, U.S.A.) est couramment utilisé pour les mesures d'accélérations dans le domaine des applications mobiles. C'est un accéléromètre numérique, capable de mesurer jusqu'à ±16g. Il permet de mesurer l'accélération continue due à la gravité (utilisée dans le cadre de la fusion de données et de mouvements de *tilt-coordination* (Elloumi, 2006)) mais avant tout les accélérations instantanées dues à un mouvement ou un choc. Sa résolution sur 10-bit permet une précision de mesure de 4 mg/LSB.

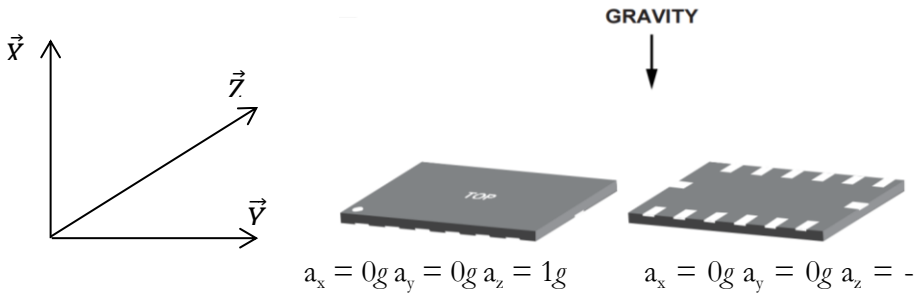


Figure 45 : Mesures de l'accéléromètre en fonction de la gravité

Gyromètre 3-axes ITG3200

Le gyromètre 3-axes ITG3200 (Invensen, U.S.A.), couramment utilisé dans les applications portables, la robotique et les interactions 3D, détermine les vitesses angulaires numériques (convertisseur analogique/numérique 16-bit intégré) selon les trois axes Y, Y et Z. Avec une étendue de mesure de ±2000°/s, le gyromètre ITG3200 a une précision de 14,375 LSBs par °/s.

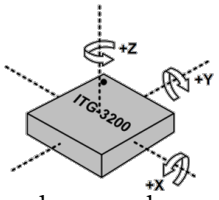


Figure 46 : Orientation des axes du gyromètre ITG3200

2.3 Le système d'acquisition Arduino

Les objectifs de la campagne expérimentale sont de mesurer et d'enregistrer les efforts du surfeur sur la planche et les variations d'accélérations et de vitesses angulaires de la planche ; autrement dit de mesurer et d'enregistrer les données issues de la plateforme de forces et de la centrale inertielle embarquées. Pour cela, il est primordial que le système d'acquisition soit également embarqué afin de ne pas interférer avec les mouvements du surfeur, et de pas prendre le risque de perdre les données enregistrées par une liaison sans fil.

Le système d'acquisition utilisé est une carte Arduino Mega 2560 (Figure 47).



Figure 47 : Carte Arduino Mega 2560

Equipée d'un microcontrôleur ATmega2560, cette carte d'acquisition possède 54 entrées/sorties numériques et 16 entrées/sorties analogiques. Le régulateur intégré permet également de délivrer une tension comprise entre 0 et 5 V afin d'alimenter par exemple un ou plusieurs capteurs.

En ce qui concerne la programmation du microcontrôleur, la carte Arduino Mega peut être programmée en C/C++ directement à partir du logiciel open source Arduino (Arduino, 2016). Tous les capteurs seront reliés à cette carte d'acquisition permettant ainsi de synchroniser les différents signaux entre eux.

2.3.1 Acquisition et stockage des données

Les données issues de la centrale inertielle et la plateforme de forces embarquées sont respectivement des données numériques (l'accéléromètre et le gyroscope sont des capteurs numériques) et des données analogiques (le capteur de forces délivre six mesures analogiques). L'acquisition des données peut donc se faire directement par les ports d'entrées numériques et analogiques de la carte Arduino sans conversion aucune au préalable.

Le programme d'enregistrement des données, stocké sur le microcontrôleur, définit les actions de lecture des mesures capteurs et d'écriture de ces mesures dans un fichier prédéfini. Les mesures enregistrées sont donc les mesures brutes et aucun traitement des données n'est effectué lors de l'acquisition. Le programme d'enregistrement définit également la fréquence d'acquisition des mesures. Le stockage des données et du fichier se fait sur microcarte SD grâce au module de stockage présenté Figure 48.

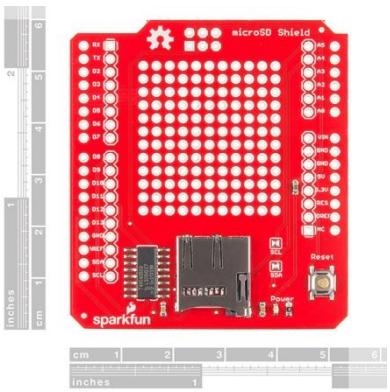


Figure 48 : SD Shield

Chaque fichier de mesures obtenu possède donc l'ensemble des données regroupées dans le tableau 3.

Tableau 6 : Structure du fichier d'enregistrement des données *in situ*

Temps	a_x	a_y	a_z	Ω_x	Ω_y	Ω_z	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6
(s)	(bits)	(bits)	(bits)	(bits)	(bits)	(bits)	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)	(V)

Avec :

- (U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6) les six tensions de mesures de la plateforme de forces.
- (a_x, a_y, a_z) et (Ω_x, Ω_y, Ω_z) les entrées numériques correspondant aux mesures respectivement des accélérations longitudinales et des vitesses angulaires.

2.3.2 Déclenchement et synchronisation des mesures

Afin d'évaluer précisément les interactions entre le comportement du surfeur et la dynamique de la planche, il est primordial d'avoir une synchronisation des données mesurées. Le choix a été fait d'utiliser une seule et unique centrale d'acquisition et d'enregistrer en continu, dès le déclenchement de l'acquisition, les données issues des différents capteurs. Il aurait été possible d'utiliser plusieurs centrales d'acquisition et, par l'intermédiaire d'un réseau de triggers de synchroniser le déclenchement des mesures.

En ce qui concerne le déclenchement du démarrage de l'acquisition, un interrupteur est utilisé afin de commander le lancement de l'écriture dans le fichier de mesures placé sur la carte microSD, des données issues des différents capteurs. Cela suppose ainsi que les capteurs et la carte d'acquisition ont été initialisés et sont alimentés en continu. Le déclanchement est effectué par le surfeur avant chaque vague. L'interrupteur doit également être actionné pour signifier la fin de l'acquisition et la fermeture du fichier de mesures. Un rétro-éclairage intégré de l'interrupteur permet à l'utilisateur de s'assurer que l'acquisition est en cours.

La Figure 49 représente le schéma structural du déclenchement et de l'acquisition des mesures.

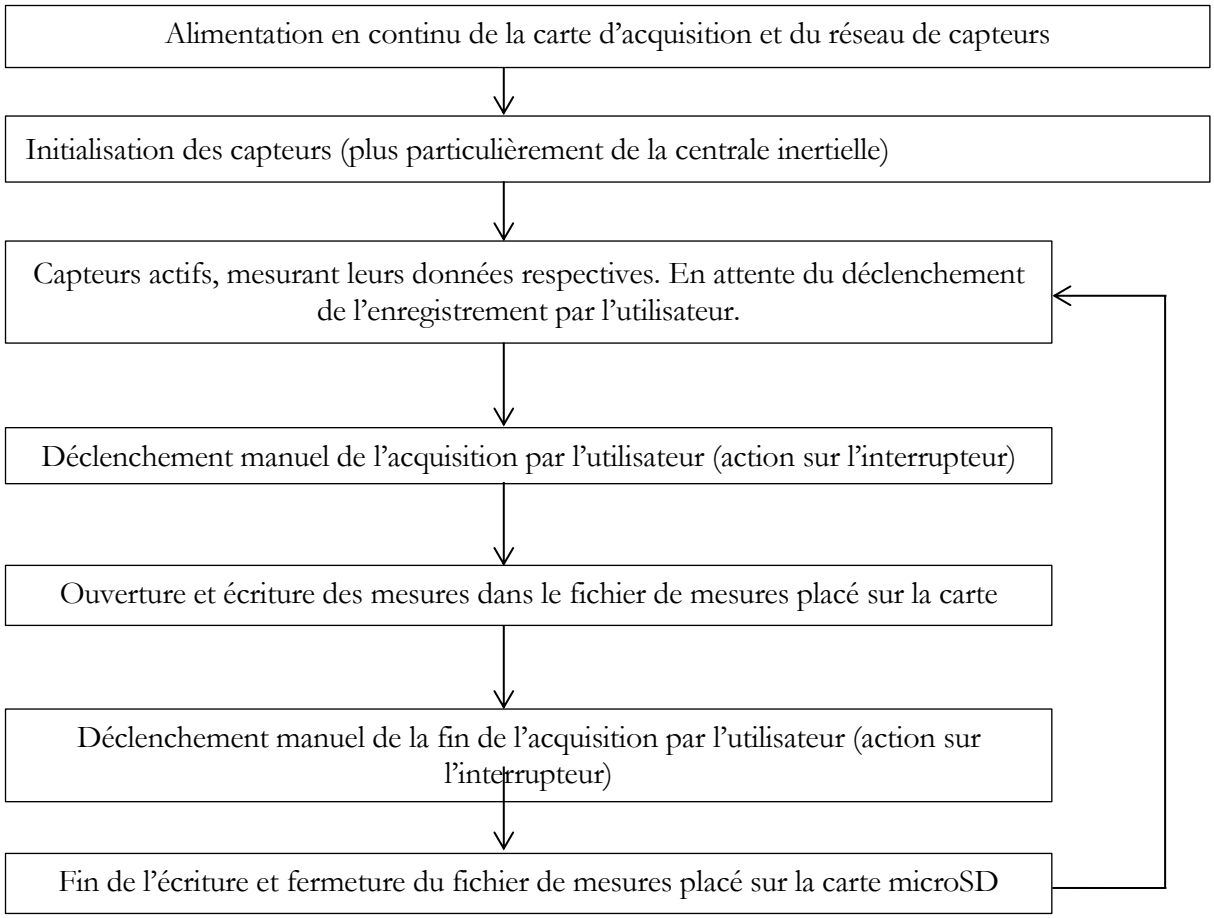


Figure 49 : Schéma du déclenchement des mesures *in situ*

L'ensemble des capteurs (plateforme de forces, accéléromètre et gyromètre) est alimenté par la carte d'acquisition Arduino. Cette dernière est alimentée par une pile 9V. En alimentation continue avec cet ensemble de capteurs et en écriture dans le fichier, l'autonomie de l'acquisition a été évaluée à 1h, en amont des essais réels

2.4 La planche de surf

Dans le cadre du projet SIMUSURF, le choix d'instrumenter intégralement la planche de surf a été fait. Cela a permis de limiter la gêne pour les mouvements du surfeur mais également de travailler sur une forme de planche particulière permettant d'accentuer de manière significative les changements d'appuis du surfeur. En effet, l'objectif d'instrumenter un tel dispositif étant d'évaluer les interactions Surfeur/Planche/Vague, il est nécessaire d'utiliser une planche de surf qui demande à l'utilisateur (le surfeur) d'anticiper et d'effectuer chaque mouvement de manière significative. Ce sont ces mouvements caractéristiques qui seront déterminants pour la mise en place d'un modèle numérique d'interactions entre le surfeur, son matériel et la vague sur laquelle il évolue.

2.4.1 Conception et réalisation

De manière générale, une planche de surf est caractérisée par un ensemble de six données qui sont le template (ou encore outline), l'épaisseur, le rocker, le dessus et le dessous et les rails de la planche.

Le template ou outline

Le template, également appelé l'outline, représente la courbe extérieure de la planche de surf (Figure 50). Cela définit principalement la longueur, la largeur et le tail (arrière de la planche).

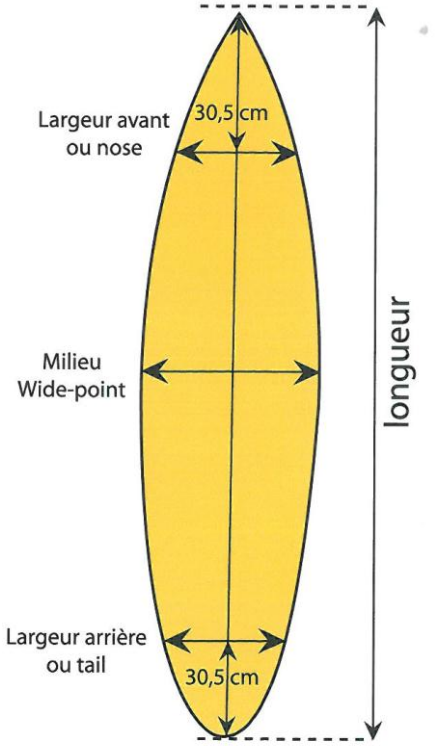


Figure 50 : Template général d'une planche de surf

Une longueur importante de la planche permet d'améliorer le confort de la rame, la flottaison de la planche, la stabilité lors de déplacements et la facilité à prendre une vague. Les planches longues sont donc destinées tout particulièrement aux forts gabarits, aux débutants ou encore aux amateurs de grosses vagues. A l'inverse, une planche relativement courte permet une maniabilité et une vivacité de déplacement sur la vague très accentuées. Les transferts de poids de l'avant vers l'arrière et la prise de rail lors d'une trajectoire sont facilités mais restent cependant en situation de déséquilibre du fait d'une instabilité accrue. Ainsi, les planches courtes sont destinées tout particulièrement aux petits gabarits, aux surfeurs à la technique excellente et aux amateurs de surf de petites vagues.

Une largeur importante au milieu de la planche (peut-être légèrement décalé selon le centre de gravité et le volume de la planche) permettent également d'améliorer le confort de la rame, la

flottaison de la planche, la stabilité lors de déplacements et la facilité à prendre une vague. Du fait de la difficulté à effectuer des trajectoires complexes et radicales, les planches larges sont destinées tout particulièrement aux forts gabarits, aux débutants et également au surf de petites vagues. A l'inverse une planche étroite a une flottaison moins importante. Pour pouvoir être efficace lors de trajectoires sur une vague, il est nécessaire que la vague soit génératrice de vitesse donc chargée d'énergie et de puissance. Ainsi, une planche étroite est avant tout destinée aux gabarits légers, aux surfeurs à la technique excellente et au surf de vagues creuses et puissantes.

Le tail désigne la forme de l'arrière de la planche de surf. Il permet d'affiner l'outline en fonction du type de vagues surfées et du niveau du surfeur. Principalement nous retrouvons le square tail, le rounded pin tail, le rounded square tail, le pin tail et le swallow tail (Figure 51).

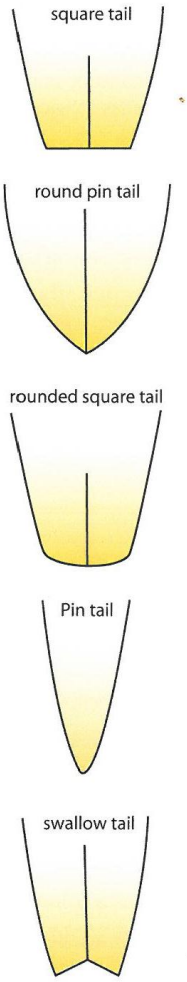


Figure 51 : les différents types de tail

Sans rentrer précisément dans les détails, nous pouvons définir que :

- Le Square Tail permet d'accentuer la vitesse, l'accélération et la maniabilité dans les petites vagues.

- Le Rounded Pin Tail permet de faciliter les rotations autour de l'axe longitudinal et ainsi les passages du rail extérieur au rail intérieur. Il est tout particulièrement utilisé dans les vagues puissantes et creuses.

- Le Rounded Square Tail permet d'accentuer les trajectoires courbes tout en gardant les caractéristiques du Square Tail.

- Le Pin Tail permet tout particulièrement de faciliter la stabilité et le contrôle de la planche lors de déplacements à grande vitesse. Il est principalement destiné au surf de grosses vagues.

- Le Swallow Tail a les mêmes caractéristiques que le square Tail lorsque la planche de surf évolue à plat sur le plan d'eau. Cependant, lorsqu'une trajectoire est effectuée sur le rail, il facilite la pénétration de l'arrière de la planche dans l'eau.

L'épaisseur

Il est courant de parler de la répartition des épaisseurs au milieu de la planche du nose (avant de la planche) au tail de la planche plutôt que de parler d'une unique épaisseur. Le profil ainsi obtenu s'appelle le foil (Figure 52).

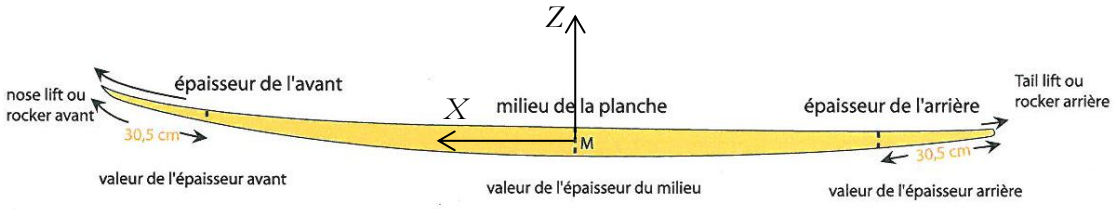


Figure 52 : Répartition de l'épaisseur d'une planche de surf

De manière générale, une planche de surf épaisse facilite la flottaison, la rame et donc la prise de vague. Cependant plus elle sera épaisse et plus elle aura des difficultés à pénétrer dans l'eau lors de trajectoires sinusoïdales. Elles sont tout particulièrement destinées aux forts gabarits, aux débutants, au surf de petites vagues avec un template court et au surf de grosses vagues avec un template long et étroit. A l'inverse, une planche fine va permettre, grâce à sa capacité à pénétrer dans l'eau, d'évoluer sur la pente de la vague avec des trajectoires plus précise et incisives. Du fait de sa moins bonne flottabilité, la rame et la prise de vague seront plus difficiles ; ainsi elles sont utilisées principalement par les gabarits, les surfeurs de très bon niveau technique et les surfeurs de vagues creuses et puissantes.

Le rocker

Le rocker désigne la courbe du dessous de la planche dans le sens de la longueur. En vue de profil, nous avons donc un rocker avant et un rocker arrière à définir (Figure 53).

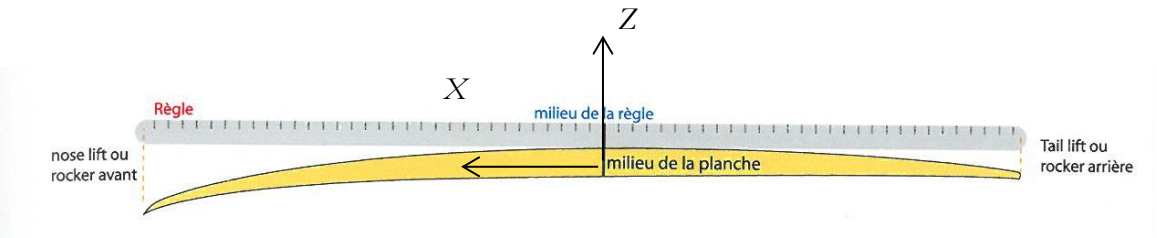


Figure 53 : Profil du rocker d'une planche de surf

Les planches qui ont un rocker (avant et arrière) important sont difficiles à la rame et pour la prise de vague mais permettent d'effectuer des rotations en pivot autour du pied arrière plus facilement. A l'inverse les planches qui ont peu de rocker permettent de générer de la vitesse plus facilement et facilitent ainsi la rame et la prise de vague. Ainsi le rocker le plus communément utilisé et le plus polyvalent est composé en trois parties : accentué à l'avant pour permettre à la planche et au surfeur de ne pas perdre de la vitesse avec d'éventuels frottements au niveau du nose, plat au milieu pour augmenter la vitesse et légèrement accentué à l'arrière pour serrer les courbes.

Le dessous de la planche

Le dessous de la planche est directement lié au rocker et à l'outline. Cependant, les trois types de dessous de planche existants vont permettre de venir influencer la vitesse et la maniabilité de la planche. Les trois types de dessous de planche classiques sont : le dessous plat, le vee bottom et le concave.

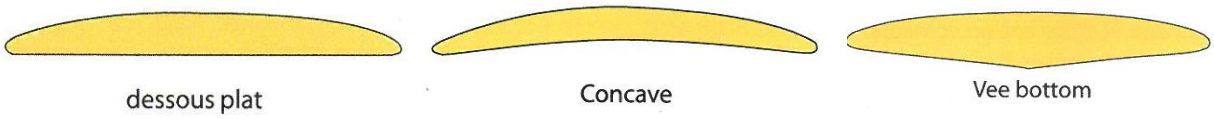


Figure 54 : Les trois types de dessous de planche

Si le dessous plat permet d'avoir une planche de surf très rapide, il va rendre difficile les passages d'un rail à l'autre autour de l'axe longitudinal à l'inverse du Vee bottom qui va faciliter ces passages rail-to-rail. L'objectif principal du concave est quant à lui de canaliser l'écoulement de l'eau sous la planche afin de reproduire l'effet Venturi et ainsi obtenir un gain de vitesse conséquent (la compression d'un liquide provoque une accélération quand il passe d'une surface large à une surface étroite.

Les rails de la planche

La conception des rails de la planche est généralement la dernière étape lors du shape (conception de la forme) d'une planche de surf. En effet, les rails vont définir l'écoulement de l'eau le long du template, influencer la flottabilité, la manœuvrabilité et la vitesse de la planche.

Les rails épais augmentent la flottabilité mais sont très difficiles à pénétrer dans l'eau pour effectuer des trajectoires sinusoïdales. Ainsi s'ils permettent d'augmenter la vitesse ils rendent également compliqué le contrôle de la planche à grande vitesse. Les utilisateurs principaux sont donc les surfeurs destinés à surfer les petites vagues. A l'inverse, les rails minces (souvent appelés « couchés » ou « pincés ») vont pénétrer très facilement dans l'eau et assurer un contrôle précis lors de la réalisation trajectoires courbes. Les rails sont définis tels que présenté sur la Figure 55.

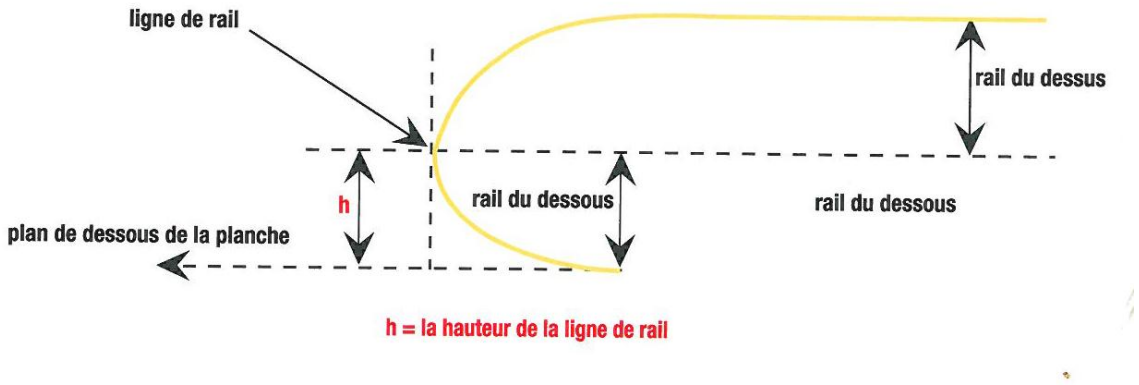


Figure 55 : Définition des rails d'une planche de surf

En conclusion et au vu du cahier des charges mis en place dans le cadre de projet SIMUSURF, nous avons fait le choix de concevoir une planche de surf permettant d'être surfé par un surfeur haut-niveau de petit gabarit, et capable ainsi de pouvoir réagir à des appuis et prises de rail afin de générer de la vitesse. De plus, nous avons considéré le fait que la planche allait être principalement surfée dans des petites vagues étant donnée l'instrumentation relativement lourde et onéreuse qui allait être ajoutée à la planche. Reprenant les différents paramètres énoncés ci-dessus et nécessaires lors de la conception de la planche de surf nous avons choisi les caractéristiques suivantes :

- Longueur : 5'9" (180,3 cm) considérée comme petite longueur de planche
- Largeur : 22" considérée comme largeur importante nécessaire à l'insertion de la plateforme de forces et à l'augmentation de la flottabilité de la planche afin de compenser le poids du à l'instrumentation sans perde de vitesse
- Tail : Square tail

- Epaisseur : 4”
- Rocker : rocker très plat
- Dessus de la planche : Domed Deck
- Dessous de la planche : dessous plat

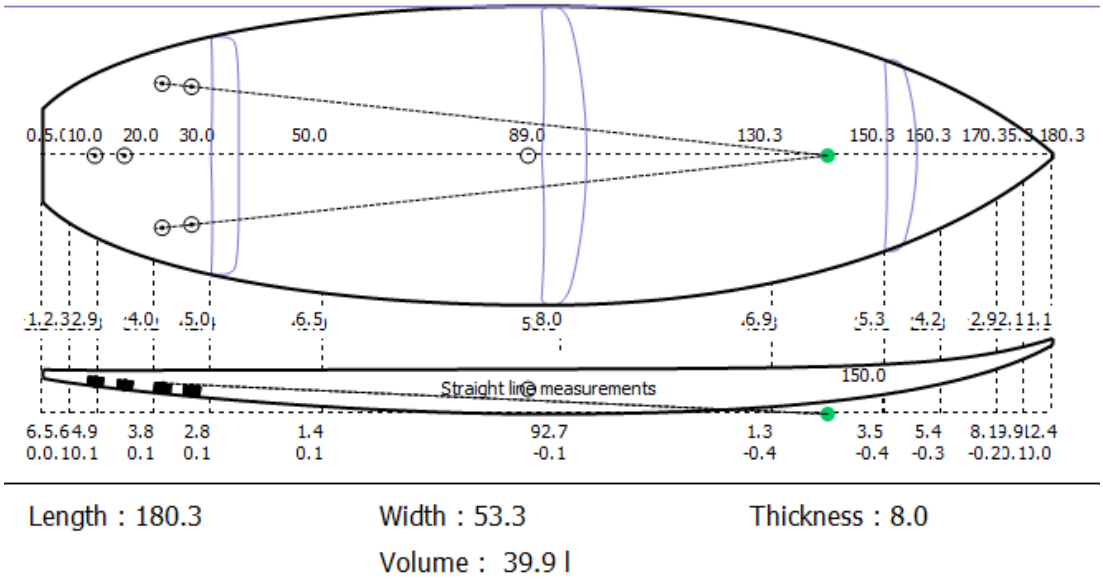


Figure 56 : Forme de la planche de surf expérimentale

2.4.2 Positionnement des capteurs et de l’électronique embarqués

Le réseau de capteurs est divisé en deux parties. L’acquisition des actions du surfeur sur la planche a lieu uniquement au niveau du pied avant du surfeur. Afin de ne pas perturber la coordination des appuis et de conserver les deux pieds du surfeur au même niveau, la plateforme de forces est placée à l’intérieur de la planche de surf, la surface de la bride supérieure de la plateforme de force étant dans la continuité de la surface de la planche. Un support de fixation a été conçu et intégré lors de la fabrication de la planche afin de permettre la fixation de la plateforme de forces par l’intermédiaire de sa bride inférieure.



Figure 57 : Support de fixation de la plateforme de forces

Les capteurs inertiels sont quant à eux placés sur le dessus de la planche de surf dans un boitier de commande accessible par l'utilisateur lorsque celui-ci est en position allongée. Tous les composants électroniques (carte d'acquisition, carte d'enregistrement microSD, batterie) sont également positionnés dans ce boitier. Celui-ci est également relié au capteur de forces par l'intermédiaire d'un câble étanche afin de fournir l'alimentation nécessaire et de récupérer les mesures en provenance du capteur. L'interrupteur de déclenchement est placé sur le boitier afin que l'utilisateur puisse l'actionner facilement.

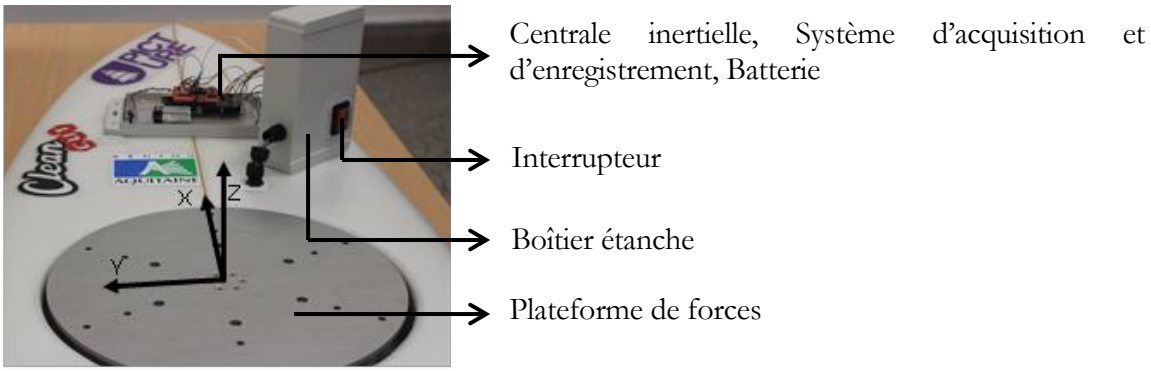


Figure 58 : Positionnement des capteurs et de l'électronique embarqués

2.4.3 Etanchéité du matériel expérimental en environnement marin

Le dispositif à instrumenter évolue dans un environnement aquatique complexe. En effet, l'environnement marin nécessite d'avoir un dispositif expérimental résistant à l'eau salée mais également résistant aux différents changements de pression et chocs qui peuvent être générés par l'impact d'une vague sur le matériel. Si l'ensemble de l'électronique (centrale d'acquisition et batterie) ainsi que les capteurs inertiels sont déportés dans un boitier étanche sur le dessus de la planche de surf, la plateforme de forces quant à elle n'est pas résistante à l'eau et encore moins à un environnement marin.

Deux problématiques se posent alors à propos de l'étanchéité de la plateforme de forces ; la première concerne la nécessité d'avoir un contact quasi-direct entre la bride supérieure du capteur de forces et le pied du surfeur afin de ne pas avoir de déperdition des efforts mesurés. La seconde concerne la méthode de fixation du dispositif étanche sur la planche de surf.

Plusieurs essais ont été effectués en laboratoire afin de déterminer le tissu étanche le plus fin et le plus résistant à la fois afin de ne pas venir perturber la mesure du torseur d'actions mécaniques. Le choix s'est porté sur un tissu « Seaguard Flex 5400 » (Dickson, Wasquehal, France) (Dickson, 2013) couramment utilisé dans le domaine maritime pour notamment équiper les tauds de bateaux ou effectuer des réparations en mer. Les caractéristiques d'un tel tissu sont fournies dans le Tableau 7.

Tableau 7 : Caractéristiques du tissu étanche Seaguard Flex

Caractéristiques	Valeurs
Composition	Support Polyester Haute Tenacité 208 dtx
Densité	300 g/m²
Résistance rupture	110 daN
Résistance déchirure	9 daN
Schmerber	>10 000 mm

Pour ce qui est de la fixation du tissu Seaguard Flex sur le dessus de la planche de surf, il est nécessaire que celle-ci soit étanche mais également temporaire afin de pouvoir retirer la plateforme de forces après chaque campagne expérimentale. La solution proposée consiste à venir positionner et fixer le tissu étanche par-dessus le capteur de forces et fixer les rebords de celui-ci sur la planche de surf à l'aide d'une bande d'étanchéité bitumineuse autocollante à haute adhérence et très résistante à la déchirure.



Figure 59 : Bande d'étanchéité bitumineuse

2.5 Caméras vidéo

De manière générale, l'objectif de la mise en place d'une campagne expérimentale est d'effectuer une série de mesures et de tests, en laboratoire ou en conditions opérationnelles, sur un dispositif particulier (matériau, structure, procédé par exemple). Dans ce contexte, l'intérêt d'inclure au sein du processus expérimental une caméra peut être double : elle peut être utilisée aussi bien en tant que dispositif quantitatif que de dispositif qualitatif.
Si les premières études d'analyse de mouvement à l'aide de la photographie remontent au 19ème siècle, nous utilisons aujourd'hui l'outil « caméra » pour évaluer et mesurer un certain nombre de données dès lors qu'un objet est en mouvement. A l'heure actuelle, différentes techniques sont employées utilisant des dispositifs allant de la caméra rapide capable d'enregistrer jusqu'à 250.000 images par seconde à la caméra infrarouge présente dans un équipement optoélectronique pour l'analyse du mouvement. Ces différentes techniques utilisent alors la caméra comme un outil de mesure quantitatif (Zong, 2013) . Dans le domaine de la mécanique et plus particulièrement de l'étude de la réponse à l'impact d'un matériau ou

d'une structure, une caméra rapide permet de calculer la vitesse d'un projectile afin de déterminer une vitesse d'impact (CHUZEL, 2009) ou encore d'analyser le comportement du matériau sous sollicitations dynamiques (Viot, *et al.*, 2003). Dans le domaine de la biomécanique, les systèmes optoélectroniques sont aujourd'hui les outils de mesure de mouvement en 3D de référence (Lepoutre, 2007) (Monnet, *et al.*, 2010). Ce sont des systèmes comprenant un ensemble de caméras infrarouges ainsi que plusieurs marqueurs sphériques photo-réfléchissants placés sur le sujet ou l'objet à étudier. Généralement installé dans une salle d'acquisition, les caméras infrarouges ont pour rôle de capter les positions des marqueurs positionnés sur le sujet. Le recoupement des informations issues des caméras, calibrées les unes par rapport aux autres permet de déterminer les coordonnées dans l'espace de chaque marqueur au cours du temps (Figure 60).

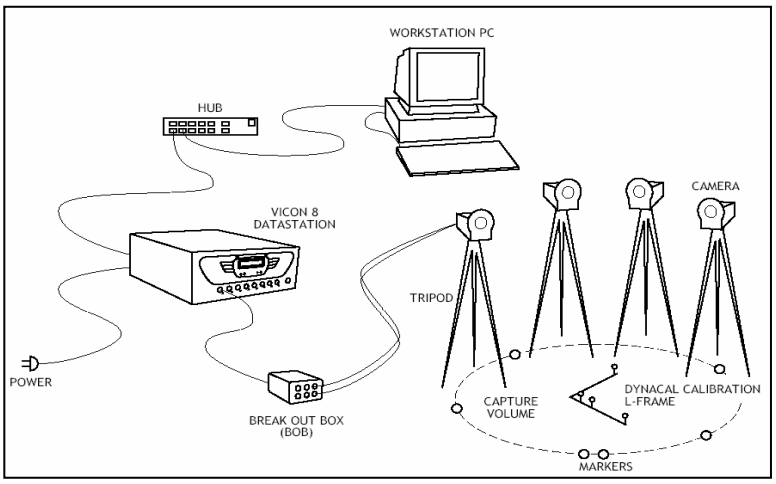


Figure 60 : Equipement optoélectronique pour l'analyse du mouvement

Dans le cas où la mesure par équipement vidéo est impossible à cause des conditions expérimentales, la caméra reste cependant un outil qualitatif permettant d'avoir une vue d'ensemble de l'essai effectué. Des méthodes de validation qualitative peuvent alors être mises en place afin de valider par exemple les conditions d'essais, le positionnement du dispositif ou encore les interactions et perturbations entre le matériel expérimental et l'environnement. Ces méthodes de validation sont d'autant plus importantes lorsque la campagne expérimentale a lieu en conditions opérationnelles où les interactions directes avec l'environnement sont favorisées. Dans le cadre du projet SIMUSURF, les caméras utilisées sont des outils de validation qualitative des conditions d'essais, du positionnement du surfeur sur la planche et de l'évolution de celui-ci sur la vague. Les conditions expérimentales, avec principalement l'évolution du dispositif instrumenté dans l'océan, ne permettent pas aujourd'hui de venir utiliser les caméras pour venir faire de la mesure. Deux types de caméras sont utilisés cependant, une caméra embarquée et une caméra dite « on-shore » positionnée en bord de mer.

2.5.1 Caméra embarquée

La miniaturisation aidant, les caméras embarquées peuvent donner accès à des angles de vue et des captures d'images prises directement depuis et sur le dispositif instrumenté. Ici, la planche de surf offre un support pour venir positionner une caméra embarquée développée par la société GoPro (GoPro, 2016) . L'objectif de la caméra embarquée est de venir contrôler la position du pied-avant du surfeur sur la planche, et plus particulièrement sa position par rapport à la plateforme de forces. En effet, le positionnement du pied du surfeur étant libre sur la planche, il est nécessaire d'avoir un moyen de contrôle de la position du pied sur le capteur. De plus, nous verrons par la suite que la mesure du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur la planche permet de déterminer la position du centre de pression du pied sur le capteur ; une méthode de validation qualitative de cette position consiste alors à utiliser la capture d'images de la caméra embarquée. Cette dernière est placée à l'avant de la planche de surf, sur le boitier étanche contenant l'ensemble des composants électroniques, et orientée vers la plateforme de forces. Le déclenchement de la caméra est ainsi accessible à l'utilisateur puisque placé au même niveau que l'interrupteur servant à déclencher l'acquisition des capteurs (voir Figure 61).

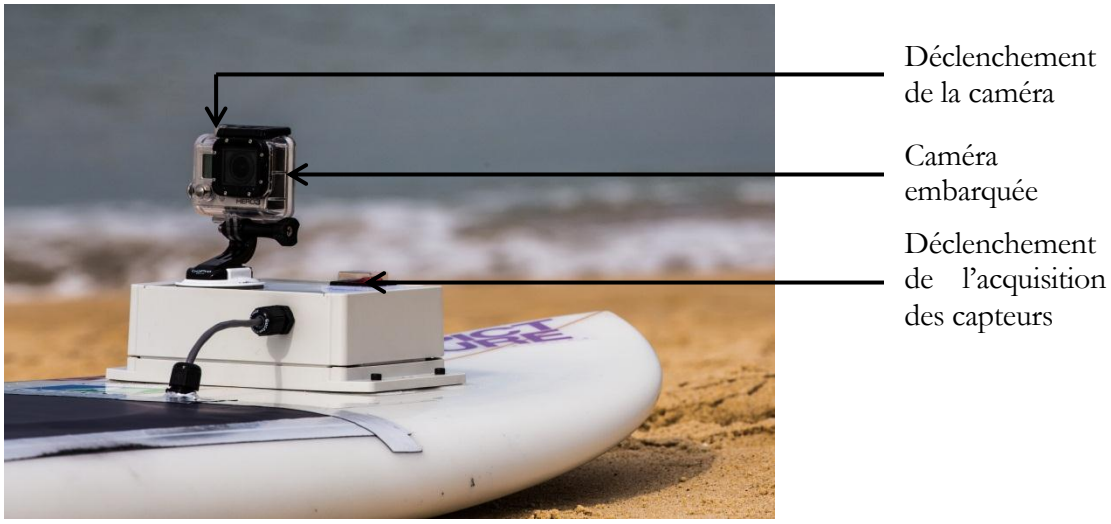


Figure 61 : Positionnement de la caméra embarquée

La caméra n'étant pas directement reliée à l'enregistrement de l'ensemble des mesures issues des différents capteurs, la synchronisation de la capture d'images avec les mesures effectuées est réalisée *a posteriori*. Pour cela, le temps caractéristique correspondant à l'instant où le surfeur se lève de la planche et où son pied avant entre en contact avec le capteur de forces est utilisé. Ce temps caractéristique est identifié sur la mesure de l'effort vertical, caractérisé par un pic important et de courte durée. Les captures d'images de la caméra embarquée, enregistrant à 60 images par seconde, permettent d'identifier l'instant caractéristique t_0 où le pied du surfeur entre en contact avec le capteur de forces. La synchronisation des données-capteur et de la caméra embarquée est alors ajustée. La précision de cette synchronisation est dépendante de la fréquence d'acquisition de la caméra et des capteurs.

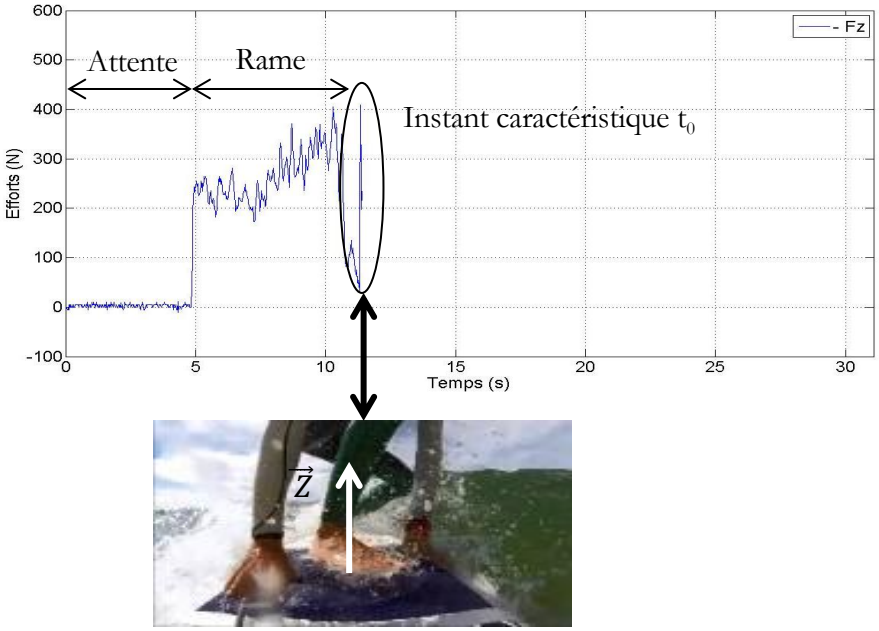


Figure 62 : Synchronisation caméra embarquée/mesures capteurs

2.5.2 Caméra *on-shore*

Afin d'avoir une vue d'ensemble du surfeur évoluant sur la vague, une caméra dite *on-shore* est positionnée au bord de l'eau sur la plage. Cette caméra est positionnée sur un trépied et est contrôlée par une personne physique. Celle-ci a pour rôle d'enregistrer le surfeur lorsqu'il évolue sur la vague afin de pouvoir déterminer qualitativement les conditions d'essais et le comportement du surfeur (mouvement du corps et position dans l'espace). En effet, si les conditions expérimentales générales de houle sont connues lors de la campagne d'essais, chaque vague prise déferle cependant avec une taille de vague différente et unique. La difficulté d'une campagne expérimentale en mer réside donc principalement dans la capacité à s'affranchir, ou du moins à pouvoir évaluer, l'évolution de l'environnement lors d'un essai.
De même que pour la caméra embarquée, la synchronisation des images de la caméra *on-shore* (Fréquence de 25 images par seconde) et des données mesurées par les capteurs est établie *a posteriori* grâce à l'instant caractéristique t_0 correspondant au moment où le surfeur se lève de la planche et pose le pied avant sur la plateforme de forces (cf Figure 63).

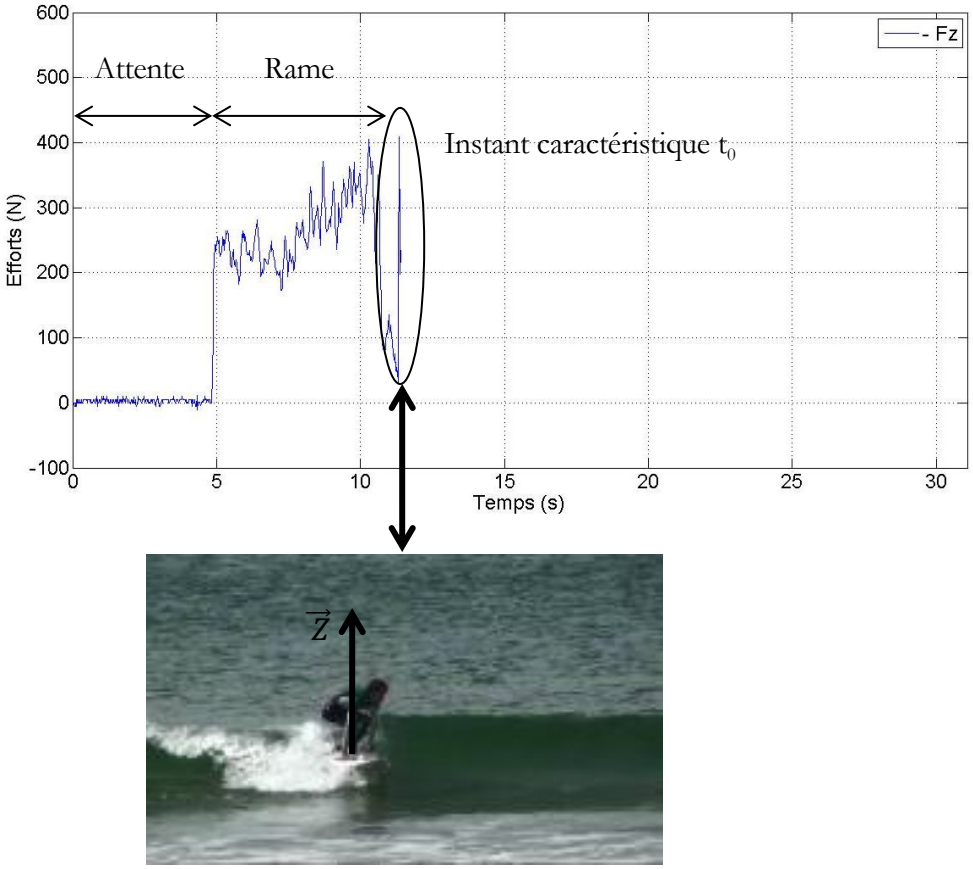


Figure 63 : Synchronisation caméra *on-shore*/mesures capteurs

3 Expérimentations

3.1 Conditions d'essais

Avant de décrire précisément le protocole expérimental, nous détaillerons les conditions de mer et notre approche dans le cadre de l'étude.

3.1.1 Conditions de mer

Dans le cadre d'une activité de surf, lorsque nous définissons les conditions de mer, deux paramètres principaux sont pris en compte : le type de vague et le vent en bord de côtes.

Le type de vague

Nous pouvons distinguer principalement quatre types de vagues influencées par quatre types de plages : les plages à fond rocheux ou coralliens, les plages avec bancs de sable et baïnes, les plages avec épis et les plages à fond plat.

- Les plages à fond rocheux ou coralliens sont caractérisées par une pointe rocheuse s'avançant dans la mer. Elles permettent d'avoir un déferlement des vagues régulier mais présentent des risques conséquents du fait de la faible profondeur d'eau et d'un sol rocailleux.

- Les plages avec bancs de sable et baïnes désignent une succession de « langues de sables » s'avançant dans la mer et de « trous d'eau » souvent très profond. Cette succession de reliefs différents génère de forts courants lorsque les conditions de vagues sont fortes avec une taille de vague élevée. Cependant, ces vagues sont très propices au surf du fait que les vagues déroulent sur des hauts fonds et que les courants de baïnes permettent de rejoindre le large plus facilement. C'est la configuration de plage la plus courante sur le littoral aquitain.

- Les plages avec épis sont par définition des plages qui ont été aménagées par l'Homme pour protéger le littoral de l'avancée des eaux. Des épis (avancé rocailleuse dans l'eau) ont été construits. Elles présentent les mêmes caractéristiques que les plages avec bancs de sables si ce n'est que les courants à proximité des épis peuvent être aléatoires et présenter ainsi certains dangers.

- Les plages à fond plat désignent les plages avec un relief constant qui remonte progressivement du large vers le littoral. Souvent idéales pour la baignade, ces plages ne présentent pas d'intérêt particulier pour la pratique de sports de glisse sur les vagues du fait que le déferlement des vagues se retrouve très limité. En effet, les vagues ont tendance à fermer étant donné le fond constant et sans grand changement de relief.

Le vent en bord de côtes

En bord de littoral nous retrouvons le phénomène de brise de mer et de terre. En cas de brise de mer et partant du principe que l'air et le vent se déplacent des zones chaudes vers les zones froides, nous pouvons en déduire que nous nous trouvons dans une situation où la terre est plus chaude que la mer. Cette situation est principalement visible en journée lors des saisons chaudes. A l'inverse, nous retrouvons une brise de terre principalement la nuit pendant les saisons chaudes et parfois en journée lors des saisons froides. En effet, dans ces cas-là, la terre se refroidit plus vite que la mer.

La brise de mer (couramment appelée vent On-Shore) n'est pas propice à la pratique des sports de glisse sur les vagues. En effet, le plan d'eau en sera dégradé et rendra le déferlement des vagues incertain et imprévisible. La brise de terre (couramment appelée vent Off-Shore) à l'inverse a tendance à ordonner la mer, à creuser les vagues et à lisser la surface de l'eau.

3.1.2 Notre approche dans le cadre de l'étude

Dans le cadre de la campagne expérimentale du projet SIMUSURF et étant donné le cahier des charges stipulant une instrumentation lourde du matériel embarqué dans et sur la planche de

surf, il est nécessaire de s'affranchir au maximum de perturbations extérieures en choisissant une configuration de plage nous permettant d'accéder facilement au lieu de la prise de vague et n'étant pas critique pour risquer d'endommager le matériel embarqué. En plus de cela, il est important d'essayer au maximum de réduire les perturbations liées aux imperfections de la surface de l'eau. Ainsi, nous avons choisi la configuration suivante : plage avec bancs de sable et baïnes en essayant au maximum d'effectuer la campagne expérimentale le matin afin d'avoir une brise de terre.

3.2 Protocole expérimental

Le protocole expérimental a pour objectif de déterminer le déroulement des essais, depuis la mise en place en laboratoire jusqu'aux actions à effectuer *in situ* lors de la réalisation des essais.

Le dispositif expérimental prévoit d'effectuer 4 essais différents. Pour chaque essai, les variables qui vont évoluer sont les suivantes :

- Les efforts imposés par l'utilisateur (2 niveaux) : immobile & flexion/extension.

- La direction choisie par l'utilisateur lors de l'évolution sur la vague (3 niveaux) : tout droit, prise de direction droite, prise de direction gauche.

Les facteurs mesurés seront toujours les mêmes pour chaque niveau : les 6 composantes du capteur de forces, les 3 accélérations longitudinales de la planche et les 3 vitesses angulaires. Les détails du protocole expérimental sont placés en annexe (cf Annexe 2).

Une fois le protocole expérimental effectué *in situ* et l'ensemble des trajectoires enregistrées, l'ensemble des post-traitements à l'analyse et l'exploitation des données se fait en laboratoire.

3.3 Identification des phases d'actions du surfeur sur une vague

Dans le surf, comme dans la majorité des pratiques sportives, le geste sportif peut être découpé en plusieurs phases. Si dans le tennis l'exemple du coup droit, du service ou du revers est souvent découpé en plusieurs phases afin d'être analysé, en surf les actions les plus intéressantes en terme d'analyse sont le take-off et la prise de vitesse. En effet, il s'agit des deux composantes essentielles qui permettent à un surfeur confirmé de pouvoir progresser et au surfeur débutant de ressentir des sensations sur la vague. Rappelons que le take-off est l'action consistant à passer de la position allongée sur la planche à la position debout sur la vague. La prise de vitesse consiste à effectuer des mouvements du bas de la vague au haut de la vague en position debout pour générer de la vitesse avec sa planche.

3.3.1 Lors du Take-off

Le take-off peut se décomposer en trois phases : l'attente de la vague, la rame pour arriver à la même vitesse que la vague et le redressement pour passer en position debout sur la planche.

- L'attente de la vague se caractérise par une position assise sur la planche au niveau du tiers arrière de celle-ci, le regard scrutant l'horizon dans l'attente de voir une vague se dessiner. Le protocole expérimental (*cf 3.2*) préconise au surfeur de déclencher l'acquisition de l'ensemble des capteurs lorsqu'il est dans cette position. De ce fait, la plateforme de forces ne doit pas être en contact avec le surfeur lorsqu'il est assis sur le tiers arrière de la planche et lorsqu'il attend la vague. Si nous analysons uniquement l'effort vertical mesuré par la plateforme, Fz doit être nul, comme illustré Figure 64.

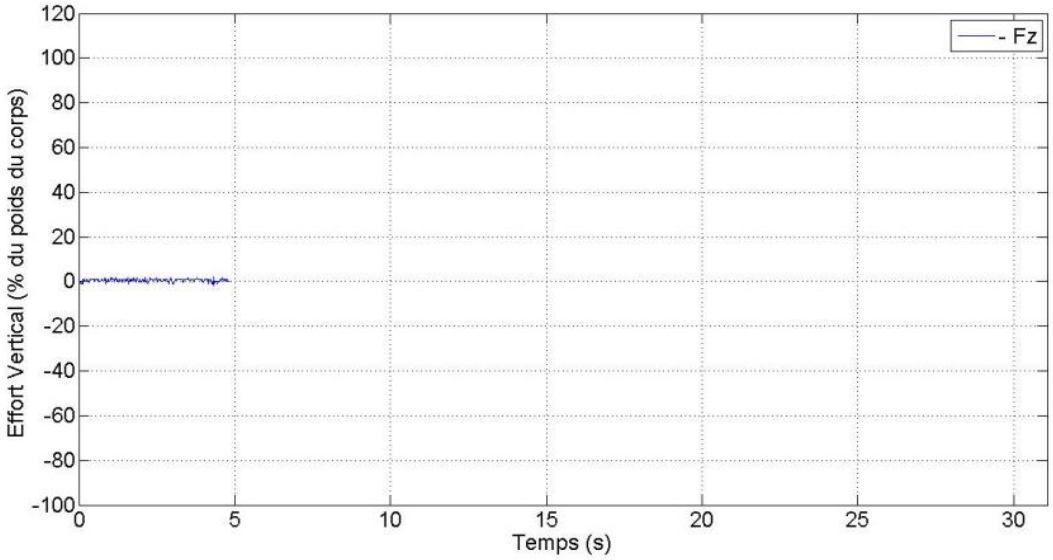


Figure 64 : Phase d'attente de la vague

- L'action de ramer se caractérise par la position allongée du surfeur sur la planche, tourné vers la plage ramenant de manière alternée son bras droit et son bras gauche le long de la planche comme s'il nageait le crawl. Cette phase a pour but d'aller à la même vitesse que celle du déferlement de la vague pour faire en sorte que la vague « porte » le surfeur. Le surfeur étant en position allongée, cela signifie qu'une partie de son corps, par l'intermédiaire de la poitrine, est en contact avec la plateforme de forces placé dans la planche. Le premier temps caractéristique correspondant au moment où le surfeur passe de la position assise à la position allongée pour se mettre à ramer peut donc être évalué par la mesure de l'effort vertical. Celui-ci passe de 0 N à un pourcentage conséquent du poids du corps du surfeur (Figure 65).

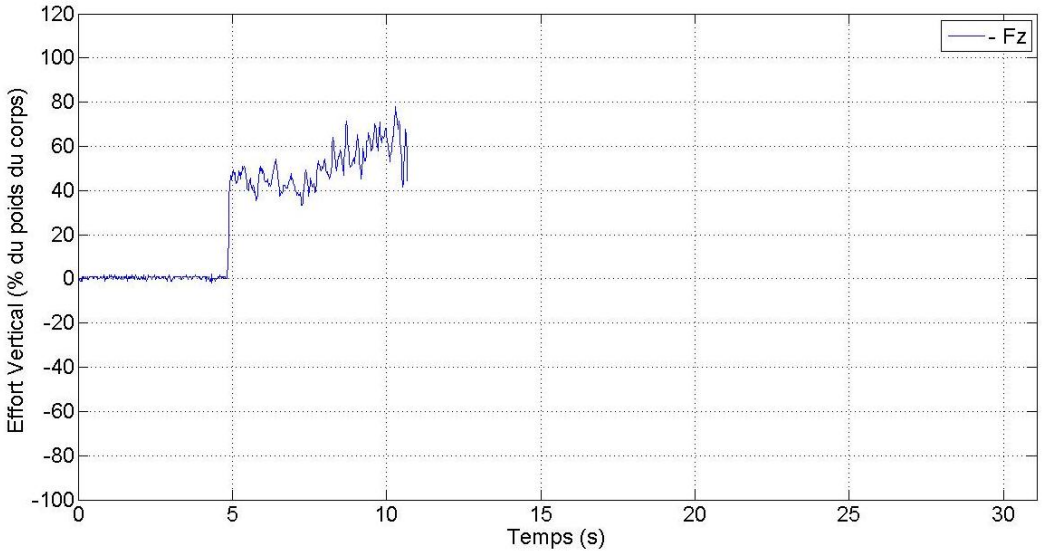


Figure 65 : Phase de rame du surfeur

- Le redressement du surfeur sur la planche, couramment appelé take-off, est l'action qui consiste à passer d'une position allongée à une position debout. Après avoir positionné ses mains sur la planche au niveau des épaules, le surfeur doit alors effectuer un mouvement dynamique de poussée vers le haut jusqu'à venir ramener sa jambe avant sous son torse. Le positionnement de la plateforme de forces a été défini de manière à ce que le pied avant du surfeur vienne se positionner sur la bride supérieure du capteur dès cette phase de redressement. Aussi il y a un temps entre le moment où le surfeur passe de la position allongée de la rame à une position debout durant lequel le capteur n'est plus en contact avec le corps du surfeur. L'analyse à nouveau de l'effort vertical illustre clairement cette phase de redressement. Un retour proche de 0 N détermine le temps où le surfeur effectue une poussée vers le haut à l'aide de ses bras. Puis le contact entre le pied avant du surfeur et la planche est alors instantané et est donc défini par un pic vertical significatif au niveau de l'effort vertical F_z.

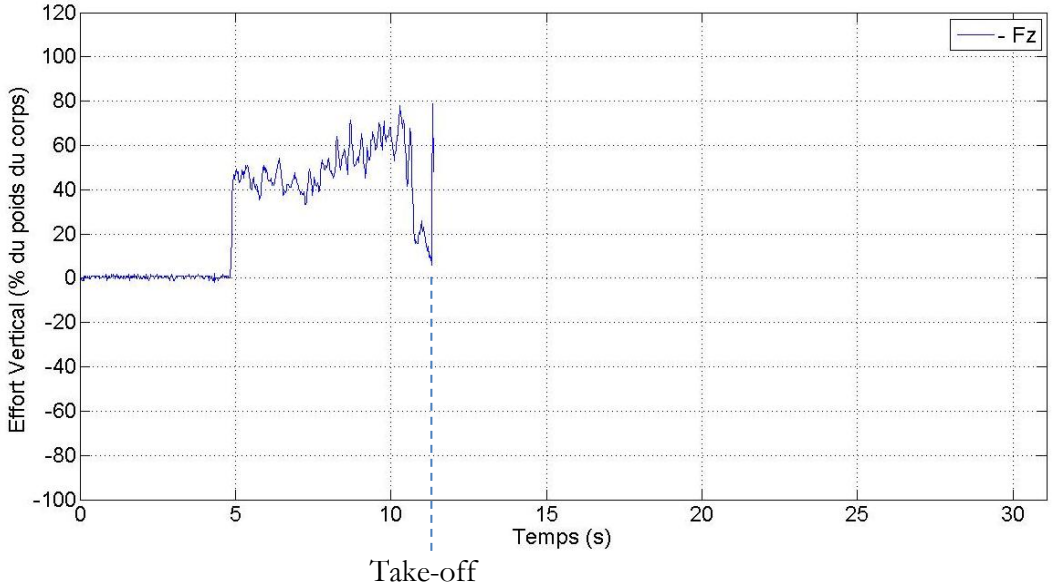


Figure 66 : Phase de redressement du surfeur sur la planche

3.3.2 Lors de la prise de vitesse

La prise de vitesse est un mouvement du surfeur et de sa planche sur la vague qui consiste à effectuer un mouvement sinusoïdal sur la face de la vague entre le bas et le haut de celle-ci (*cf 1.3.2* pour plus de précisions). Pour effectuer cette prise de vitesse, deux phases d'interactions entre le surfeur et sa planche se distinguent : lorsque le surfeur allège son appui avant pour faire remonter la planche de surf sur la pente de la vague, et lorsque le surfeur bascule le poids du corps sur la jambe avant pour prendre de la vitesse en plaçant l'avant de la planche dans la pente de la vague. Ce mouvement d'appui/allégement, répété six fois sur l'exemple ci-après, permet de déterminer la durée de l'allégement et la durée de l'appui lors de la prise de vitesse du surfeur sur la vague. Il est important de préciser que ces données temporelles sont directement liées à la taille de la vague. Cependant, pour une taille de vague donnée, il est intéressant pour un sportif et son entraîneur d'évaluer cette durée du changement d'appui en vue notamment d'une optimisation et d'une réduction de ces temps d'appui/allégement. En effet, la prise de vitesse n'étant qu'une étape intermédiaire permettant au surfeur de générer suffisamment de vitesse pour effectuer une manœuvre conséquente sur la vague, il est nécessaire qu'elle soit optimale afin d'avoir une amplitude maximale lors de la manœuvre.

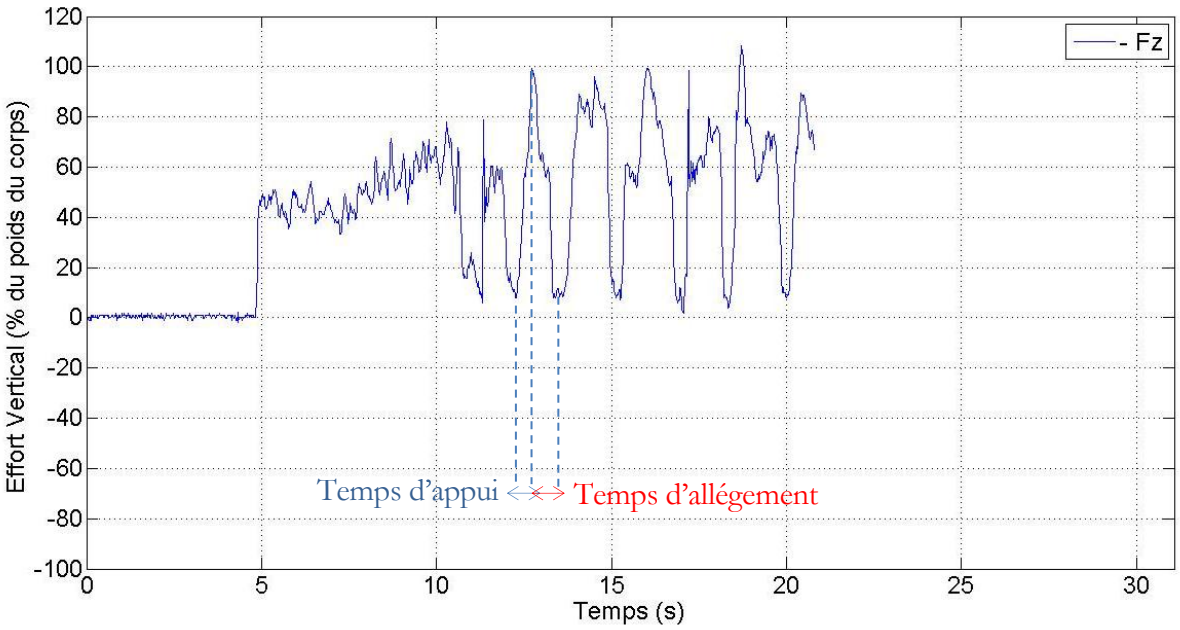


Figure 67 : Phase d'appui/Allégement du surfeur sur la planche

Retours sur une campagne expérimentale *in situ*

La campagne expérimentale menée *in situ* a permis de constituer une base de données enregistrée lors de l'évolution d'un surfeur sur différentes vagues. Le microcontrôleur du système d'acquisition placé sur la planche de surf est programmé avec pour fonction principale l'enregistrement des mesures brutes de chaque capteur, c'est-à-dire sans aucun post-traitement. L'objectif du post-traitement est donc d'effectuer une série d'actions pour déterminer à partir des mesures brutes des données ayant une signification physique et exploitable pour mettre en place un modèle réaliste d'interactions entre le surfeur et la vague.
La première étape consiste donc à convertir les mesures numériques (a_x, a_y, a_z) et (Ω_x, Ω_y, Ω_z) respectivement issues de l'accéléromètre et du gyromètre et les mesures analogiques (U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6) issues de la plateforme de forces :

Mesure	Unité
Temps	(s)
a_x	(bits)
a_y	(bits)
a_z	(bits)
Ω_x	(bits)
Ω_y	(bits)
Ω_z	(bits)
U_1	(V)
U_2	(V)
U_3	(V)
U_4	(V)
U_5	(V)
U_6	(V)



Mesure	Unité
Temps	(s)
a_x	($m.s^{-2}$)
a_y	($m.s^{-2}$)
a_z	($m.s^{-2}$)
Ω_x	($rad.s^{-1}$)
Ω_y	($rad.s^{-1}$)
Ω_z	($rad.s^{-1}$)
F_x	(N)
F_y	(N)
F_z	(N)
M_x	(Nm)
M_y	(Nm)
M_z	(Nm)

Tableau 8 : conversion des données brutes dans le S.I.

Les étapes associées définissant le post-traitement des données concernent la définition des repères de chaque capteur afin de ramener l'ensemble des mesures dans le même repère, le filtrage des données de vitesses angulaires et d'accélérations et l'identification des instants caractéristiques d'un essai considéré (pour une vague donnée). Le processus de post-traitement des données issues de la campagne expérimentale, et qui se répète pour chaque vague donnée, suit donc la Figure 68.

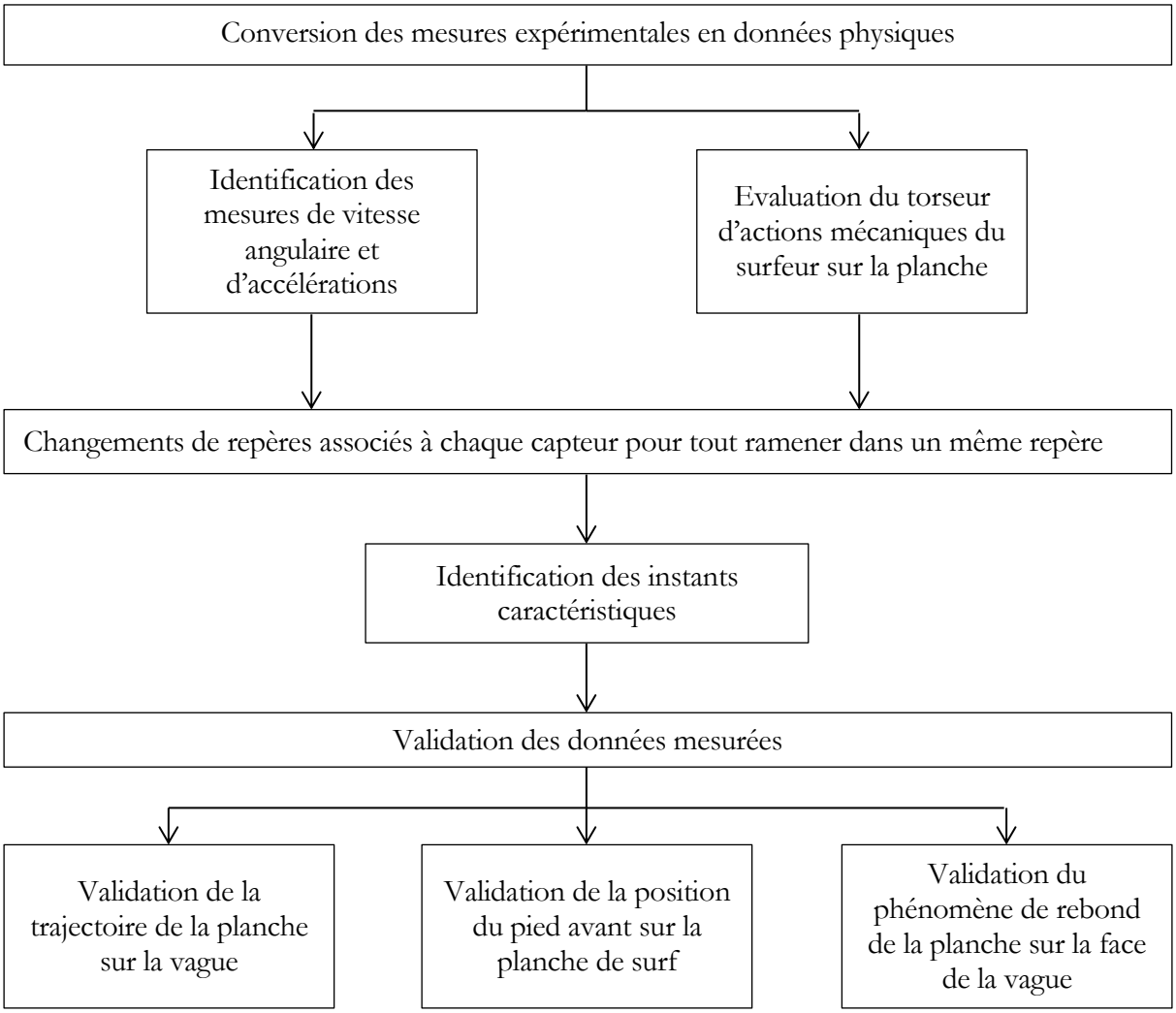


Figure 68 : Processus de post-traitement des données de la campagne expérimentale

Chapitre 3

TRAITEMENT DES DONNEES EXPERIMENTALES

1 Validation des données mesurées

Afin de valider les données mesurées lors de la campagne expérimentale, nous utiliserons trois critères de validation : la trajectoire de la planche sur la vague, le centre de pression du pied avant du surfeur sur le capteur de forces et la caractéristique du rebond de la planche sur la face de la vague.

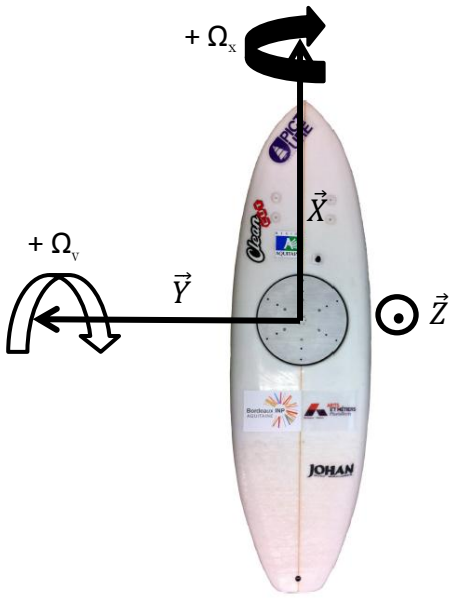


Figure 69 : Orientation des axes de la planche de surf expérimentale

1.1 Trajectoire de la planche sur la vague

L'analyse de la trajectoire de la planche sur la vague consiste à utiliser les mesures issues de l'accéléromètre et du gyromètre afin de déterminer les déplacements longitudinaux et les variations angulaires relatives. L'objectif n'est pas de déterminer la position de la planche sur la vague à chaque instant mais de déterminer les variations relatives de position. De même l'orientation angulaire de la planche à chaque instant n'est pas calculée pour privilégier les variations angulaires relatives de la planche. En effet, l'intérêt de constituer une base de données expérimentales et d'analyser ces mesures réside dans la possibilité d'anticiper la mise en place de modèles mathématiques à implanter dans la commande de l'hexapode. Ces modèles doivent permettre de déterminer les variations relatives (de position et angulaire)

d'une planche de surf en fonction du comportement du surfeur sur la planche. Il est donc nécessaire d'utiliser dès à présent ces données post-traitées. Pour obtenir les variations de positions relatives de la planche de surf, le schéma (Figure 70) de post-traitement des mesures brutes issues de l'accéléromètre est utilisé.

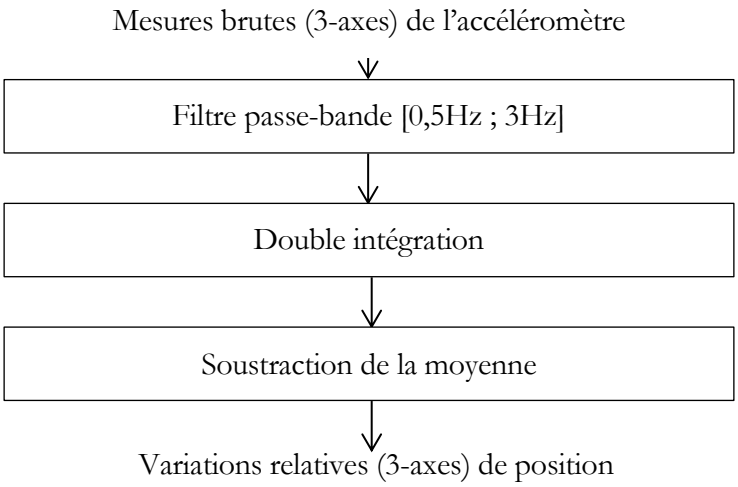


Figure 70 : Conversion de mesures accéléromètres en variations relatives de position

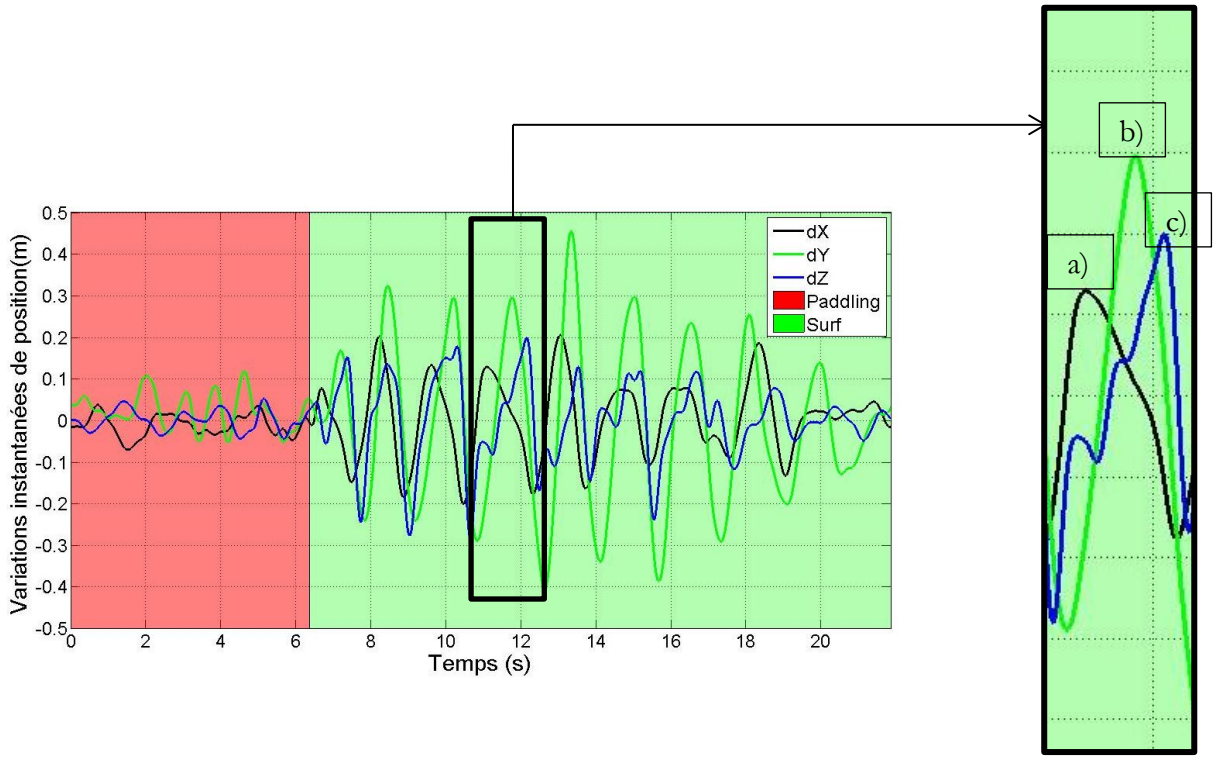


Figure 71 : Exemple de variations relatives de position de la planche de surf sur la vague

Afin de valider l'ordre de grandeur des variations relatives de position tracées sur la Figure 71, nous utilisons les images vidéos de la caméra *on-shore* (synchronisées *a posteriori*). Le plan d'enregistrement de la caméra étant le plan (Y,Z), il est possible d'évaluer qualitativement

l'ordre de grandeur des variations de positions de la planche. La vague correspondant aux mesures de la Figure 71 est représentée sur la Figure 72; l'amplitude verticale de la planche est approximativement de 30 cm ce qui correspond aux amplitudes calculées à partir des mesures de l'accéléromètre.



Figure 72 : Caméra on-shore utilisée pour la validation des trajectoires

De plus, il est intéressant d'analyser les interactions entre les variations relatives dX, dY et dZ lors d'un exemple de partie « Surf » (en vert sur la Figure 71). D'après l'orientation des axes définie Figure 69, l'approximation par abus de langage consiste à exprimer une croissance de la quantité dX comme étant une accélération longitudinale donc l'accélération horizontale de la planche sur la vague et une décroissance de dX comme étant une décélération de la planche de surf. De même pour dY et dZ. Ainsi, en analysant différentes parties d'interactions des mouvements de la planche de surf comme l'exemple zoomé de la Figure 71 correspondant à la Figure 72, il est alors possible d'expliquer et d'évaluer quantitativement le mouvement de la planche sur la vague. En effet, sur cet exemple et reprenant la théorie de la trajectoire de la planche de surf lors d'une prise de vitesse (cf 1.4.2), la planche subit une accélération longitudinale au démarrage du mouvement imposé par l'utilisateur. Mais très vite (a) la planche se met à ralentir tout le long du mouvement jusqu'à ce que la planche atteigne le point le plus haut sur la vague (c). Cela permet d'expliquer le ressenti d'un surfeur qui arrive avec une vitesse nulle en haut de vague pour ensuite exploiter pleinement la pente de la vague. De même l'analyse de la quantité dY permet d'illustrer le fait que la planche, après avoir tourné et être remontée sur la vague en « mordant » sur un rail, revient dans une position neutre à plat (changement de variation de dY (b)) avant d'avoir atteint le point le plus haut de la vague (c).

Les variations angulaires relatives, obtenues après intégration des vitesses angulaires mesurées à l'aide du gyromètre, sont également analysés pour valider les trajectoires de la planche de surf suivant la même méthodologie que précédemment.

1.2 Modèle de calcul du centre de pression du pied avant

Lors d'une acquisition, la plateforme de forces, placée à l'intérieur de la planche de surf, mesure simultanément 6 tensions définissent les 6 composantes du torseur des actions mécaniques du pied avant du surfeur sur la planche. Ces six composantes sont (F_x, F_y, F_z) et (M_x, M_y, M_z) respectivement les efforts en N et les moments en N.m définis dans le système d'axes présenté Figure 70.

Le capteur de forces possède son propre repère dont l'origine est placé à la surface et au centre du plateau supérieur, comme illustré sur la Figure 73.

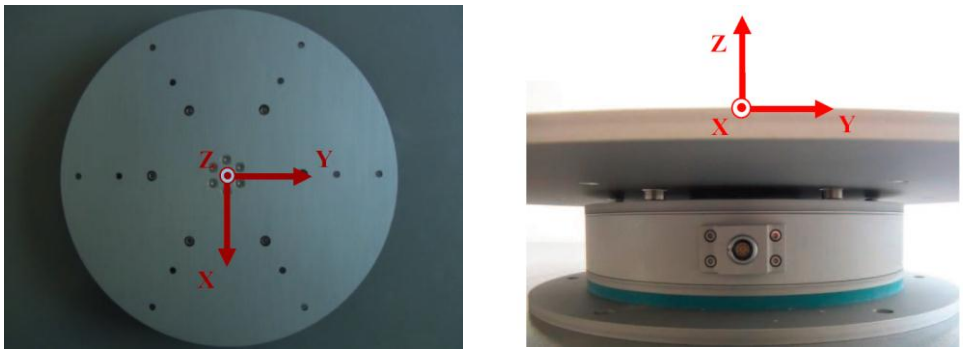


Figure 73 : Positionnement du repère du capteur de forces

De plus, lors d'une interaction entre le surfeur et la plateforme, les trois résultantes (F_x, F_y, F_z) sont indépendantes du point d'application de l'effort sur le plateau supérieur du capteur d'efforts. Les valeurs des moments (M_x, M_y, M_z) sont quant à elles dépendantes du point d'application de l'effort. Les mesures des moments (M_x, M_y, M_z) peuvent être découplées ainsi :

$$M_x = F_z \times y + C_x \tag{3.1}$$

$$M_y = -F_z \times x + C_y \tag{3.2}$$

$$M_z = -F_x \times y + F_y \times x + C_z \tag{3.3}$$

avec (C_x, C_y, C_z) les couples « purs » appliqués sur la bride supérieure de la plateforme de force.

Dans les conditions normales d'utilisation, on ne peut appliquer de couple Cx ou Cy à la plateforme, donc par hypothèse Cx=Cy=0 (Besser, *et al.*, 1993). Ainsi, à partir des mesures des six composantes du torseur d'actions mécaniques F_x, F_y, F_z, M_x, M_y et M_z, il est possible d'en déduire la position x, y (du centre instantanée de pression à la surface du capteur ainsi que Tz le couple pur imposé par l'utilisateur suivant l'axe Z de la plateforme.

$$y = \frac{M_x}{F_z} \tag{3.4}$$

$$x = -\frac{M_y}{F_z} \tag{3.5}$$

La Figure 74 permet de visualiser l'ensemble des points définissant l'évolution du centre de pression à la surface de la plateforme de forces. Une première étape de validation consiste à utiliser les images issues de la caméra embarquée orientée sur le pied avant et de vérifier qualitativement la position du pied avant sur le capteur (Figure 75).

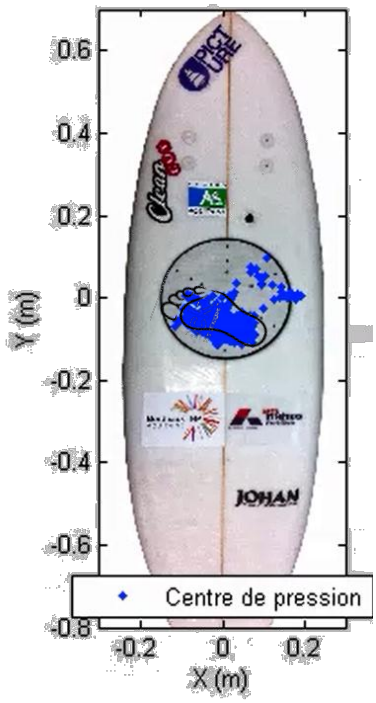


Figure 74 : Positions du centre de pression du pied avant du surfeur



Figure 75 : Position du pied avant sur la planche

Une seconde étape consiste à utiliser la trajectoire du centre de pression au cours du temps. L'objectif est d'observer et de relever les appuis pointes/talons du pied avant du surfeur, observés grâce à la caméra embarquée, et de les comparer avec l'évolution du centre de pression autour de l'axe longitudinal de la planche de surf. Ces deux étapes de validation ont permis d'identifier l'évolution du centre de pression à la surface de la plateforme de forces et de valider l'approximation de calcul de ce point à chaque instant.

1.3 Caractéristiques du rebond de la planche sur la face de la vague

La partie 3.3 du chapitre 2 a permis d'identifier, lors du traitement de la base de données expérimentales, certains temps caractéristiques et plus particulièrement lors de la prise de vitesse. Cette manœuvre consiste à générer de la vitesse sur la vague par une succession d'appuis et d'allègements dynamiques du surfeur. Elle est très caractéristique et prépondérante dans la pratique du surf de par sa capacité à représenter l'interaction entre les mouvements du surfeur et la réaction de la planche sur la vague, appelé le rebond de la planche.

Ainsi afin de valider le traitement des interactions surfeur/planche issues de la base de données expérimentales, une identification et une analyse quantitatives de ces successions d'appuis et d'allégements dynamiques du surfeur a été réalisée (la partie 3.3.2 du Chapitre 2 décrivant et illustrant qualitativement les phases d'appui et d'allégement chez le surfeur).

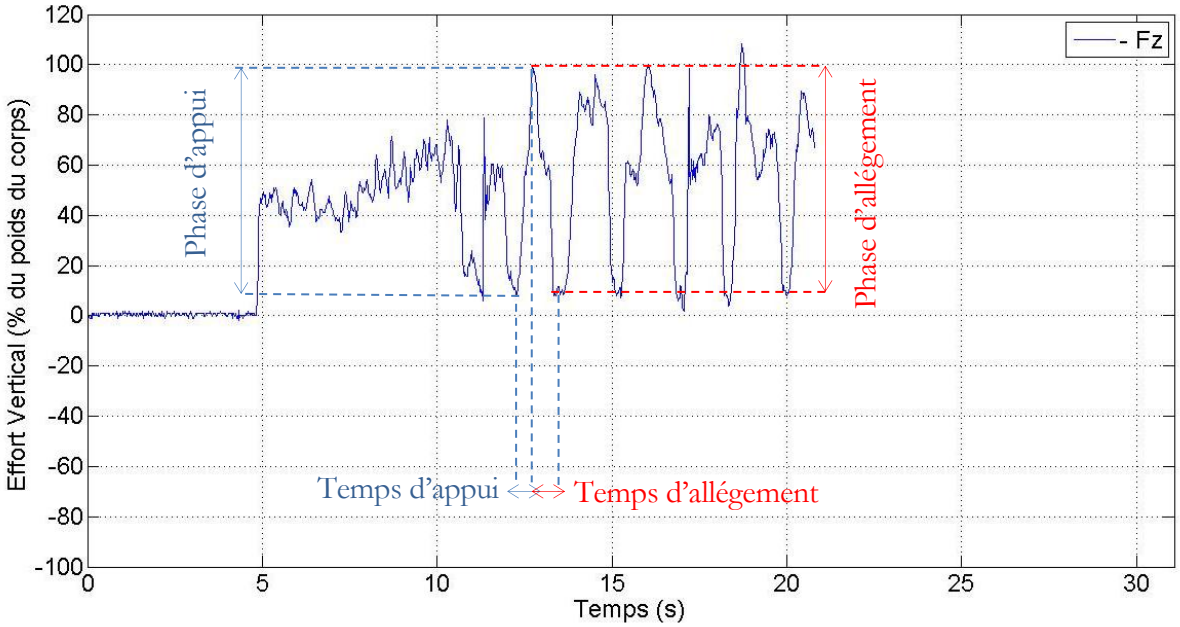


Figure 76 : Identification des phases d'appuis/allégements

La Figure 76 représente l'effort vertical imposé par le surfeur lors d'une prise de vitesse (donnée enregistrée lors de l'évolution sur une vague *in situ* Figure 77). L'effort vertical est donné en pourcentage du poids du corps du surfeur. Nous observons une succession de sept appuis/allègements. La théorie (cf 3.3.2 du Chapitre 2) concernant la prise de vitesse

« optimale » en surf nécessite un basculement intégral du poids du corps sur la jambe avant lors de la phase d'appui et un allégement total du poids sur la jambe avant lors de la phase suivante.

Phase d'appui :

Sur l'exemple de la Figure 76, la phase d'appui décrit un basculement du poids du corps sur la jambe avant proche de 100% donc caractéristique d'une prise de vitesse efficace sur la vague.

Phase d'allègement :

Sur l'exemple de la Figure 76, la phase d'allègement décrit un allègement du poids du corps au niveau de la jambe jusqu'à atteindre en moyenne 10% donc caractéristique d'une prise de vitesse efficace mais pouvant être améliorée. En effet, sur cet exemple, la phase d'allègement du surfeur pourrait être optimisée en basculant durant cette phase 100% du poids de son corps sur la jambe arrière.

Afin de corréler ces informations quantitatives de l'effort vertical avec le comportement dynamique de la planche de surf, deux approches permettent de valider l'interaction des données enregistrées. La première utilise les images vidéo de la caméra on-shore (Figure 77) et la seconde utilise les variations relatives de position de la planche de surf enregistrées lors de ces phases successives d'appuis/allègements.



Figure 77 : Images issues de la caméra on-shore

Les images issues de la caméra on-shore (Figure 77), correspondant à un des sept appuis/allègements de la Figure 76, illustrent les valeurs analysées lors de la phase d'appui et de la phase d'allègement. En effet, les photos A et B de la Figure 77 valident l'analyse quantitative des mesures du capteur de forces placé sous la jambe avant du surfeur. Sur la photo A, le surfeur démarre sa phase d'allègement du point le plus bas de la vague, indiquant que la phase

d'appui précédente a été optimale ; le surfeur utilise bien toute la hauteur de la vague durant sa phase d'appui. Sur la photo B, le surfeur termine sa phase d'allègement avant d'avoir exploité totalement la hauteur de la vague : caractéristique d'une phase d'allègement incomplète de la part du surfeur.

Notre seconde approche consiste alors à illustrer et valider plus particulièrement les interactions entre les variations relatives (dX ;dZ) et l'effort vertical Fz.

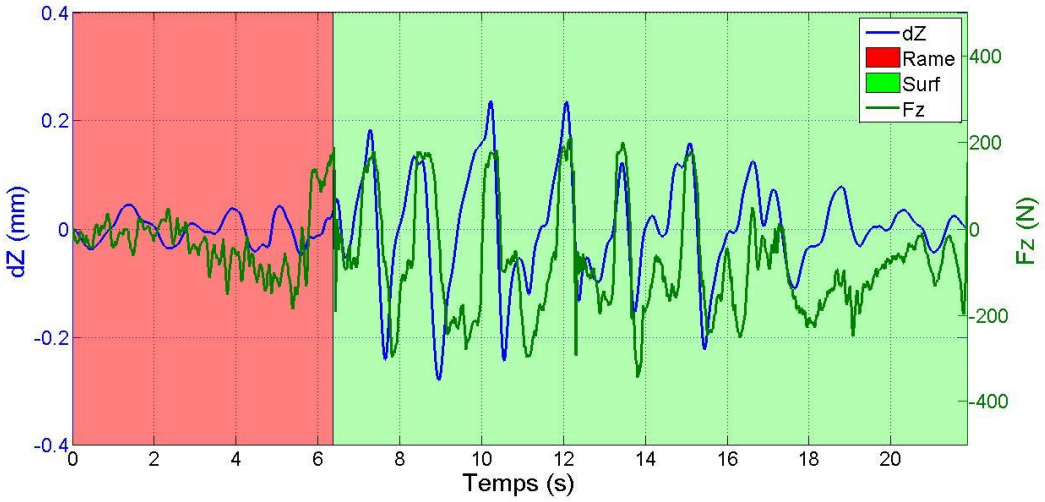


Figure 78 : Interactions entre dZ et Fz

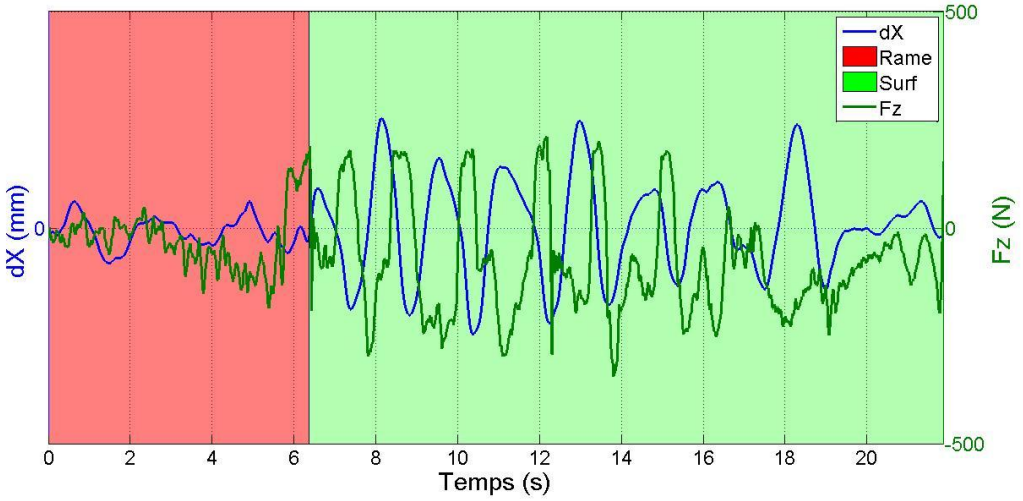


Figure 79 : Interactions entre dX et Fz

Les interactions représentées par la Figure 78 et la Figure 79 illustrent respectivement :

- l'interaction directe entre l'appui du surfeur sur sa jambe avant et l'orientation verticale de la planche sur la vague

- l'interaction directe entre le basculement du poids du surfeur sur sa jambe avant (décroissance de Fz) et l'accélération longitudinale de la planche de surf (croissance de dX).

2 Identification d'un modèle mathématiques expérimental

2.1 Introduction

La base de données expérimentale est constituée principalement de douze données synchronisées enregistrées *in situ* sur chaque vague. Les six composantes (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur la planche représentent le comportement des appuis du surfeur. Les trois accélérations longitudinales (a_x, a_y, a_z) et les trois vitesses angulaires (Ω_x, Ω_y, Ω_z) définissent le comportement dynamique de la planche de surf.

Nous définissons alors un modèle d'interactions surfeur/planche, noté W(s), prenant en entrée les actions mécaniques du surfeur sur la planche et en sortie le comportement dynamique de la planche de surf. L'objectif est d'identifier ce modèle global d'interactions afin de caractériser, pour chaque sortie du modèle, les relations avec les entrées dominantes caractéristiques.

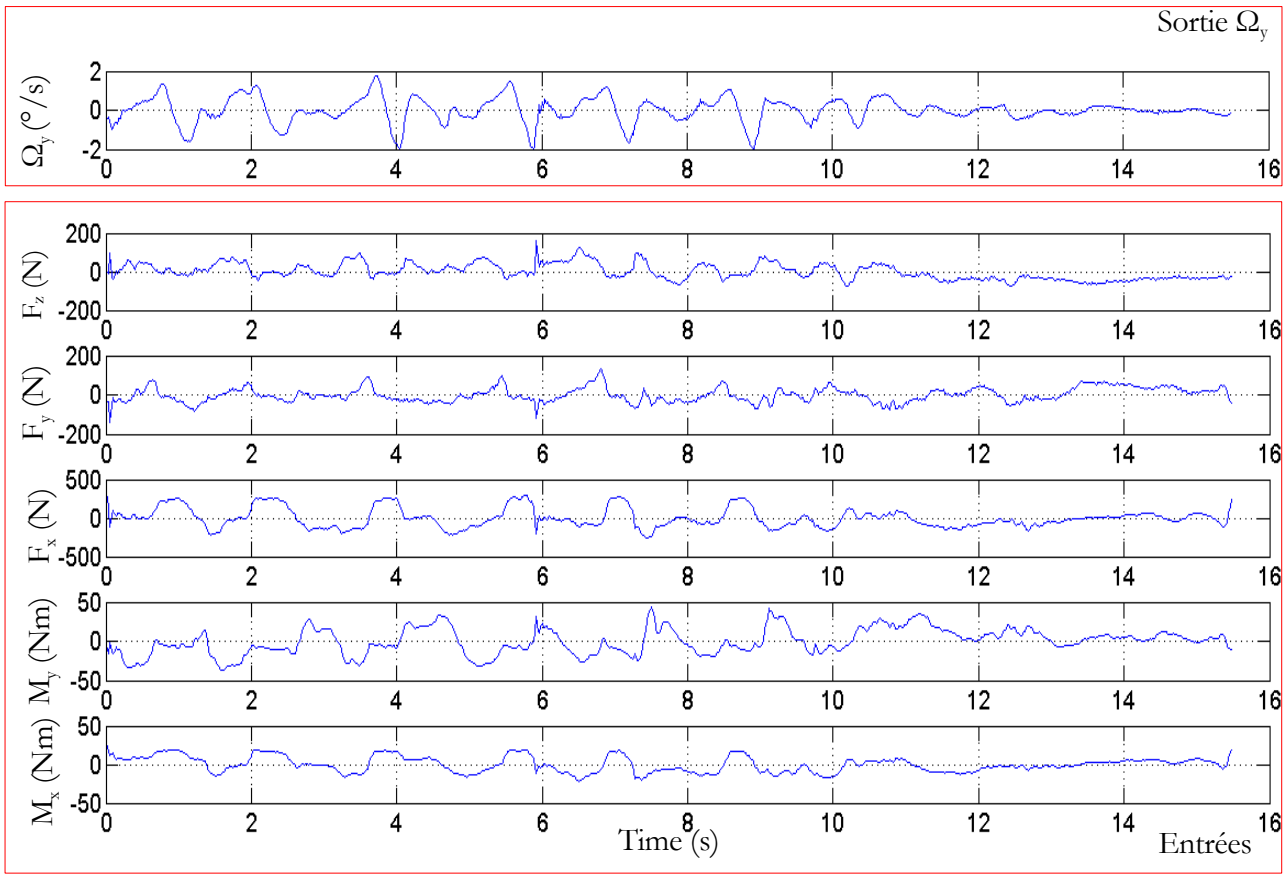


Figure 80 : Exemple de données brutes enregistrées sur une vague pour identifier la sortie Ω_y en fonction des entrées (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y)

La Figure 80 illustre un exemple de données brutes issues de la base de données utilisées pour identifier une sortie, dans cet exemple la vitesse de rotation Ω_y, en fonction des entrées dominantes définissant les appuis du surfeur (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y). Dans cet exemple le moment M_z n'est pas considéré comme une entrée dominante du fait de sa valeur négligeable et non significative par rapport aux autres composantes (cf Figure 83) du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur la planche.

Six modèles polynomiaux Output-Error d'ordre 3 ont été identifiés, chacun correspondant à une des six sorties (a_x, a_y, a_z, Ω_x, Ω_y, Ω_z) du modèle global d'interactions $W(s)$. La structure générale d'un modèle Output-Error est :

$$y(t) = \frac{A(q)}{B(q)} u(t-nk) + e(t) \tag{3.6}$$

avec $y(t)$ la sortie du modèle, $u(t)$ l'entrée du modèle, $e(t)$ l'erreur et A et B deux polynômes exprimés en fonction de l'opérateur q.

Le modèle global identifié $W(s)$correspond donc à un système MIMO (Multiple Input Multiple Output) à six entrées et six sorties (cf Figure 81).

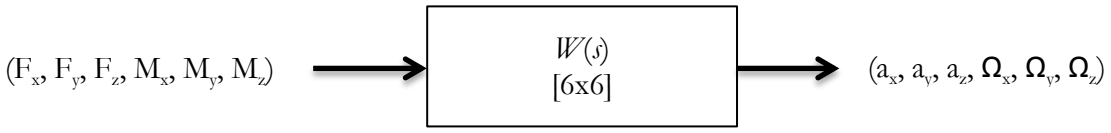


Figure 81 : Schéma d'identification du modèle global d'interactions surfeur/planche $W(s)$

2.2 Vague de référence

Les données expérimentales correspondant à l'évolution d'un surfeur sur une vague que nous appellerons « vague de référence » seront utilisées pour l'identification du modèle global d'interactions. Cette vague de référence a été déterminée pour sa durée, soit 21,84 secondes dont 15,48 secondes de surf ainsi que pour les mouvements du surfeur et de la planche qui utilisent toute la hauteur de la vague pour se déplacer. Les Figure 82 et Figure 83 représentent respectivement les composantes d'efforts et de moments brutes enregistrées lors des phases de rame et de surf de la vague de référence. Les Figure 84 et Figure 85 correspondent aux composantes brutes d'accélérations longitudinales et de vitesses angulaires de la planche de surf représentant le comportement dynamique de celle-ci. D'autres jeux de données expérimentales seront par la suite utilisés pour la phase de validation et d'ajustement du modèle global $W(s)$.

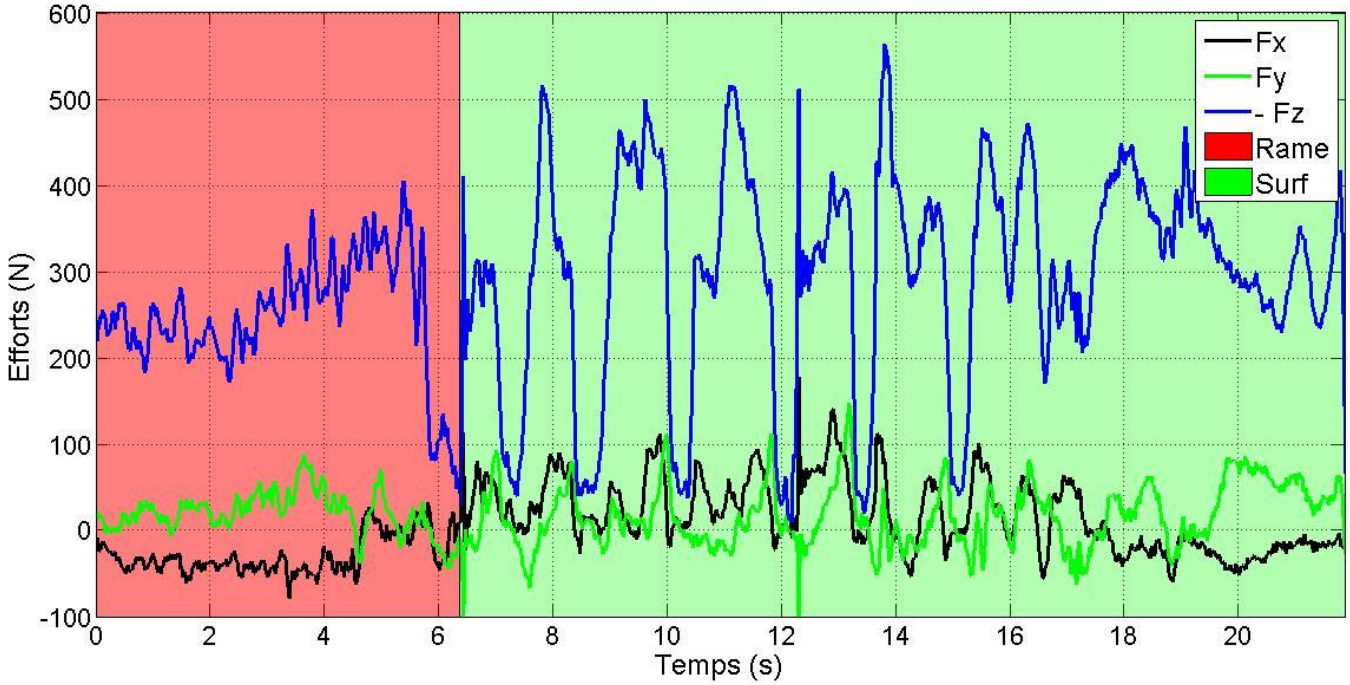


Figure 82 : Efforts bruts enregistrés sur une vague de référence

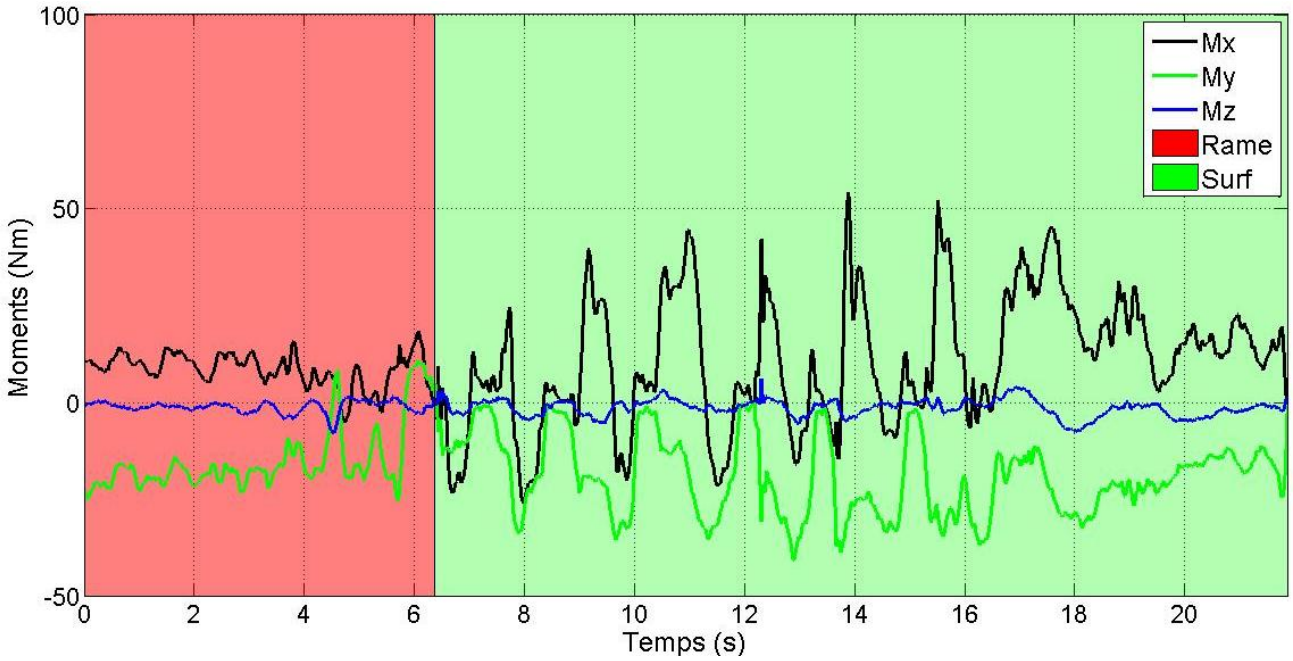


Figure 83 : Moments bruts enregistrés sur une vague de référence

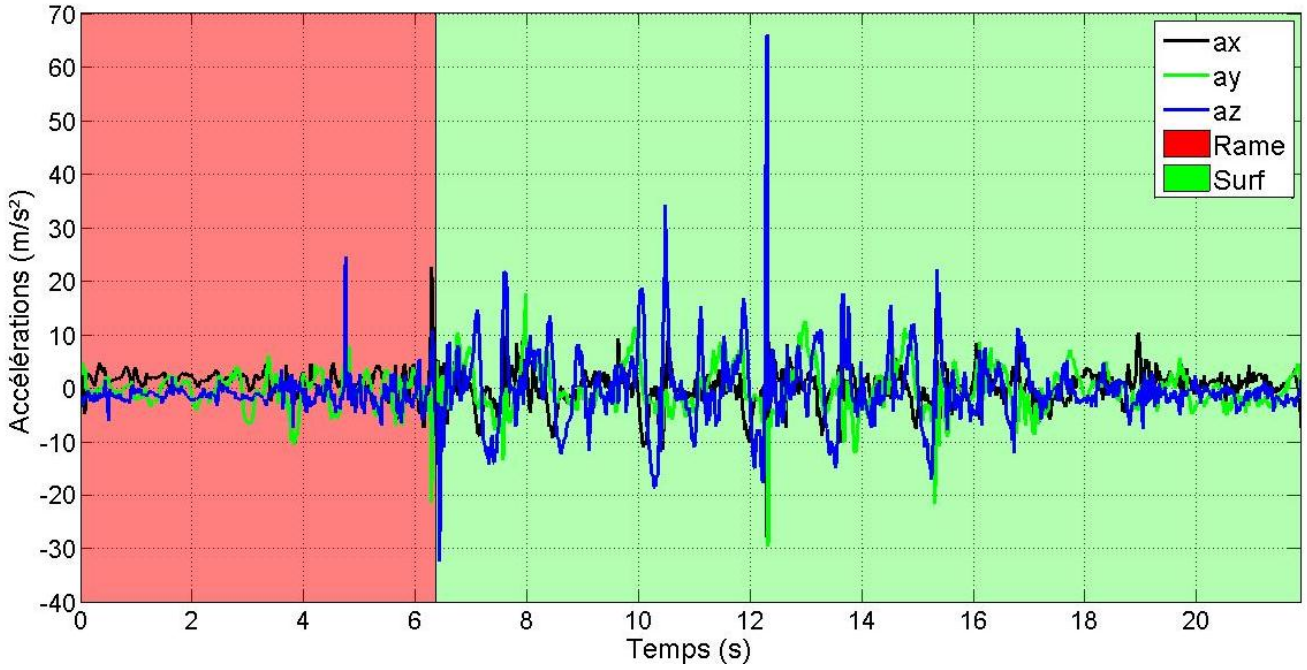


Figure 84 : Accélérations brutes enregistrées sur une vague de référence

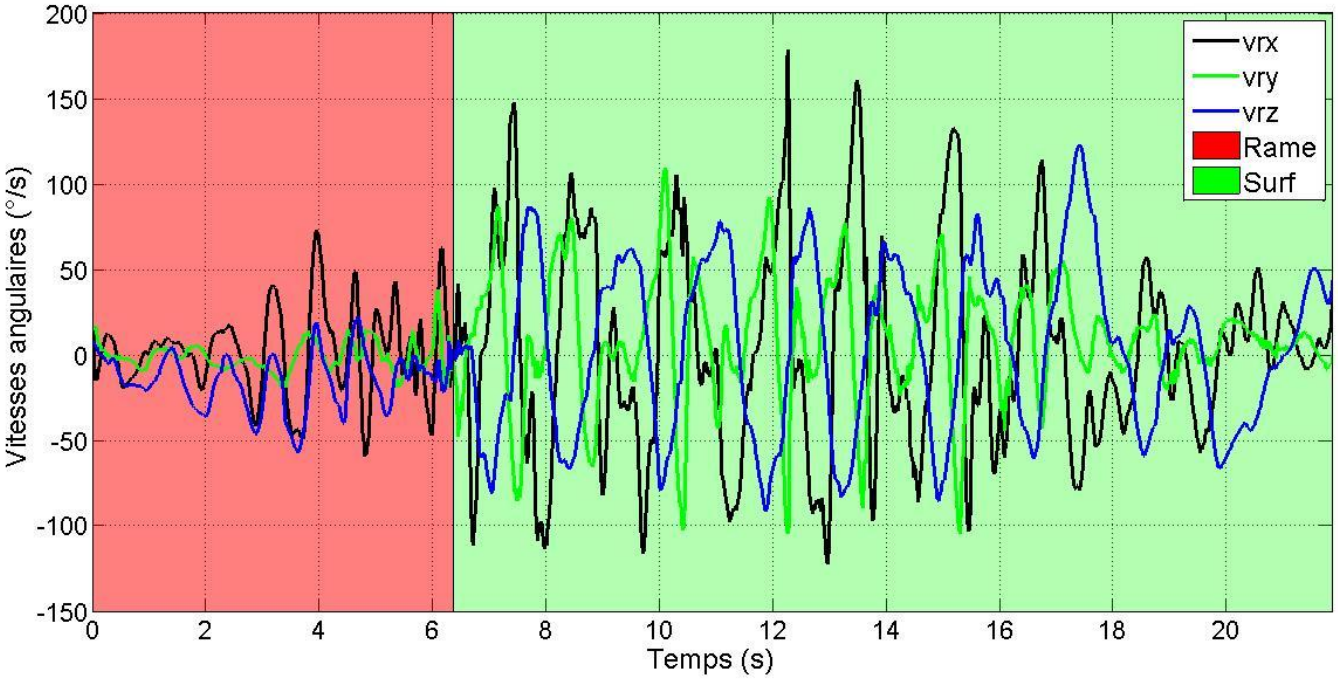


Figure 85 : Vitesses angulaires brutes enregistrées sur une vague de référence

2.3 Résultats

Pour chacune des six composantes (a_x, a_y, a_z, Ω_x, Ω_y, Ω_z) du vecteur définissant le comportement dynamique de la planche de surf, six modèles polynomiaux du système global $W(s)$, dimension [6x6], ont été identifiés par optimisation numérique en considérant les données expérimentales de la vague de référence. En ce qui concerne les résultats présentés ici, la phase de « Rame » du surfeur sur la vague n'a pas été évaluée. Seule la base de données expérimentale de la phase « Surf » est utilisée pour l'identification du modèle d'interactions entre le surfeur et la planche.

La méthodologie utilisée se découpe en deux étapes. La première a consisté à observer la contribution de chaque composante du vecteur d'entrées (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) du modèle à identifier pour établir les entrées dominantes. La seconde étape consiste à effectuer une identification numérique pour déterminer les coefficients de chaque modèle polynomial. Ces modèles polynomiaux sont ensuite transformés et décomposés en fonction de transfert afin de constituer le modèle global $W(s)$ dont la forme obtenue est présentée Equation (3.1). Pour chaque sortie du modèle $W(s)$, les entrées dominantes correspondent aux éléments non nuls dans la matrice [6x6]. Les 0 définissent donc les entrées négligées pour chaque sortie correspondantes.

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ \Omega_x \\ \Omega_y \\ \Omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_{ax}(1) & W_{ax}(2) & W_{ax}(3) & 0 & 0 & W_{ax}(4) \\ W_{ay}(1) & W_{ay}(2) & W_{ay}(3) & W_{ay}(4) & W_{ay}(5) & 0 \\ W_{az}(1) & W_{az}(2) & W_{az}(3) & W_{az}(4) & W_{az}(5) & 0 \\ W_{\Omega x}(1) & W_{\Omega x}(2) & W_{\Omega x}(3) & W_{\Omega x}(4) & W_{\Omega x}(5) & 0 \\ W_{\Omega y}(1) & W_{\Omega y}(2) & W_{\Omega y}(3) & W_{\Omega y}(4) & W_{\Omega y}(5) & 0 \\ W_{\Omega z}(1) & W_{\Omega z}(2) & W_{\Omega z}(3) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Afin de présenter les résultats obtenus, les données expérimentales de la vague de référence (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) correspondant aux composantes du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur la planche ont été appliquées en entrée de chaque modèle. Les sorties (a_x, a_y, a_z, Ω_x, Ω_y, Ω_z), obtenues avec les modèles identifiés, ont été comparées avec les composantes (a_x, a_y, a_z, Ω_x, Ω_y, Ω_z) expérimentales issues de la base de données et définissant le comportement dynamique de la planche. Les figures 87 et 88 présentent l'ensemble des résultats obtenus.

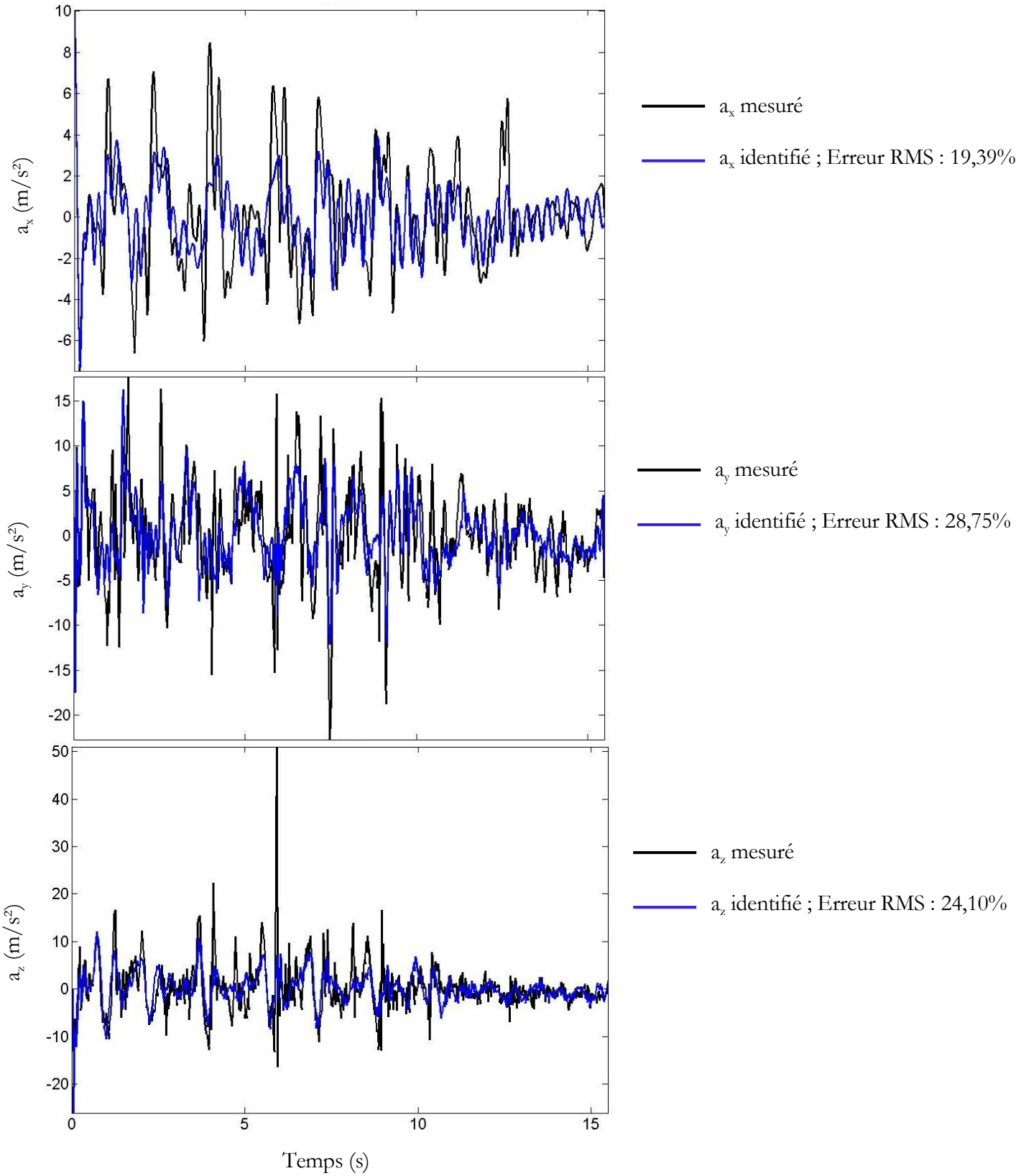


Figure 86 : Identification des modèles (W_{ax}, W_{ay}, W_{az})

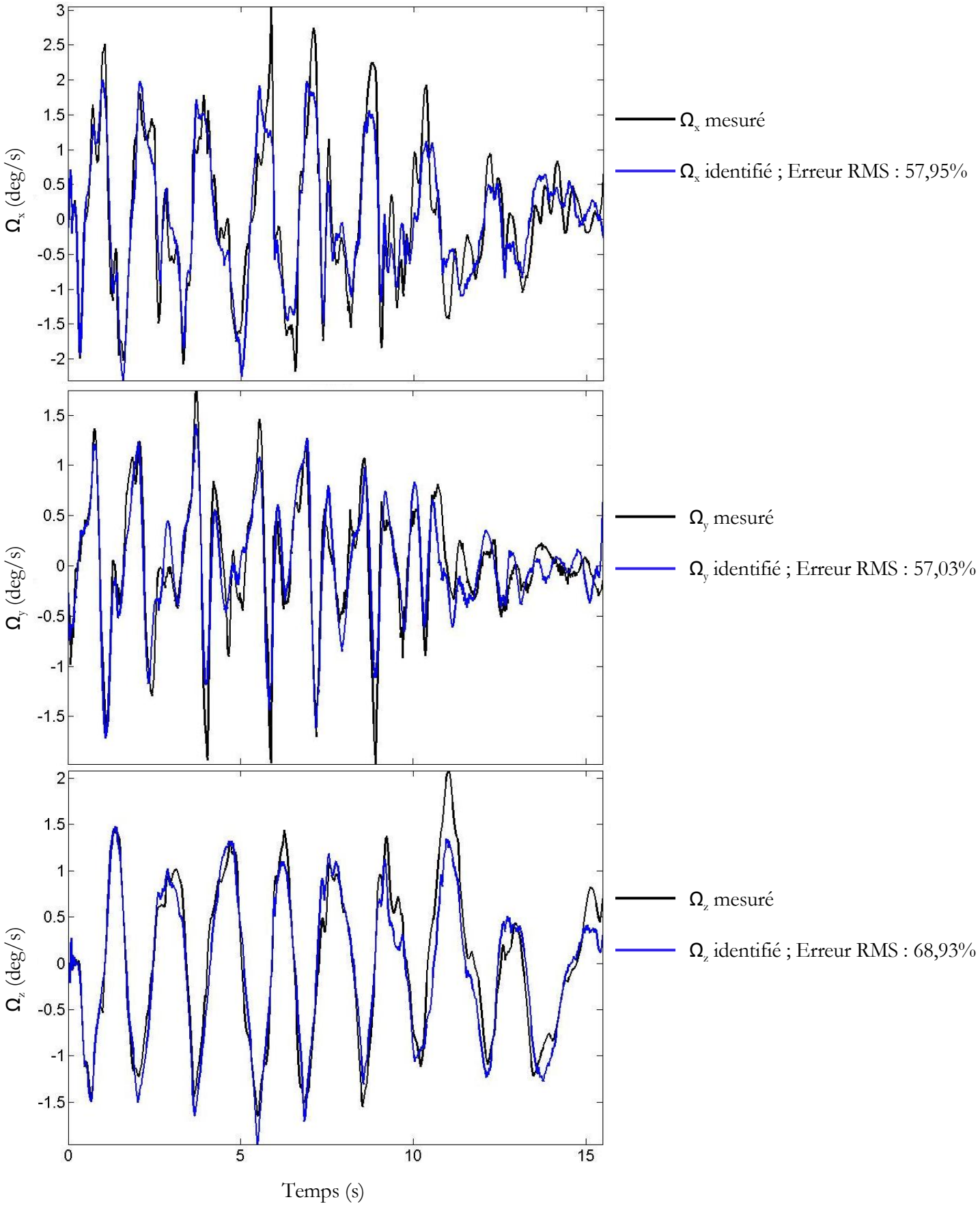


Figure 87 : Identification des modèles ($W_{\Omega x}$, $W_{\Omega y}$, $W_{\Omega z}$)

2.4 Validation du modèle global

Considérant les six sous-modèles constituant le modèle global d'interactions $W(s)$ et identifiés à partir des données expérimentales d'interactions surfeur/planche sur une vague de référence, trois méthodes de validation ont été utilisées :

- Analyse résiduelle
- Utilisation d'autres « jeux de données » expérimentaux (même campagne expérimentale et donc même environnement) définissant les interactions surfeur/planche de la phase « Surf » sur différentes vagues
- Interprétation graphique des diagrammes de Bode de chaque fonction de transfert du modèle global $W(s)$

Analyse résiduelle

Les résidus sont les différences à chaque pas de temps entre la sortie prédite à partir du modèle et la sortie mesurée issue du jeu de données expérimentales. Les résidus correspondent donc à la partie des données expérimentales qui ne sont pas comprises et prises en compte dans le modèle Il s'agit donc alors de quantifier cette différence. L'analyse résiduelle consiste à effectuer deux tests : un test de blancheur et un test de non-corrélation. De manière générale, afin de valider un modèle, il est nécessaire que les deux tests cités ci-dessus soient concluants. Cependant, dans le cas d'un modèle OE (Output-Error), il est nécessaire de s'assurer de la non-corrélation entre l'erreur e et chaque entrée u ; le test de blancheur de l'erreur n'étant pas nécessaire dans ce cas (Zhu, 2001). En effet, le modèle a été identifié en se focalisant sur la dynamique du modèle et non pas sur les perturbations.

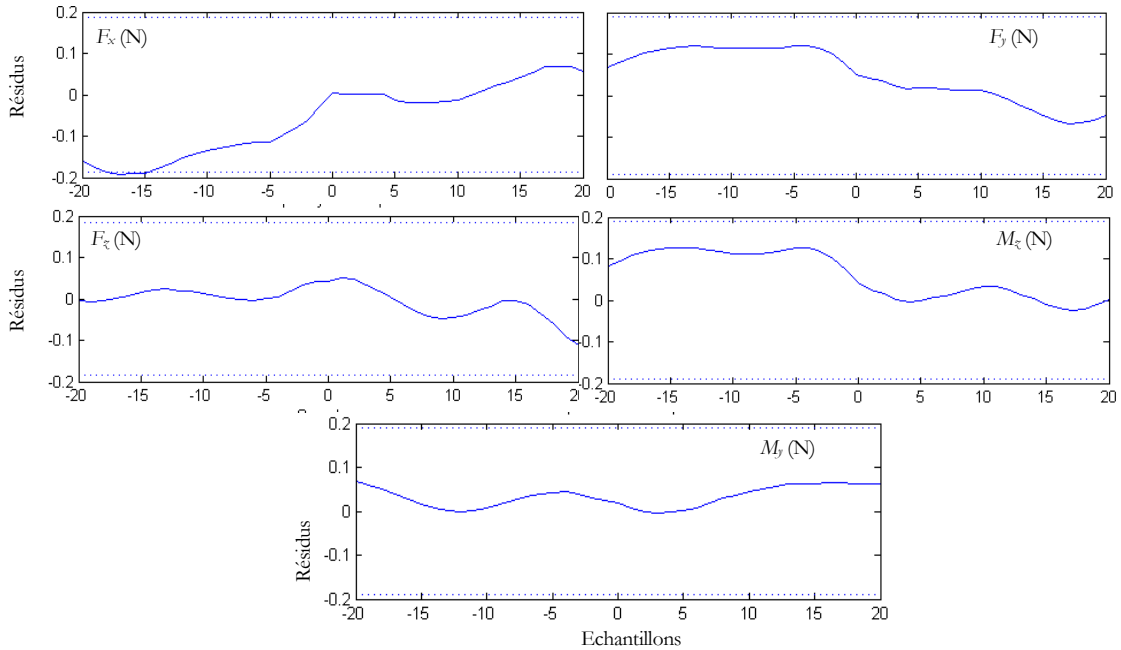


Figure 88 : Corrélation croisée l'entrée et les résidus pour chaque paire d'entrée/sortie

La Figure 88 illustre un exemple d'analyse de corrélation croisée entre les résidus et chaque entrée dominante pour l'identification de la sortie Ω_y. Pour valider un modèle, ce dernier doit avoir les résidus indépendants des entrées précédentes (passées). Si ce n'est pas le cas, le modèle ne décrit pas pleinement comment la sortie est fonction de l'entrée correspondante. Pour cela, un intervalle de confiance définit les valeurs de résidus avec une probabilité d'être statistiquement insignifiant pour le système ; dans cet exemple l'intervalle de confiance est [-0,2 ;0,2]. Ce modèle peut ainsi être validé ; les valeurs résiduelles étant comprises dans l'intervalle de confiance, les résidus sont indépendants de chaque entrée considérée.

Application d'autres « jeux de données » expérimentaux

La méthodologie employée lors de cette phase de validation consiste à utiliser les composantes d'un vecteur (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) de données expérimentales d'interactions du surfeur sur la planche issues de mesures effectuées sur plusieurs vagues quelconques. Ces données ont cependant été enregistrées lors de la même campagne expérimentale (mêmes conditions, même environnement et même surfeur). L'objectif est alors de comparer les sorties (a_x, a_y, a_z, Ω_x, Ω_y, Ω_z) modélisées avec les composantes expérimentales (a_x, a_y, a_z, Ω_x, Ω_y, Ω_z) mesurées *in situ* correspondants. Comme l'environnement et les perturbations sont équivalents durant la phase expérimentale considérée, si la sortie prédite du modèle, considérant les entrées expérimentales, correspond de manière qualitative à la sortie expérimentale, le modèle est validé.

La Figure 89 illustre un exemple pour un jeu d'interactions d'entrées/sorties correspondant à une vague quelconque d'une durée de 4,96 secondes. La sortie Ω_y, prédite grâce au modèle identifié avec une vague de référence, correspond qualitativement à la composante Ω_y mesurée *in situ*.

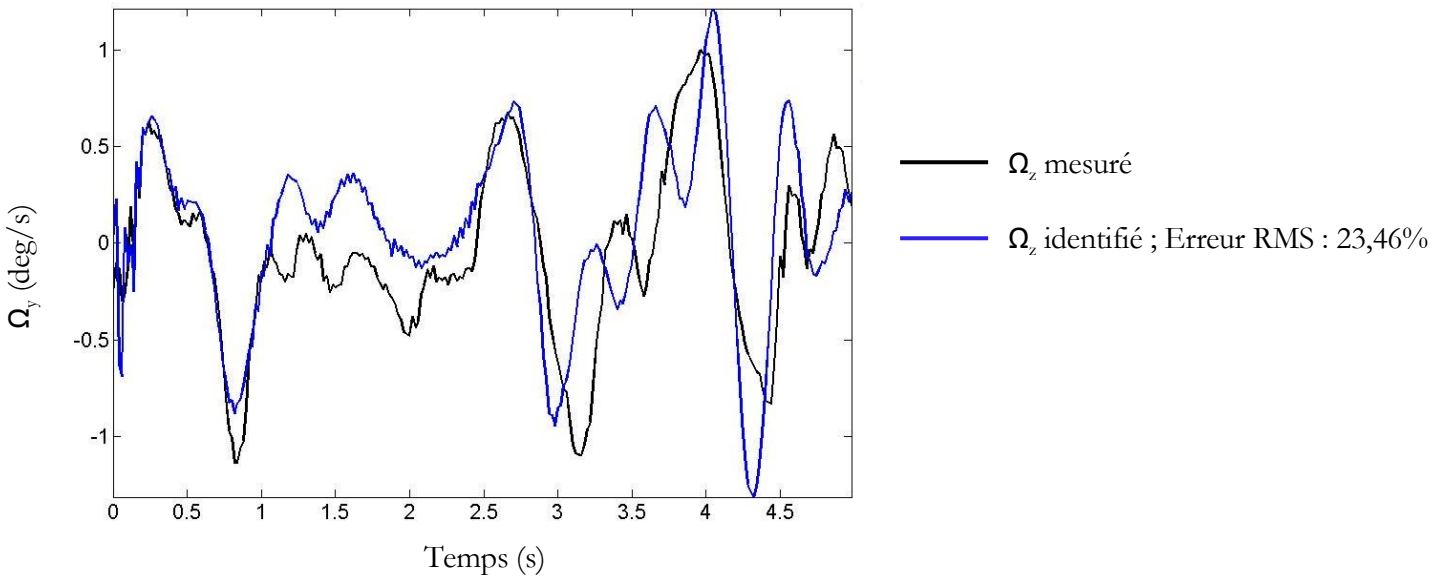


Figure 89 : Exemple du sous-modèle Ω_y identifié pour une vague de référence et appliqué à une vague quelconque

Toutes les réponses du système global $W(s)$ identifié sont simulées et comparées en utilisant les données expérimentales d'entrées/sorties de six vagues différentes issues de la même campagne expérimentale.

Interprétation graphique des diagrammes de Bode

L'interprétation graphique des diagrammes de Bode de chaque fonction de transfert du modèle global identifié $W(s)$ consiste à valider le sens physique du comportement d'interactions entre chaque entrée/sortie. Cette méthodologie est appliquée pour chacune des six sorties du système.

La Figure 90 correspond au diagramme de Bode du sous-modèle identifié pour la sortie Ω_y. L'analyse de la phase entre l'entrée F_z et Ω_y permet par exemple de vérifier une partie du sens physique du modèle. En effet, une phase de 180° impose un signe opposé entre F_z et Ω_y : lorsque le surfeur transfère le poids de son corps sur sa jambe avant, F_z diminue et la planche de surf s'incline vers le bas de la vague donc Ω_y augmente. Le comportement dynamique de la planche est respecté dans cet exemple. Cette méthodologie est utilisée pour chaque sortie de modèle et chaque entrée dominante.

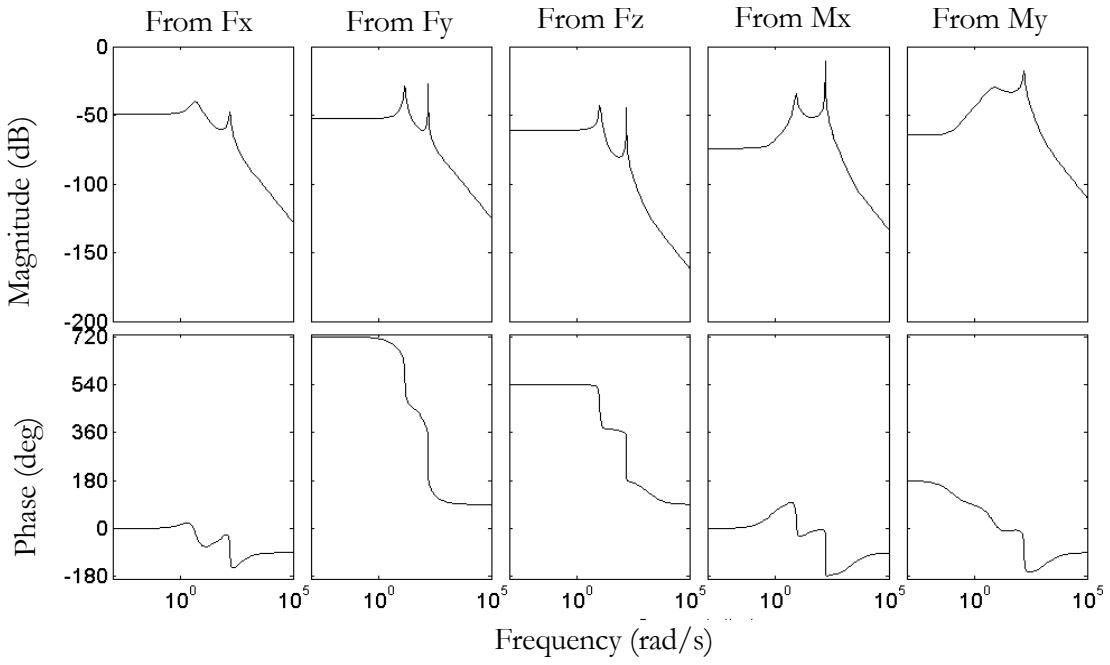


Figure 90 : Diagramme du Bode du sous-modèle identifié pour la sortie Ω_y

3 Suivi de trajectoires : implantation de la base de données expérimentales dans l'hexapode

3.1 Introduction

Les mesures *in situ* des accélérations longitudinales et vitesses angulaires de la planche de surf qui constituent une partie de la base de données expérimentales sont intégrées à l'hexapode. En effet, l'objectif est de rejouer les trajectoires de la planche de surf, par l'intermédiaire de l'hexapode, en environnement contrôlé. Le surfeur ayant ainsi participé à l'acquisition des données réelles participe à la validation des mouvements recréés en laboratoire. La Figure 91 représente l'architecture de mode de pilotage « Suivi de trajectoires ». La commande de l'hexapode correspond à un fichier de trajectoires définissant les translations et rotations du plateau mobile à chaque instant (à une fréquence d'échantillonnage de 100 Hz). L'objectif est donc d'avoir le surfeur et sa planche positionnés sur le plateau mobile. La planche utilisée est identique à celle utilisée lors de la campagne expérimentale. Le capteur de forces est ainsi également placé à l'intérieur de la planche de surf. Aussi lors de la génération de trajectoires par l'hexapode, la méthodologie employée consiste à enregistrer à la fois la trajectoire de la planche de surf (donc de l'hexapode) et les interactions mécaniques entre le surfeur et la planche par l'intermédiaire du capteur six axes intégré.

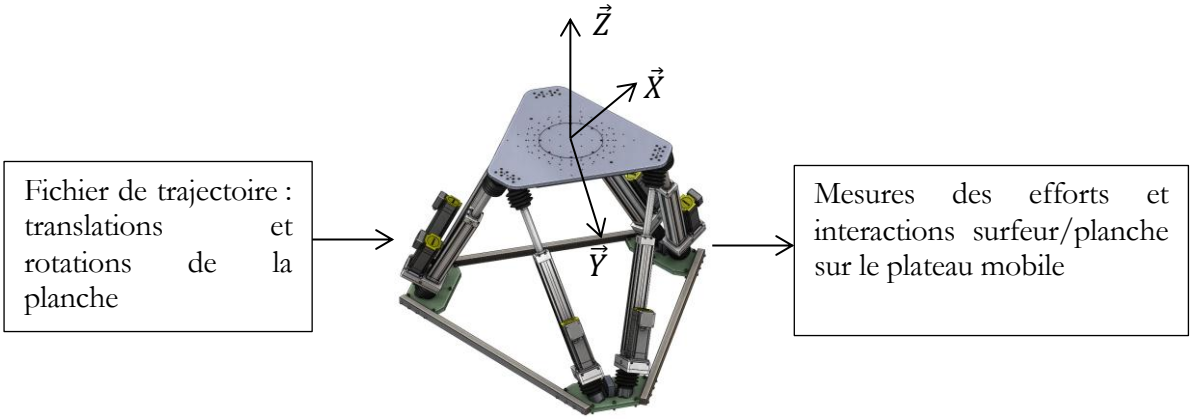


Figure 91 : Mode suivi de trajectoires

Dans un premier temps, la reproduction et le suivi de trajectoires nécessitent de considérer les limites de l'architecture mécanique de l'hexapode afin d'adapter les trajectoires expérimentales aux capacités du simulateur. Dans un second temps, il est nécessaire de mettre en place l'environnement du simulateur afin de permettre à un utilisateur de se positionner sur l'hexapode. Enfin, l'intégration des trajectoires expérimentales et la confrontation des mesures trajectoires et interactions surfeur/planche sont utilisées afin de valider la reproduction en laboratoire des données enregistrées *in situ*.

3.2 Limites de l'architecture mécanique de l'hexapode

Le Tableau 2 (cf. Chapitre 1) définit les caractéristiques limites de l'hexapode à la fois en termes d'espace de travail, défini par la course des vérins, et également en termes de vitesses et d'accélérations.

Afin d'illustrer les limites de l'architecture mécanique de l'hexapode dans le cadre de l'approche du projet SIMUSURF, la vague de référence (cf 2.2 du Chapitre 3) est utilisée et plus particulièrement les données de translations (variations relatives de position) et de rotations de la planche de surf.

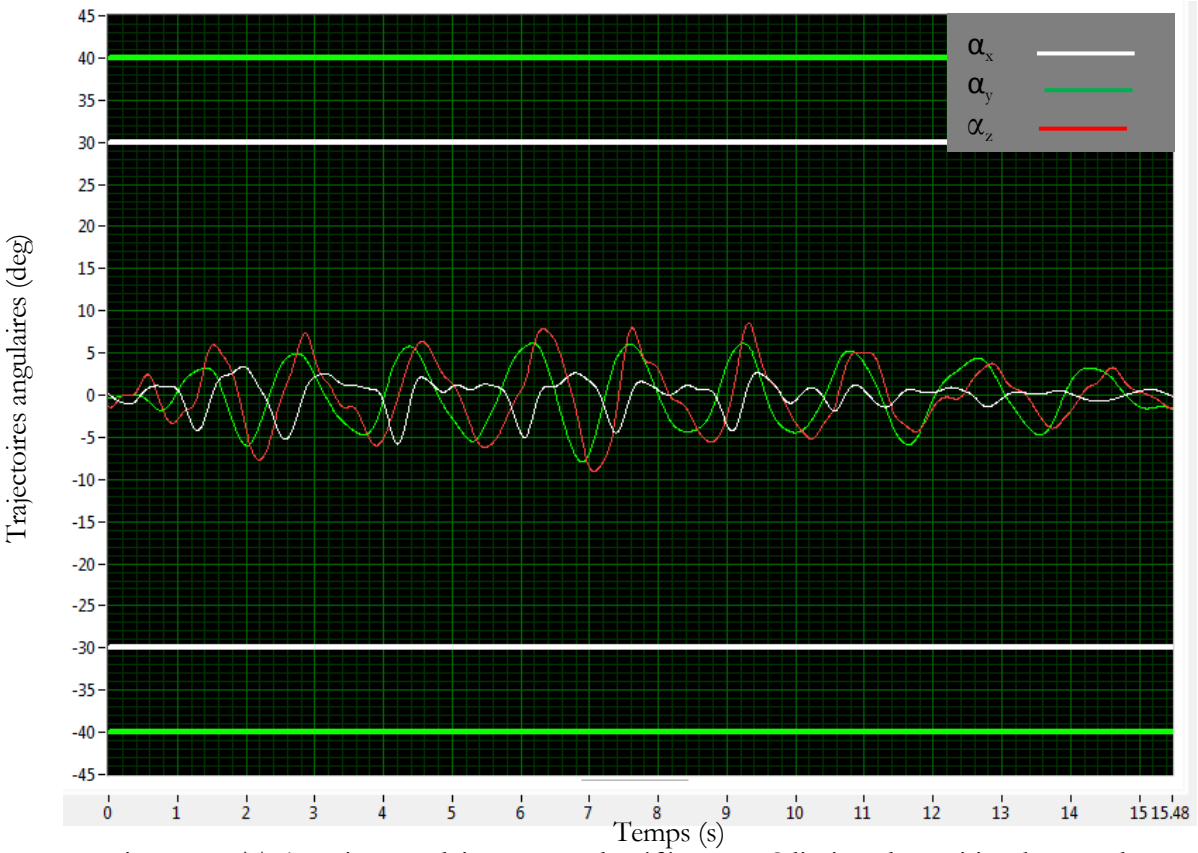


Figure 92 : Trajectoire angulaire : vague de référence VS limites de position hexapode

La Figure 92 représente les rotations relatives de la planche de surf (α_x, α_y, α_z)) lors de son évolution sur la vague de référence (partie surf uniquement). Les limites en termes de mouvement angulaire de l'architecture mécanique de l'hexapode sont tracées sur la figure en droites vertes et blanches respectivement pour l'axe $\vec{Z}$ et pour les axes $\vec{X}$ et $\vec{Y}$. Ces limites, dépendantes uniquement de la course des vérins, indiquent que la trajectoire angulaire de la planche mesurée *in situ* sur la vague de référence est comprise dans l'espace de travail de l'hexapode. Cependant, l'espace de travail n'est pas suffisant pour déterminer si la trajectoire peut être reproduite. En effet, la Figure 93 représente la vague de référence mais en considérant non plus la position angulaire mais les accélérations angulaires de la planche. Les accélérations et décélérations angulaires à reproduire par l'intermédiaire de l'hexapode sont alors au-delà des limites mécaniques de l'hexapode.

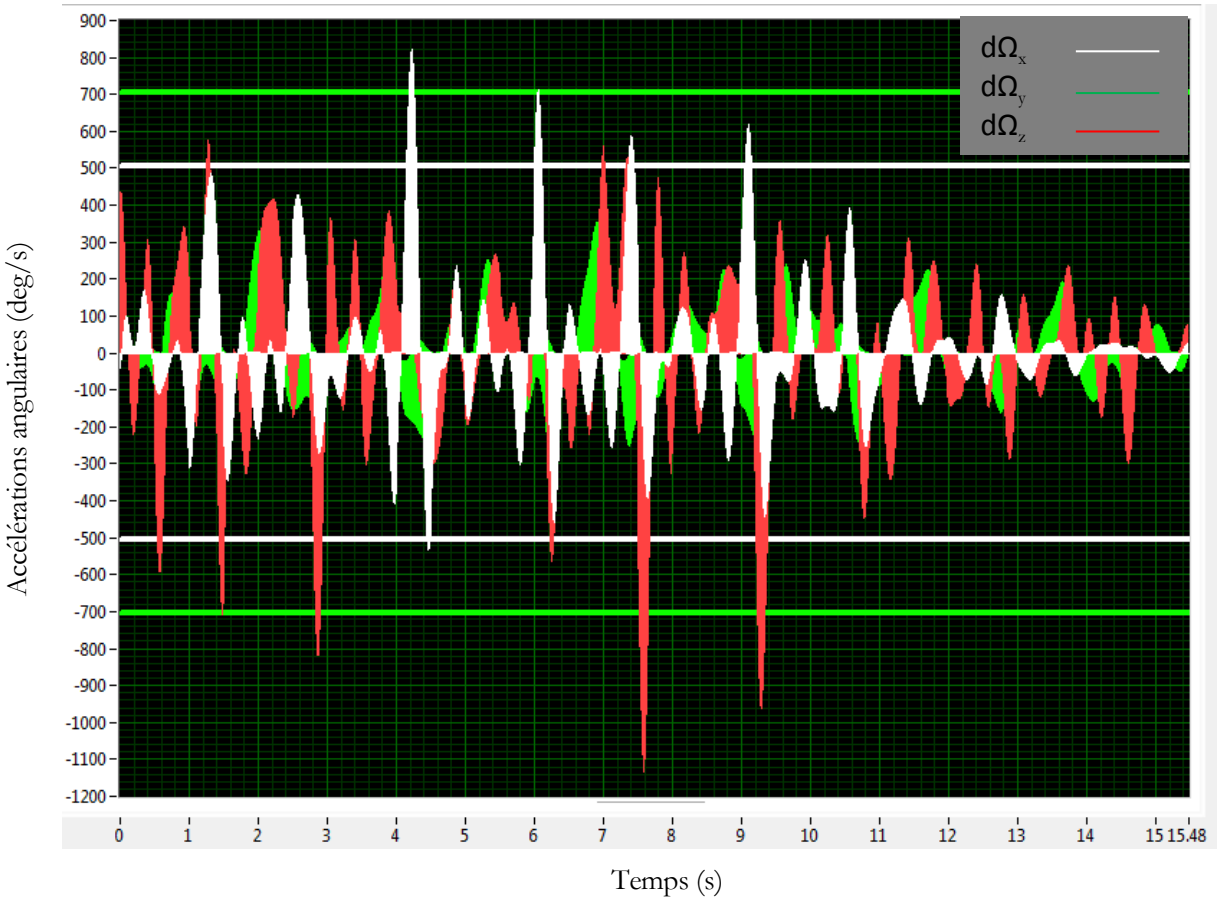


Figure 93 : Accélérations angulaires : vague de référence VS limites de l'hexapode

La trajectoire angulaire expérimentale de la vague de référence (définie par le vecteur $\vec{\alpha}(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$) est donc ajustée afin de conserver la dynamique de la rotation de la planche de surf tout en restant dans les limites des caractéristiques angulaires de l'hexapode. Ainsi, un facteur correctif est appliqué à au vecteur $\vec{\alpha}(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z)$. Le même facteur (= 6,3) est appliqué pour chaque composante afin de garder le couplage entre les mouvements sur chacun des trois axes.

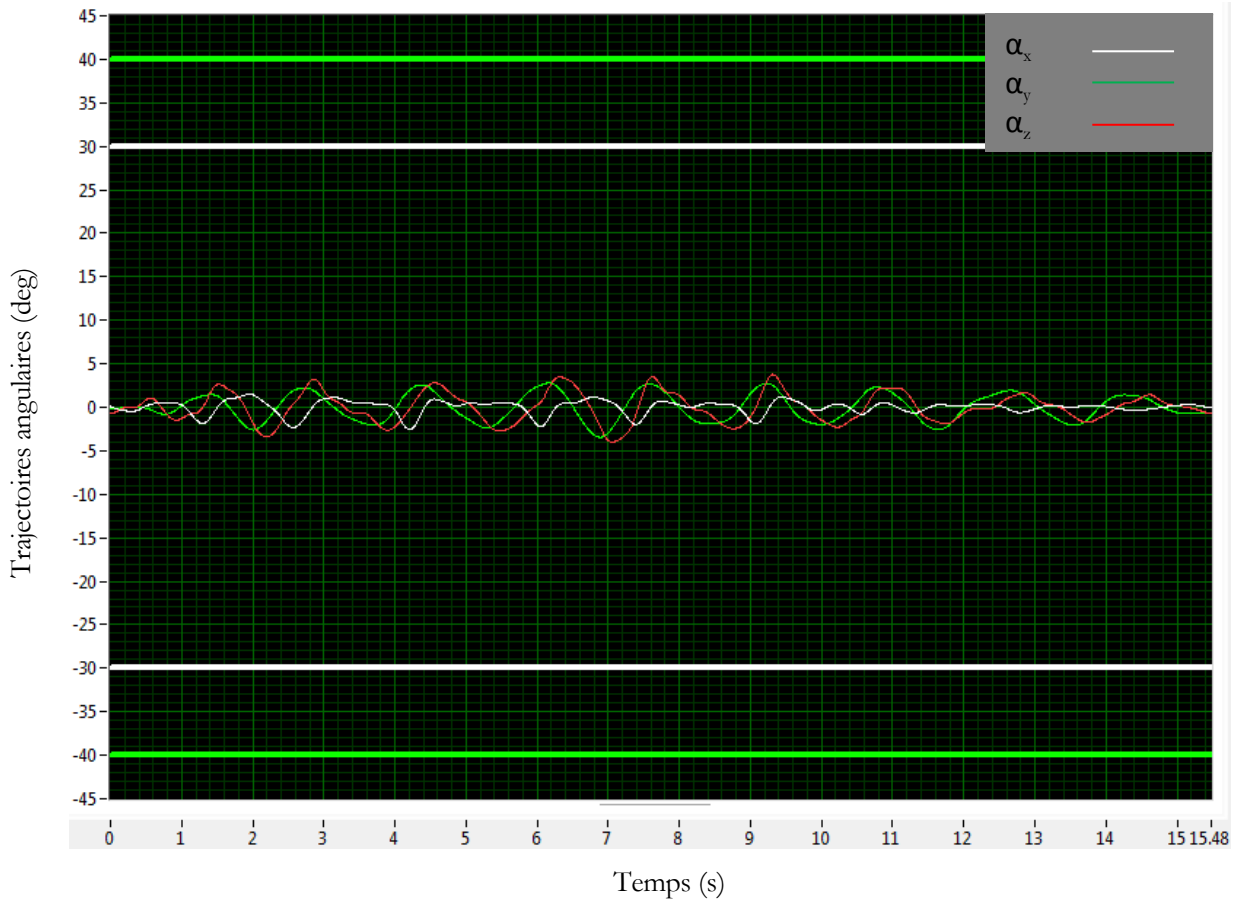


Figure 94 : Trajectoire angulaire : vague de référence post-traitée VS limites de position hexapode

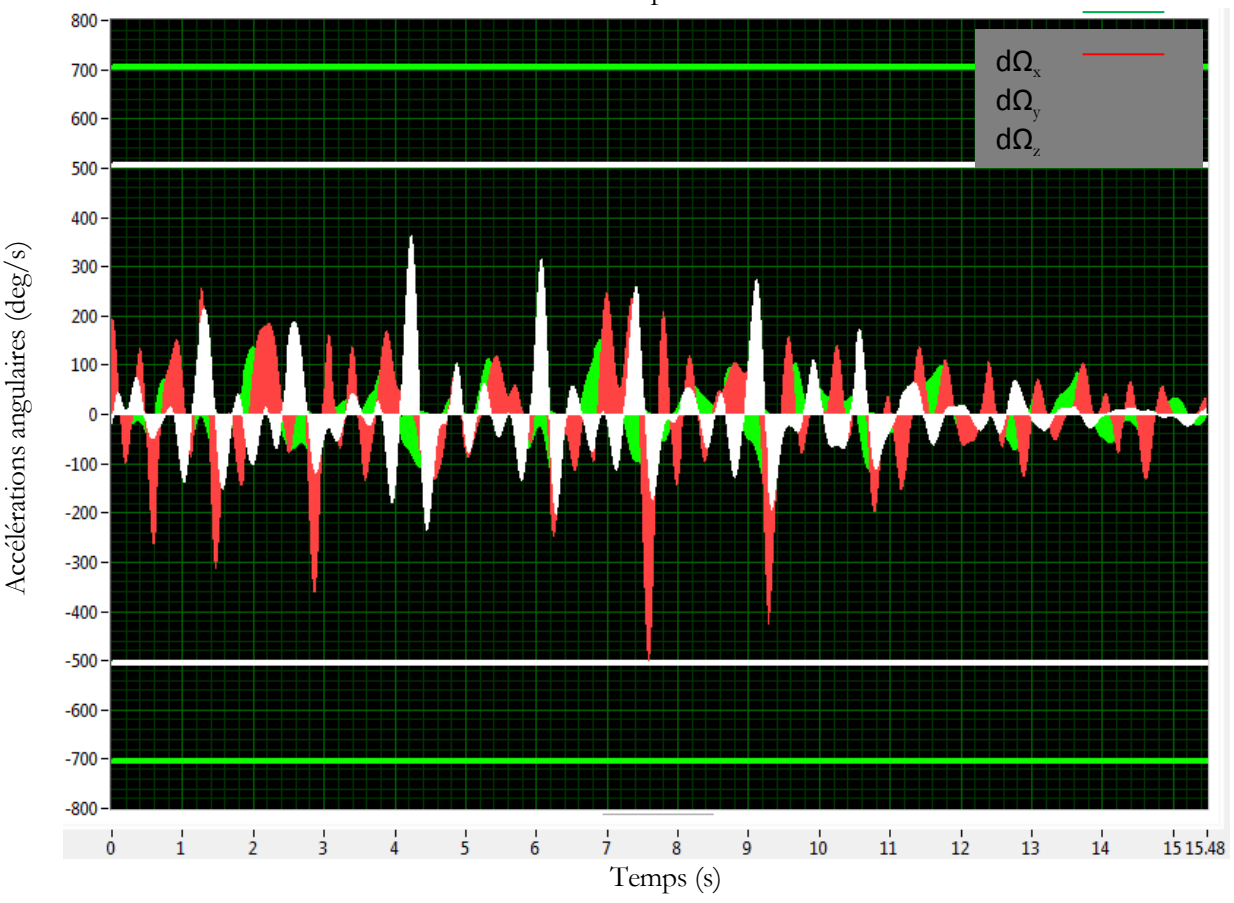


Figure 95 : Accélérations angulaires post-traitées : vague de référence VS limites de l'hexapode

De même, les données de variations de positions linéaires relatives expérimentales sont analysées afin de les intégrer dans le simulateur. Une première analyse de la trajectoire permet d'identifier que les amplitudes de ces variations linéaires ne sont pas compatibles avec l'espace de travail de l'hexapode (cf Figure 96). Ainsi, un facteur correctif (=3.5) est également appliqué au vecteur $\vec{u}$(dX, dY, dZ) afin de permettre l'intégration des données expérimentales de positions linéaires de la planche de surf dans le simulateur.

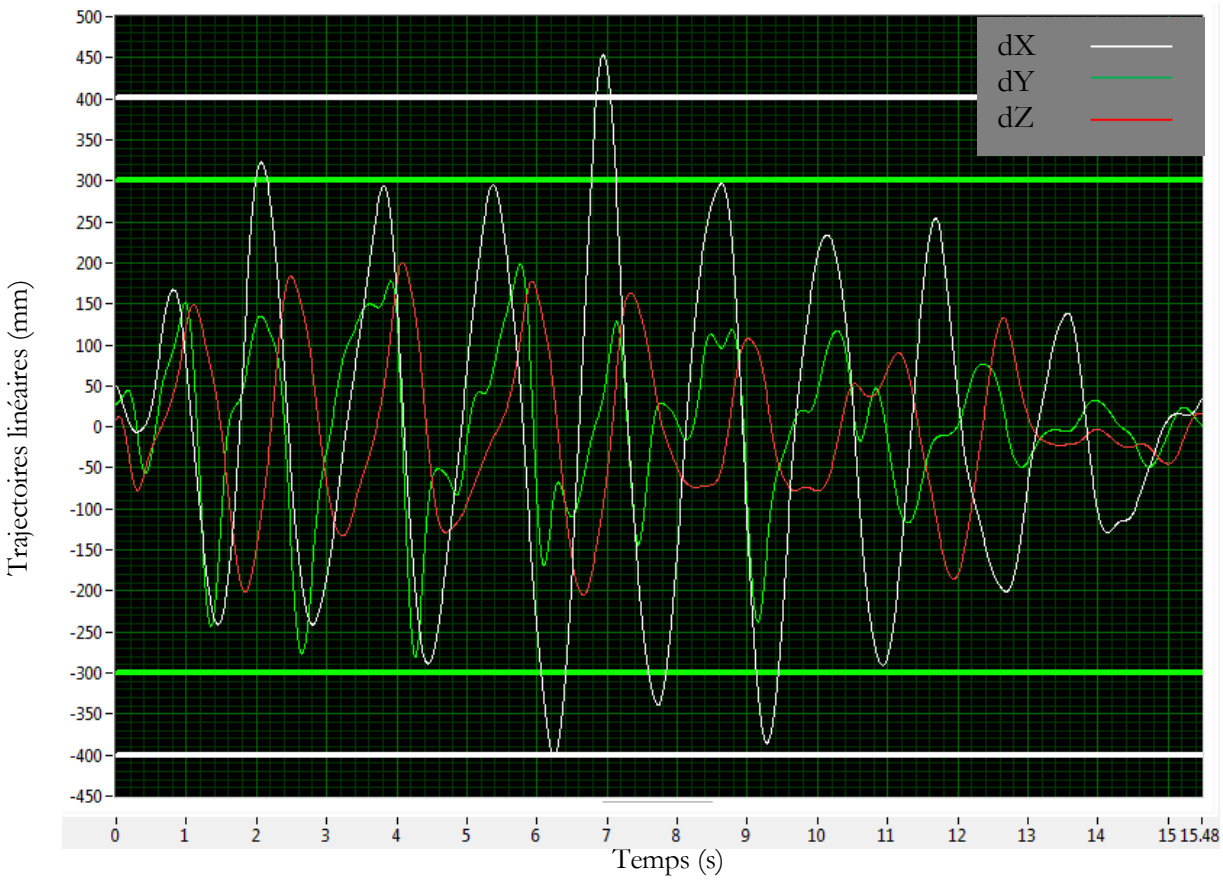


Figure 96 : Trajectoire linéaire : vague de référence VS limites de position hexapode

La trajectoire linaire expérimentale de la vague de référence (définie par le vecteur (dX, dY, dZ)) est donc ajustée afin de conserver la dynamique de variations longitudinales relatives de la planche de surf tout en restant dans les limites des caractéristiques linaires de l'hexapode.

3.3 Conception de l'environnement « surf » du simulateur

Afin de permettre à l'utilisateur de se positionner correctement sur le plateau mobile de l'hexapode, l'environnement doit reproduire au mieux l'environnement réel. De plus, l'objectif du simulateur est d'analyser, voire prédire, les interactions entre le surfeur et sa planche et entre la planche et la vague. Ainsi, il est nécessaire de pouvoir mesurer, en temps réel sur l'hexapode, les actions du surfeur sur la planche. Pour cela, le capteur de forces 6 composantes utilisé pour la campagne expérimentale peut également être placé entre le surfeur et l'hexapode sur le plateau mobile.

Pour ces raisons, l'environnement du simulateur a été construit comme illustré à la Figure 97. La planche spécialement conçue pour la campagne expérimentale a été réutilisé dans le cadre de la simulation en laboratoire. La mesure du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur la planche (ou l'inverse) peut ainsi avoir lieu tout en indiquant au surfeur le positionnement à avoir sur la planche. Une cage a également été conçue afin de permettre au surfeur de pouvoir évoluer en toute sécurité ; en effet, le plateau mobile de l'hexapode évolue en moyenne autour d'une altitude d'1m60. De plus, dans le cadre du mode « Suivi de trajectoires » cet environnement donne la possibilité au surfeur de se stabiliser si besoin en se tenant aux extrémités de la cage.

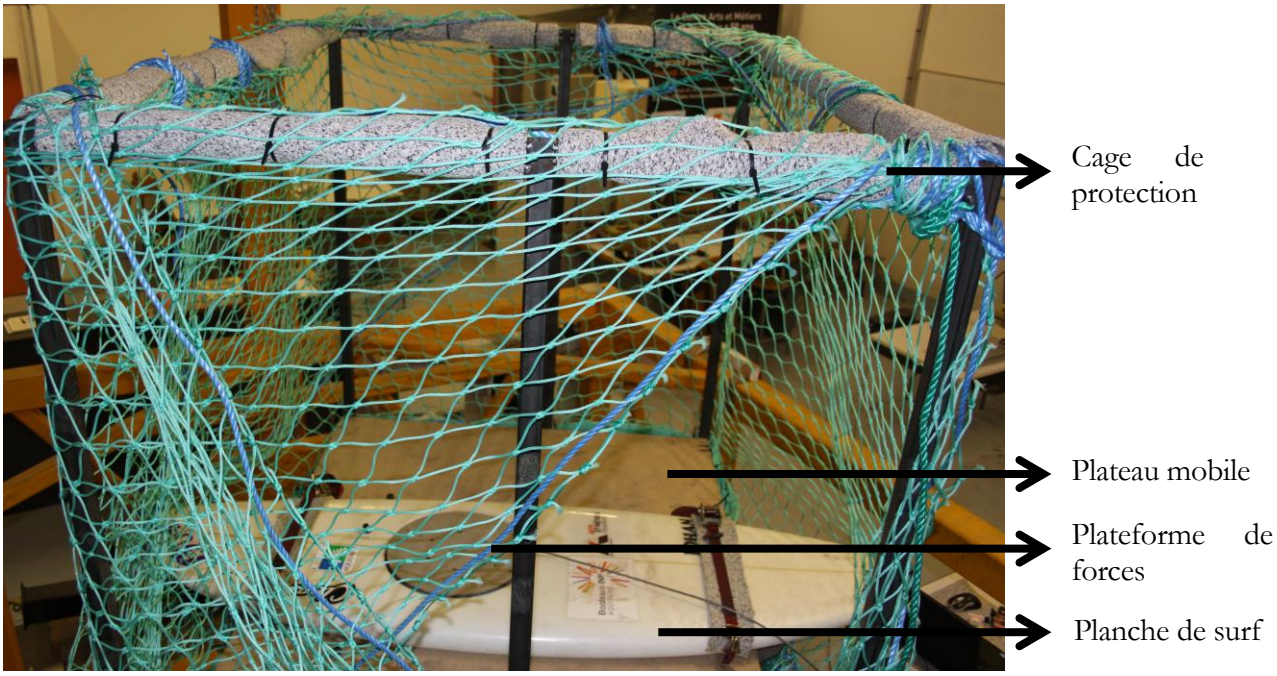


Figure 97 : Environnement « surf » du simulateur

3.4 Résultats d'intégration de la base de données

L'objectif du mode « Suivi de trajectoires » mis en place au travers de l'hexapode est de valider les interactions vague/planche/surfeur. Ainsi, la trajectoire de la planche de surf lorsqu'elle évolue sur la vague est reproduite par l'hexapode et le surfeur positionné sur la planche « subit » le mouvement. L'objectif est alors d'enregistrer, lors de la simulation, les mesures de la plateforme de forces placée sous le pied avant du surfeur. Le surfeur participant à la campagne de suivi de trajectoires en laboratoire est le même que celui ayant participé aux acquisitions *in situ*. Le torseur d'actions mécaniques ainsi relevé est comparé avec le torseur d'actions mécaniques générées par le surfeur sur la vague *in situ* pour la réalisation de cette trajectoire. Trois modes de suivi de trajectoires sont implantés dans l'hexapode : un mode de suivi ne prenant en compte que les trajectoires angulaires de la planche, un deuxième ne prenant en

compte que les trajectoires linéaires et enfin un troisième mode mixte définissant la trajectoire complète de la planche de surf lors de son évolution sur une vague de référence.

3.4.1 Modèle de suivi des rotations de la planche

Le mode de suivi des rotations consiste à implanter dans l'hexapode les variations angulaires relatives de la planche de surf. L'objectif est donc de comparer les actions mécaniques imposées par la planche de surf sur l'utilisateur dans le cadre de ce mode de pilotage de l'hexapode avec les efforts du surfeur sur la planche mesurés lors de la campagne expérimentale sur une vague de référence.

La méthodologie employée a pour but principal de vérifier le principe d'actions réactions au centre de la plateforme de forces de la planche de surf :

$$\{\tau_{planche \rightarrow surfeur}\}_{Centre\ plateforme} = -\{\tau_{surfeur \rightarrow planche}\}_{Centre\ plateforme} \quad (3.8)$$

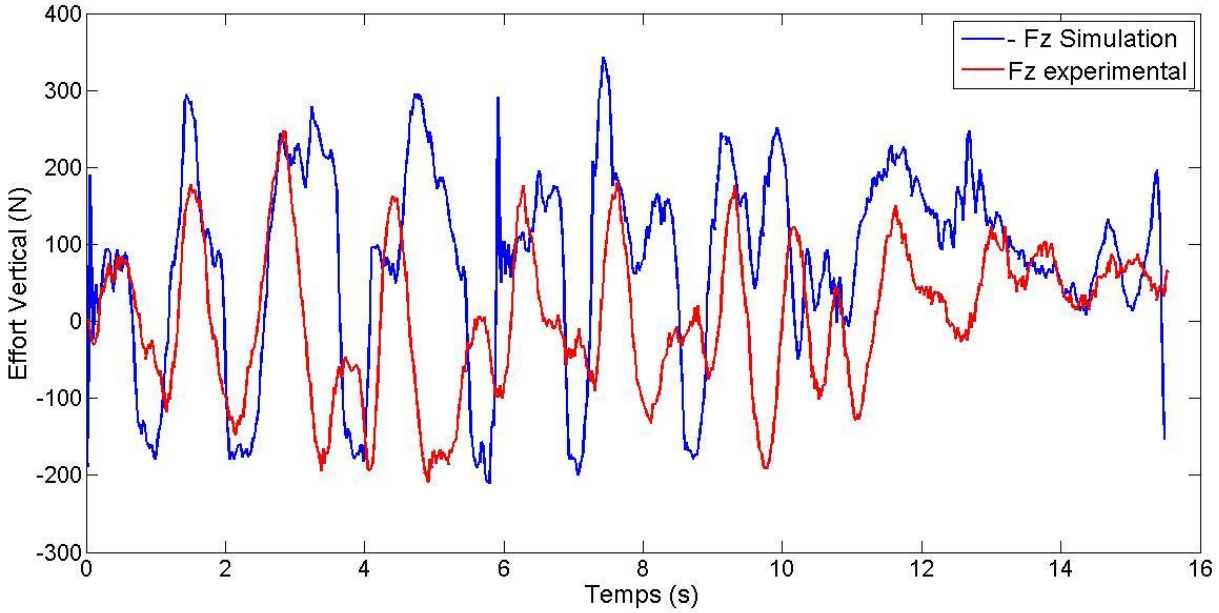


Figure 98 : Comparaison effort vertical en mode suivi de trajectoires en rotation

La Figure 98 illustre par exemple la comparaison entre l'effort vertical expérimental (imposé par la jambe avant du surfeur lors de la campagne expérimentale) et l'effort vertical subi par ce même utilisateur lors de la reproduction de la trajectoire à l'aide de l'hexapode. Pour rappel, l'effort vertical est une composante prédominante du torseur d'interactions mécaniques entre le surfeur et la planche. Pour exemple, la Figure 99 illustre également la comparaison entre le moment M_x autour de l'axe $\vec{X}$ généré par l'utilisateur lors de la génération de trajectoires sur la vague *in situ,* et celui subi par le surfeur sur le simulateur en environnement contrôlé.

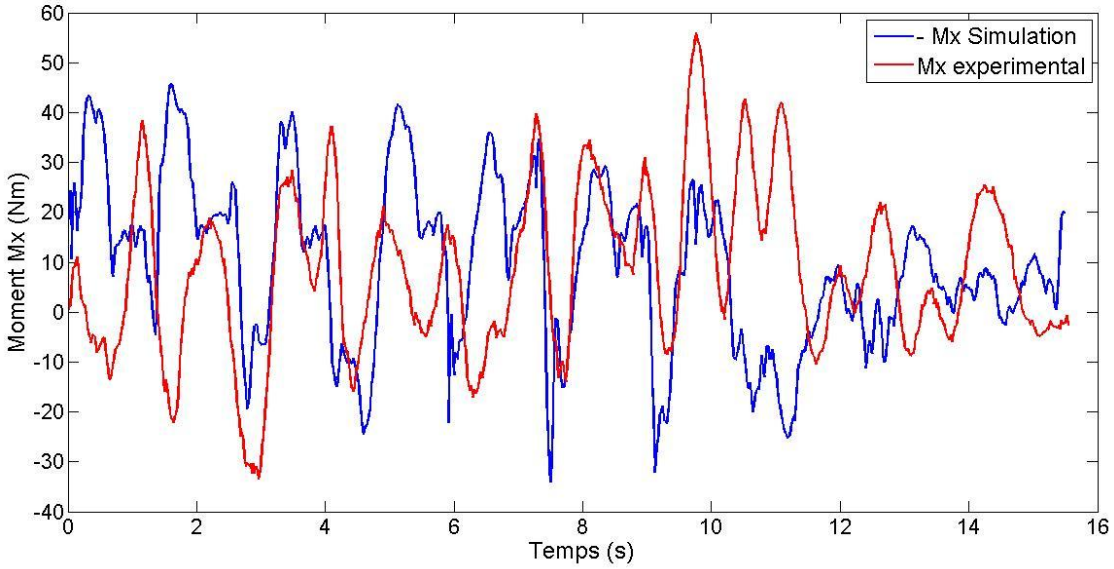


Figure 99 : Comparaison le moment transverse M_x en mode suivi de trajectoires en rotation

Ainsi d'après l'analyse de l'ensemble des composantes d'actions mécaniques reproduites sur l'utilisateur à l'aide du simulateur, il apparaît que la reproduction des trajectoires angulaires seules en environnement contrôlé permet de retranscrire qualitativement les parts dominantes des efforts sur le surfeur. Cependant, d'après la Figure 99 la reproduction des moments semble pouvoir être améliorée.

3.4.2 Modèle de suivi des translations relatives de la planche

Le mode de suivi des translations relatives consiste à implanter dans l'hexapode les variations de position relatives en translation de la planche de surf. L'objectif est de vérifier si l'équation (3.8) est vérifiée.

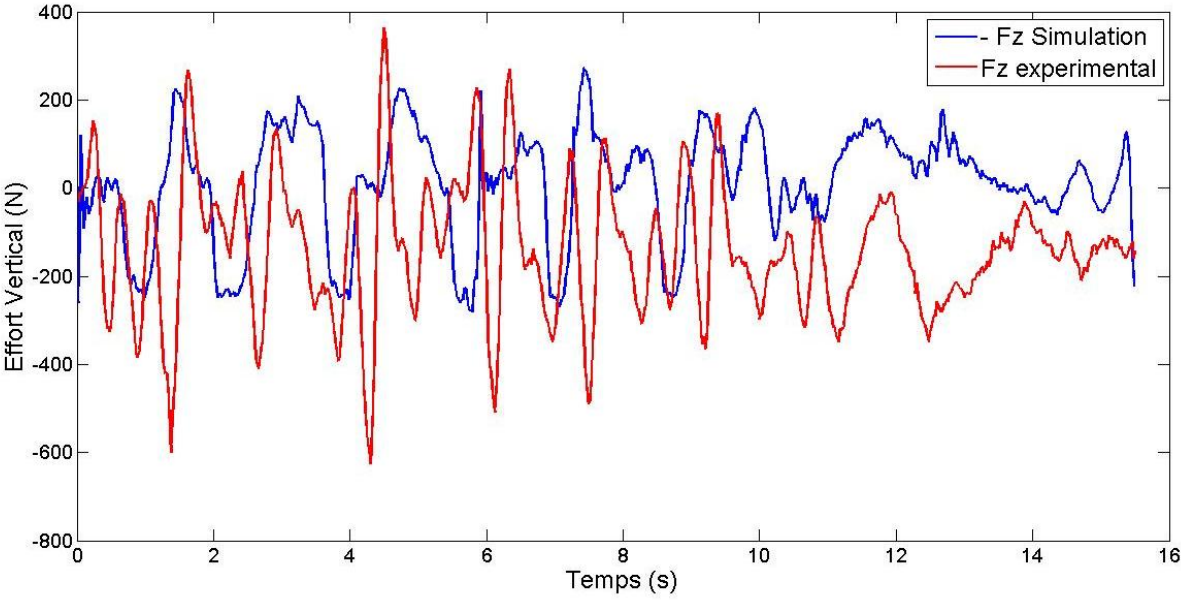


Figure 100 : Comparaison de l'effort vertical en mode suivi de trajectoires en translation

La Figure 100 illustre l'effort vertical du surfeur sur la planche au niveau de l'appui avant. L'effort vertical en simulation correspond à l'effort mesuré en simulation sur l'hexapode en mode suivi de trajectoires en translation uniquement. Cet effort est prépondérant dans l'analyse et la reproduction des interactions surfeur/planche. Aussi, si cet effort ne peut être retranscrit en environnement contrôlé, cela est rédhibitoire pour pouvoir reproduire qualitativement les interactions surfeur/planche. Sur cette figure, il semble que la reproduction ne soit pas suffisante et que les translations seules ne permettent pas de reproduire le comportement d'interactions entre le surfeur et sa planche. Cette tendance se vérifie en analysant les autres composantes du torseur d'actions mécaniques enregistré durant la reproduction de différentes vagues en mode suivi de trajectoires en translation uniquement.

3.4.3 Modèle de suivi mixte

Le mode de suivi mixte permet d'implanter dans l'hexapode la trajectoire complète, en rotations et en translations, de la planche de surf lors de son évolution sur une vague de référence. Les sous-parties précédentes ont permis d'identifier que les translations relatives seules ne permettent pas de reproduire de manière satisfaisante les interactions surfeur/planche. L'objectif est ici d'évaluer qualitativement la contribution des translations si elles sont couplées aux rotations de la planche de surf. En effet, la partie 3.4.1 du chapitre 3 précise la limite à reproduire les composantes moments (M_x, M_y, M_z) du torseur d'actions mécaniques.

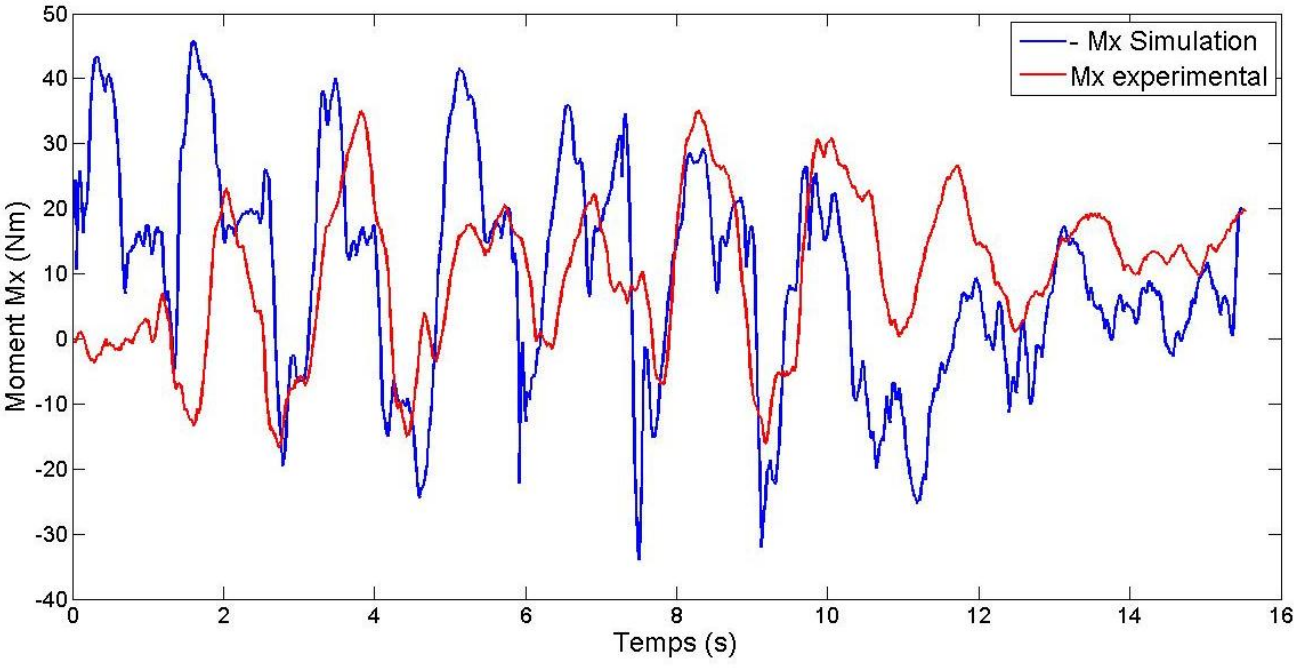


Figure 101 : Comparaison le moment transverse M_x en mode suivi de trajectoires mixte

La Figure 101 illustre un exemple de contribution des rotations de la trajectoire de la planche de surf pour reproduire de manière satisfaisante les moments prépondérants du torseur d'interactions entre le surfeur et sa planche. Cette tendance se vérifie en analysant les autres composantes du torseur d'actions mécaniques enregistré durant la reproduction de différentes vagues en mode suivi de trajectoires mixte.

Le mode de suivi de trajectoires mixte permet donc, comme attendu, d'enrichir de manière satisfaisante la reproduction des interactions surfeur/planche en environnement contrôlé ; Cependant, au vu de l'analyse du mode de suivi de trajectoires en rotation uniquement, il apparaît qu'en première approximation les rotations seules de la planche peuvent reproduire les interactions entre le surfeur et sa planche. Nous considérerons ainsi cette hypothèse dans la suite des travaux lors du pilotage en effort et de l'intégration d'un modèle prédictif dans l'hexapode afin de vérifier la validité de ces interactions et plus particulièrement le ressenti du surfeur.

Approche utilisée pour valider et traiter les données expérimentales

Les travaux réalisés dans ce chapitre 3 ont permis de valider les données mesurées lors de la campagne expérimentale au travers notamment d'une analyse détaillée des corrélations entre la trajectoire de planche de surf et les actions du surfeur pour générer cette trajectoire. Nous avons utilisé la base de données expérimentales pour identifier un modèle mathématiques d'interactions surfeur/planche/vague. Ce modèle d'interactions a alors été validé grâce à une analyse résiduelle et fréquentielle des différents jeux de données. De plus, les résultats prédits à l'aide du modèle identifié (c'est-à-dire les trajectoires de la planche de surf) ont été comparés et validés pour l'ensemble des données de la campagne expérimentale *in situ*.

Des résultats préliminaires d'intégration dans l'architecture de commande de l'hexapode ont également été apportés. En effet, un premier mode de pilotage de l'hexapode et une conception préliminaire de l'environnement du simulateur de surf ont permis de mettre en œuvre un suivi de trajectoires réaliste en environnement contrôlé lié aux mouvements d'une planche de surf lors de son évolution sur une vague. Dans le cadre de ce mode de commande, les mouvements programmés dans l'hexapode sont représentatifs des trajectoires de la planche de surf enregistrées en conditions réelles. L'utilisateur est alors placé sur le plateau mobile de l'hexapode et a pour rôle d'assurer son maintien en équilibre sur la planche fixée sur l'hexapode. Lors de ces phases d'expérimentations en environnement contrôlé, l'utilisateur exerce un torseur d'actions mécaniques sur la planche pour conserver sa position d'équilibre. Nous avons alors comparé ce torseur d'actions mécaniques avec celui exercé sur la planche de surf lors de la génération de trajectoires mesuré en conditions réelles. Les résultats ont conlu qu'en première approximation les rotations seules de la planche peuvent reproduire les interactions entre le surfeur et sa planche.

Chapitre 4

MISE EN PLACE DU SIMULATEUR : INTEGRATION DANS L'HEXAPODE

1 Analyse du modèle d'interactions surfer/vague

La stratégie de commande (dite « commande externe en effort ») décrite dans le chapitre 2 définit la configuration employée pour intégrer au comportement de l'hexapode le modèle des interactions entre le surfeur et la vague à travers sa planche. Avant de traiter de l'architecture de commande dans son ensemble, une analyse du modèle $W(s)$ obtenu expérimentalement est réalisée. Ensuite, un modèle simplifié $P(s)$ de ces interactions est défini afin d'être intégré à l'hexapode.

1.1 Configuration du système

Une stratégie de commande hybride externe en effort (Van Brussel, *et al.*, 1988) décrit une architecture dans laquelle une boucle d'effort est réalisée autour d'une boucle interne de position (Figure 102).

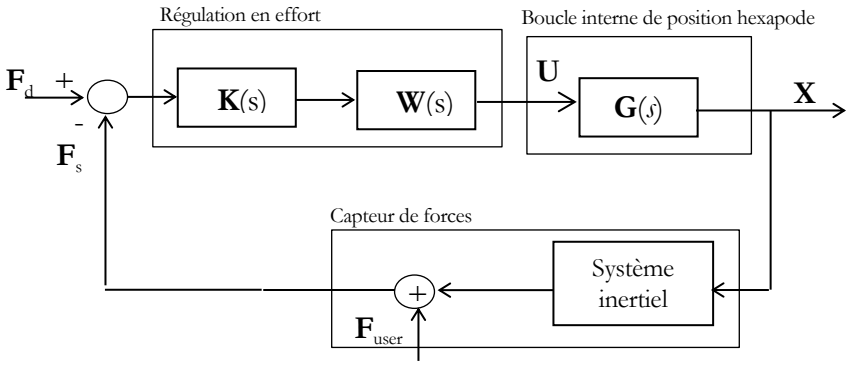


Figure 102 : Commande en effort externe

La Figure 102 illustre une architecture de commande hybride externe en effort. Le bloc régulation en effort inclut le modèle [6x6] d'interactions surfeur/vague $\mathbf{W}(s)$ ainsi qu'un régulateur multivariable $\mathbf{K}(s)$ dont l'objectif est notamment de stabiliser le système bouclé. Les consignes de position $\mathbf{U}$ de l'hexapode sont générées en prenant en compte la différence entre l'effort désiré $\mathbf{F}_d$ et l'effort mesuré $\mathbf{F}_s$ par un capteur de force. Dans le cadre de notre application, l'effort mesuré par le capteur résulte à la fois de l'effort volontaire produit par le surfer $\mathbf{F}_{user}$ et des forces inertielles qu'il subit. $\mathbf{F}_{user}$ est un vecteur ayant 6 composantes correspondant au torseur d'actions mécaniques du pied avant du surfeur sur la planche de surf. Le système inertiel est un modèle diagonal [6x6], noté $\mathbf{J}(s)$ prenant en compte la masse et le volume de l'utilisateur placés sur le capteur et subissant les mouvements dynamiques de la plateforme mobile. Le système $\mathbf{G}(s)$ correspond à la dynamique de l'hexapode asservi en

position par une boucle de régulation interne. Cette régulation interne assure à l'hexapode un suivi de trajectoire valide et permet de ne pas exécuter une trajectoire en dehors de l'espace de travail. Enfin **X** correspond aux positions réelles de l'hexapode. Compte tenu des temps de réaction du surfeur et de la boucle de commande globale, il sera ici fait l'hypothèse que l'effort $\mathbf{F}_{\text{user}}$ produit par le surfeur est indépendant du déplacement **X**.

1.2 Analyse du niveau de couplage du système W(*s*)

Différents critères peuvent être utilisés pour analyser le couplage et l'incertitude d'un système multivariable. On peut notamment citer quatre outils (Skogestad, *et al.*, 2005) : l'étude du rapport des valeurs singulières extrémales (Condition Number), la construction des bandes de Gershgorin pour les systèmes bouclés, le calcul du taux de dominance diagonale (Column Diagonal Dominant Degree ou CD^3) et une analyse RGA (Relative Gain Array). Une analyse RGA est appliquée dans le cadre du projet SIMUSURF.

Le modèle expérimental **W**(*s*) est soumis à une analyse RGA afin d'étudier le niveau de couplage du système et le degré de dominance diagonale. Pour des systèmes *m*x*m*, l'analyse RGA détermine si les interactions entre les entrées et sorties du système peuvent être modifiées par d'autres entrées et si un régulateur décentralisé peut être efficace. Pour une matrice carrée non singulière **H**, une matrice RGA peut être calculée par le produit de Shur suivant :

$$\mathbf{\Gamma(H)} \triangleq \mathbf{H} \times (\mathbf{H^{-1}})^T. \tag{4.1}$$

Cette matrice est généralement exprimée en fonction de la fréquence. Pour le modèle multivariable [6x6] **W**(*s*), à une pulsation de 20 rad/s la matrice **Γ** est égale à :

$$\mathbf{\Gamma}\left(\left|W_{ij}\left(20_{\text{rad/s}}\right)\right|\right) = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & \mathbf{1.00} \\ 0.07 & 0.06 & 0.33 & \mathbf{1.11} & 0.06 & 0.00 \\ 0.19 & 0.25 & \mathbf{0.71} & 0.04 & 0.51 & 0.00 \\ \mathbf{0.85} & 0.13 & 0.01 & 0.25 & 0.27 & 0.00 \\ 0.08 & 0.42 & 0.29 & 0.08 & \mathbf{0.56} & 0.00 \\ 0.19 & \mathbf{0.64} & 0.30 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix}. \tag{4.2}$$

Les éléments en gras de la matrice RGA montrent le niveau de découplage du système. Plus ces éléments sont proches de 1, plus les sorties du système peuvent être considérées découplées les unes des autres. Ainsi, l'analyse de la matrice RGA permet d'affirmer qu'il est possible d'utiliser un régulateur décentralisé associant à chaque sortie une entrée de commande. En l'occurrence, on voit ici que :

- la force M_z agit essentiellement sur la translation autour de l'axe z
- la force M_x agit essentiellement sur la translation autour de l'axe x
- la force F_z agit essentiellement sur la translation autour de l'axe z
- le moment F_x agit essentiellement sur la rotation autour de l'axe x

- la force M_y agit essentiellement sur la rotation autour de l'axe y
- la force F_y agit essentiellement sur la rotation autour de l'axe z

Le système en boucle fermée défini Figure 102 inclut un régulateur MIMO $\mathbf{K}(s)$. Considérant qu'un régulateur décentralisé est plus simple à intégrer dans l'architecture de commande, une matrice de pré-compensation $\mathbf{B}(s)$ peut être calculée afin de rendre le système à commander $\mathbf{J}(s)\mathbf{W}(s)\mathbf{B}(s)$ quasi-diagonal. Le nouveau système ainsi obtenu peut alors être régulé par 6 boucles de régulations indépendantes SISO. Pour définir la matrice $\mathbf{B}(s)$, différentes méthodes sont disponibles selon le type de découplage choisi : découplage dynamique, découplage pseudo-continu, découplage approximatif à une fréquence donnée ou encore approche SVD.

1.3 Découplage adopté dans le cadre du projet SIMUSURF

Dans le cadre de notre application, une méthode de découplage à une fréquence ω_s est appliquée. ω_s est choisie selon la bande passante recherchée afin que les interactions les plus importantes et les plus représentatives y soient réduites. La matrice $\mathbf{B}$ est définie par l'inverse de $\widetilde{\mathbf{W}}$, une approximation de la matrice RGA du système d'interactions surfeur/vagues $\mathbf{W}(s)$. En ne conservant que les termes majeurs de $\mathbf{W}(s)$ (éléments supérieurs à chacun de ceux placés sur leur colonne et ligne) à la pulsation $\omega_s = 20$ rad/s, la matrice $\mathbf{B}$ est définie par :

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.18 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.56 \\ 0.00 & 0.00 & 1.42 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.90 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.77 & 0.00 \\ 1.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \tag{4.3}$$

Pour déterminer l'effet de la matrice pré-compensatrice sur le système initial et analyser si les interactions sont en effet réduites, la matrice RGA du nouveau système $\mathbf{W}_p(s) = \mathbf{W}(s)\mathbf{B}(s)$ est calculée à 20 rad/s :

$$\boldsymbol{\Gamma}\left(\left|W\mathrm{p}_{ij}\left(20_{\mathrm{rad/s}}\right)\right|\right) = \begin{bmatrix} \mathbf{1.00} & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ 0.00 & \mathbf{1.11} & 0.33 & 0.07 & 0.06 & 0.06 \\ 0.00 & 0.04 & \mathbf{0.71} & 0.19 & 0.51 & 0.25 \\ 0.00 & 0.25 & 0.01 & \mathbf{0.85} & 0.27 & 0.13 \\ 0.00 & 0.08 & 0.29 & 0.08 & \mathbf{0.56} & 0.42 \\ 0.00 & 0.00 & 0.30 & 0.19 & 0.00 & \mathbf{0.64} \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

L'analyse de la matrice RGA $\boldsymbol{\Gamma}\left(\left|W\mathrm{p}_{ij}\left(20_{\mathrm{rad/s}}\right)\right|\right)$ montre que le système pré-compensé est maintenant à dominance diagonale. Si l'objectif est alors d'utiliser le système [6x6] $\mathbf{W}(s)$ pour la commande de l'hexapode, un régulateur diagonal $\mathbf{K}_p(s)$ peut être calculé pour $\mathbf{J}(s)\mathbf{W}_p(s)$ et le régulateur final est donc $\mathbf{B}(s)\mathbf{K}_p(s)$.

2 Proposition d'un modèle simplifié et réaliste d'interactions surfeur/vague P(*s*)

2.1 Choix et détermination des entrées/sorties prépondérantes et caractéristiques du système P(*s*)

Dans le cadre d'une première mise en œuvre du projet SIMUSURF, un modèle préliminaire simplifié **P**(s) du modèle identifié expérimentalement **W**(s) a été défini. En effet, l'objectif scientifique est ici d'analyser et de valider la faisabilité de la mise en œuvre du simulateur, de son système de commande externe et de pilotage en effort grâce à un modèle déterminé à l'issue d'une campagne expérimentale *in situ*.

En s'appuyant sur le ressenti de l'utilisateur sur le simulateur et en lui permettant de reproduire les mouvements caractéristiques de la planche de surf lors d'une évolution sur la vague, il s'est agi de choisir les composantes dominantes du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur la planche et de les associer aux composantes dominantes du mouvement de la planche de surf.

La Figure 103 illustre un exemple de couple d'actions dominantes (Fz, Mx). Sur l'ensemble des interactions mesurées lors de la campagne expérimentale, ce couple représente les actions principales identifiées entre le surfeur et la planche, il peut donc être choisi pour déterminer le modèle simplifié d'interactions surfeur/vague **P**(*s*).

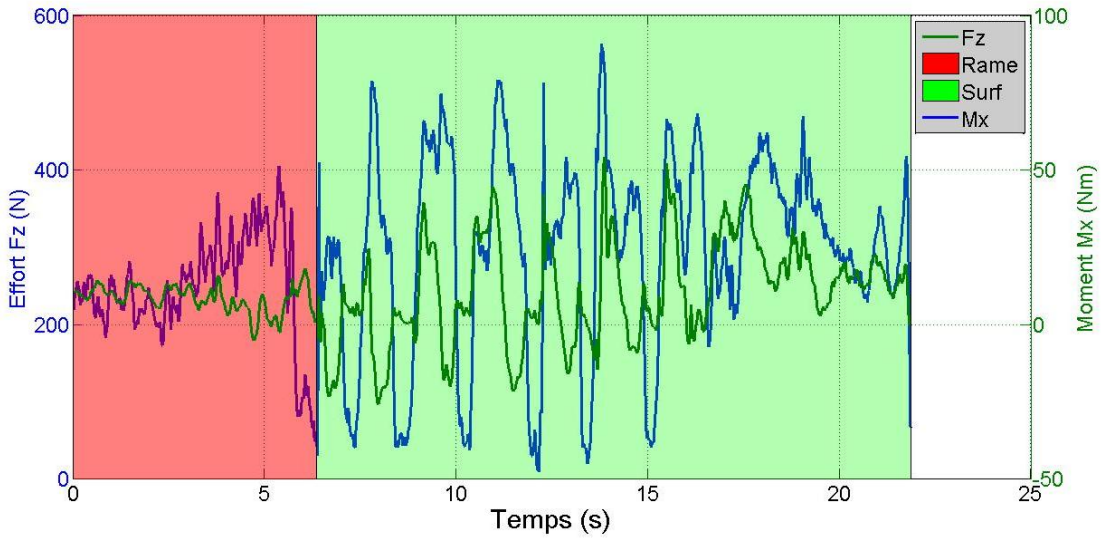


Figure 103 : Choix des entrées du modèle simplifié

En ce qui concerne le choix des mouvements dominants de la planche de surf, le ressenti de l'utilisateur représente le critère principal. D'après une analyse approfondie des images de la camera onshore issues de la champagne expérimentale, lors de l'évolution d'un surfeur sur la vague, considérant une glisse générale telle qu'une prise de vitesse, les mouvements relatifs

dominants de la planche de surf sont les rotations R_x et R_y respectivement autour de l'axe longitudinal et de l'axe transversal.

Ainsi le modèle expérimental **P**(*s*) à identifier à partir des données expérimentales (F_z, M_x, Ω_x, Ω_y) se définit par un modèle [2x2] comme représenté sur la Figure 104.

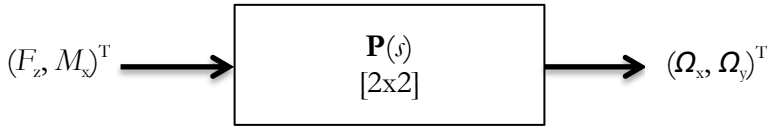


Figure 104 : Modèle simplifié **P**(*s*) des interactions surfeur/vague à identifier

2.2 Identification du modèle simplifié P(*s*)

La partie 2 du chapitre 3 illustre la méthodologie utilisée pour identifier le modèle global issu de la campagne expérimentale dans le cadre du projet SIMUSURF. La méthodologie d'identification et de validation est différente en ce qui concerne l'identification du modèle simplifié **P**(*s*). En effet, dans le cas de cette identification, la forme du modèle a été imposée et les paramètres ont été identifiés par optimisation à partir des données expérimentales issues de la campagne *in situ*. L'objectif est d'utiliser un modèle linéaire prédéfini simplifiant la nature du modèle et facilitant donc l'implantation de celui-ci dans le système de commande en effort de l'hexapode. L'interprétation des diagrammes de Bode de chaque fonction de transfert du modèle d'interactions précédemment identifié **W**(*s*) conduit à choisir des fonctions de transfert du modèle simplifié **P**(*s*) de la forme :

$$H(s) = \frac{K_0 s}{1 + \frac{2\xi}{\omega_0} s + \frac{s^2}{{\omega_0}^2}}, \tag{4.5}$$

avec ω_0 une pulsation de transition et ξ un facteur d'amortissement.

Le modèle de comportement permet de relier respectivement la sortie Ω_x et Ω_y avec l'entrée F_z et M_x par l'intermédiaire des fonctions de transfert $P_{11}(s)$ et $P_{22}(s)$. L'optimisation des paramètres conduit à

$$P_{11}(s) = \frac{0{,}0066s}{1 + 0{,}09s + 0{,}0024s^2} \tag{4.6}$$

et

$$P_{22}(s) = \frac{-0{,}00063s}{1 + 0{,}15s + 0{,}042s^2} \tag{4.7}$$

Le modèle **P**(*s*) est donc un modèle diagonal, facilitant ainsi sa mise en œuvre et son intégration dans l'hexapode. Les données expérimentales (F_z, M_x) relatives à la vague de référence du torseur des actions mécaniques du surfeur sur la planche ont été respectivement appliquées en

entrée des modèles $P_{11}(s)$ et $P_{22}(s)$. Les sorties (Ω_x, Ω_y), obtenues avec les modèles identifiés, ont été comparées avec les composantes (Ω_x, Ω_y) expérimentales issues de la base de données et définissant le comportement dynamique de la planche. Les Figure 105 et Figure 106 présentent l'ensemble des résultats obtenus.

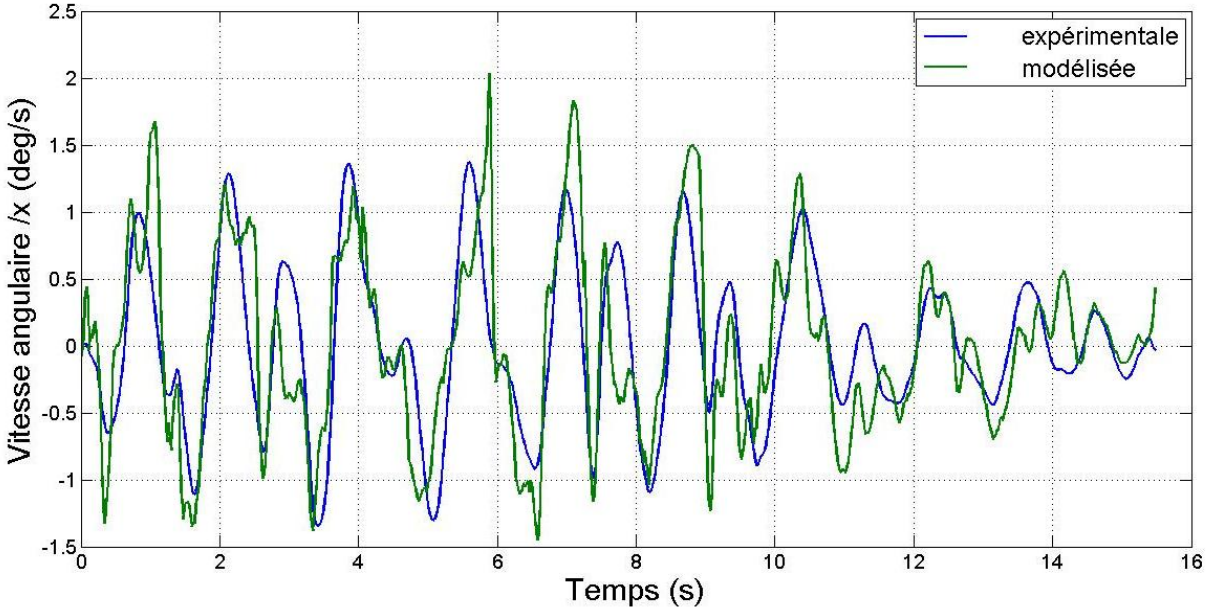


Figure 105 : Comparaison entre la vitesse angulaire Ω_x expérimentale et modélisée

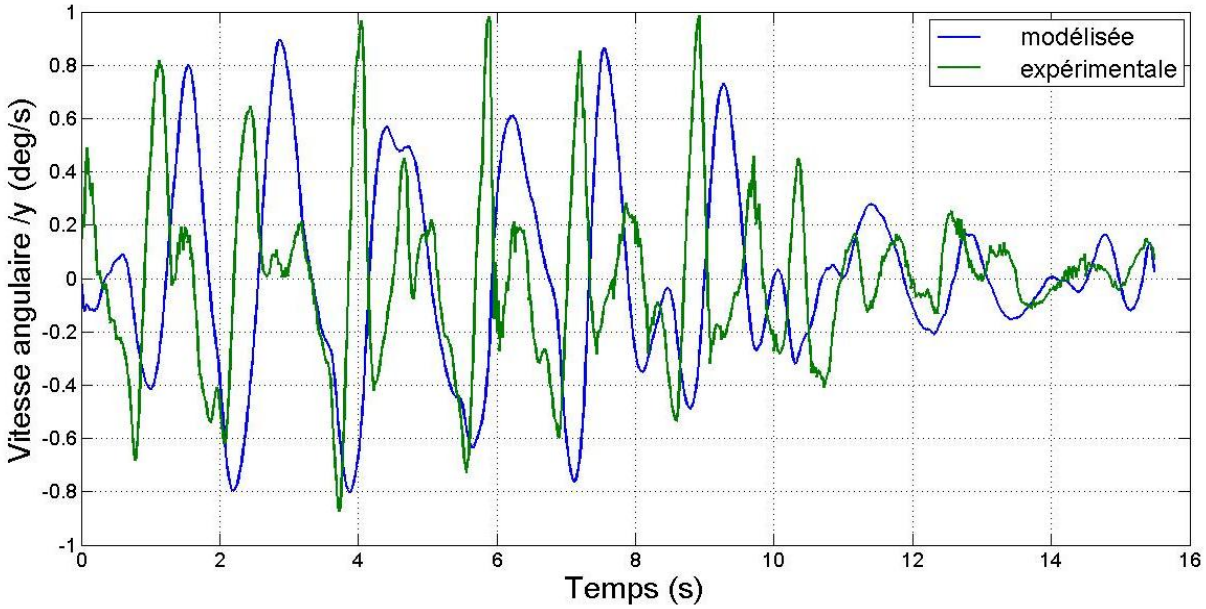


Figure 106 : Comparaison entre la vitesse angulaire Ω_y expérimentale et modélisée

Sans pour autant parfaitement reproduire les vitesses angulaires expérimentales, on peut constater que les vitesses générées par le modèle simplifié en présentent les principales

caractéristiques. Ce modèle simplifié devrait donc assurer un comportement assez naturel au simulateur.

Par ailleurs les deux sous-modèles $P_{11}(s)$ et $P_{22}(s)$ obtenus sur la base des données mesurées sur une vague de référence ont été validés en étant appliqués à d'autres « jeux de données » expérimentaux (même campagne expérimentale et donc même environnement) mesurés sur différentes vagues. Là aussi la comparaison entre les vitesses angulaires expérimentales et simulées ont permis de valider chaque sous-modèle identifié.

3 Implantation d'un modèle expérimental de commande de l'hexapode

L'objectif est de considérer à la fois l'architecture externe du simulateur, le schéma de commande et la synthèse d'un régulateur pour permettre l'implantation de modèles expérimentaux simplifiés dans l'hexapode.

3.1 Modifications nécessaires de la partie hardware de l'hexapode

L'architecture standard de commande de l'hexapode nécessite que la trajectoire qu'on lui demande soit définie *a priori*, particulièrement afin que sa faisabilité en termes d'accélération, vitesses et positions soient vérifiée. Pour notre simulateur, définir la trajectoire à l'avance n'est pas envisageable puisque l'hexapode doit être capable de réagir aux sollicitations du surfeur. La gestion informatique de l'hexapode a donc été modifiée afin de pouvoir prendre en compte des demandes de déplacement en temps-réels avec un temps de latence aussi faible que possible. Un système de contrôle commande temps-réel externe à l'hexapode lui définit les déplacements à réaliser à partir des mesures des efforts d'interaction entre le surfeur et le simulateur.

Acquisition et traitement du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur l'hexapode

L'acquisition du torseur d'actions mécaniques nécessite l'utilisation des composants d'essais suivants :

- la plateforme de forces 6 composantes
- un système de mesure des 6 signaux analogiques
- un système temps-réel permettant de traiter les 6 signaux afin de déterminer le torseur des efforts (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z).

Dans le cadre du projet SIMUSURF, le choix s'est porté sur un système d'acquisition temps-réel de la gamme National Instruments, à savoir un système CompactRio NI9149 et des

périphériques de mesures analogiques différentielles NI9215. Le logiciel d'acquisition et de traitement des données est programmé à l'aide du logiciel LabView RT.

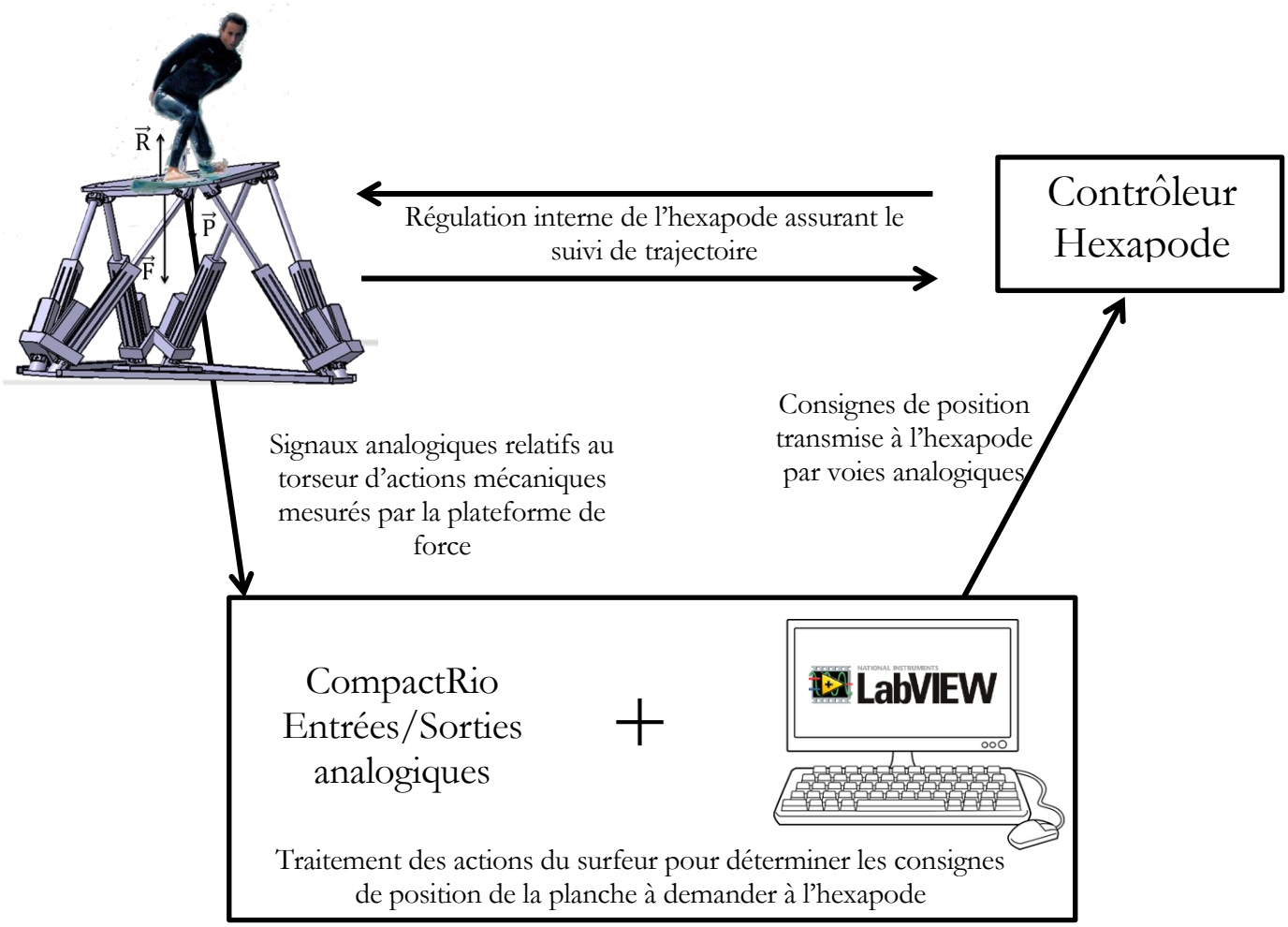


Figure 107 : Schéma d'acquisition, de traitement des données d'actions mécaniques du surfeur et d'envoi des consignes de position (*T*x,*T*y,*T*z,*R*x,*R*y, *R*z) à l'hexapode

La Figure 107 illustre les composants ajoutés à l'environnement de l'hexapode afin de permettre la prise en compte des interactions entre l'utilisateur et l'hexapode.

Transmission des consignes de position (*T*x,*T*y,*T*z,*R*x,*R*y, *R*z) *en temps réel à fournir à l'hexapode*

Des modules de sorties analogiques NI9263 sont ajouté au châssis CompactRio. Le programme Labview implanté sur le pc d'acquisition/traitement définit les valeurs des consignes de position de l'hexapode (*T*x,*T*y,*T*z,*R*x,*R*y, *R*z) à chaque instant d'échantillonnage. Celles-ci sont ensuite transmises au système de commande hexapode (incluant la commande des variateurs, moteurs et codeurs de chaque vérin) par l'intermédiaire des périphériques de sorties.

Compte tenu de l'ensemble des dynamiques (modèle des interactions surfeur/vague, dynamique de l'hexapode, et effets inertiels) et des gains de mesure/commande, l'objectif du programme LabView est donc déterminé à chaque instant les consignes de position de la planche correspondant aux efforts produits par l'utilisateur.

3.2 Architecture de commande

3.2.1 Modélisation du schéma de commande

Avant l'intégration du modèle **P**(s) dans le système expérimental, des travaux numériques préliminaires ont consisté à implanter les sous-modèles sous Matlab/Simulink. L'objectif est d'étudier la stabilité dynamique et de valider le comportement par la simulation numérique.

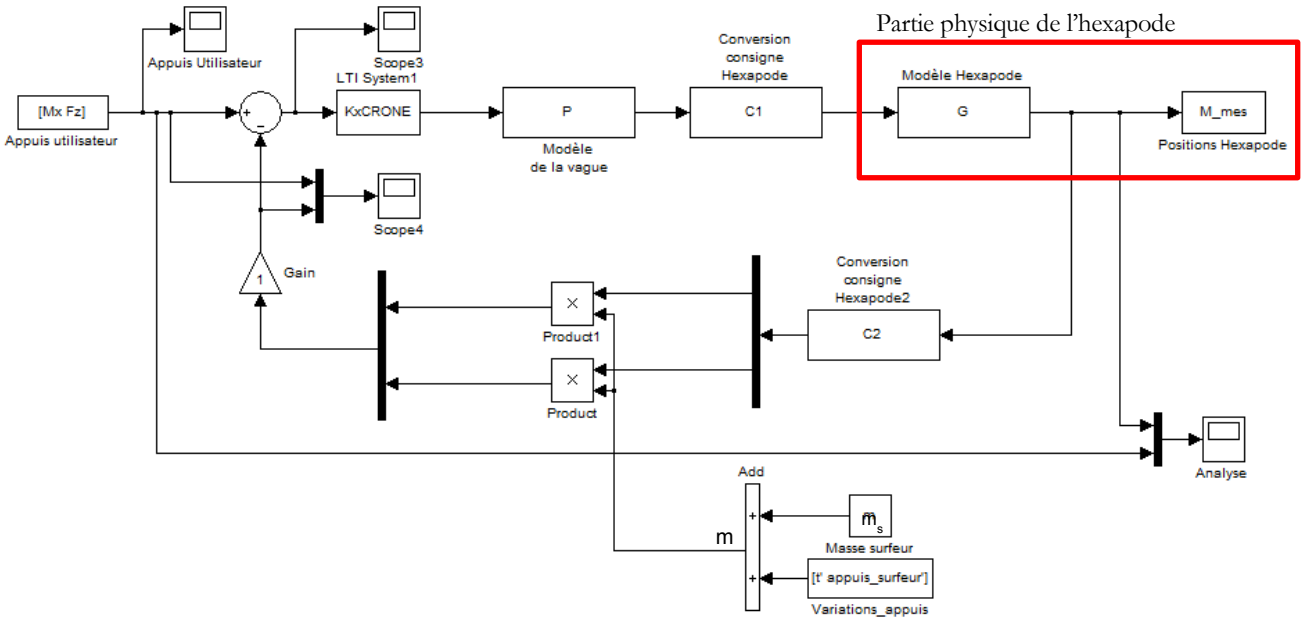


Figure 108 : Modélisation de l'architecture de commande sous Matlab/Simulink

La Figure 108 propose un modèle de l'architecture de commande prenant en compte le surfeur (appuis et effets inertiels), le modèle simplifié des interactions surfeur/vague, la dynamique de l'hexapode et le régulateur stabilisant notamment la boucle dynamique ainsi réalisée.

Compte tenu du traitement appliqué aux informations fournies par la plateforme de forces (soustraction des efforts initiaux correspond à la position d'équilibre en début d'expérience), le couple (M_x, F_z) correspond aux variations des appuis que l'utilisateur placé sur l'hexapode réalise volontairement, respectivement les variations du moment autour de l'axe longitudinal x et de l'effort vertical (axe z) imposé par le pied avant sur la planche.

Le bloc de sortie M_mes correspond au couple (a_x, a_y) et représente la trajectoire angulaire de la plateforme mobile de l'hexapode, respectivement autour de l'axe *x* et autour de l'axe *y*.

Le modèle **P**(*s*) correspond au modèle [2x2] identifié précédemment :

$$\mathbf{P}(s) = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & 0 \\ 0 & P_{22}(s) \end{bmatrix}. \tag{4.8}$$

Le modèle **G**(*s*) représente le modèle dynamique de l'hexapode et contient une boucle interne de régulation en position (cf Chapitre 4 Partie 1.1) :

$$\mathbf{G}(s) = \begin{bmatrix} \frac{G_0}{1+0.0078s} e^{-0.04s} & 0 \\ 0 & \frac{G_0}{1+0.0078s} e^{-0.04s} \end{bmatrix}. \tag{4.9}$$

Le bloc C1 définit la conversion entre les vitesses angulaires (Ω_x, Ω_y) issues du modèle **P**(*s*) et les consigne des positions angulaires ($a_{x\,ref}$, $a_{y\,ref}$) transmises en temps réel à l'hexapode :

$$\mathbf{C_1}(s) = \begin{bmatrix} \frac{180}{\pi.s} & 0 \\ 0 & \frac{180}{\pi.s} \end{bmatrix}. \tag{4.10}$$

Le bloc C2 illustre la prise en compte des effets inertiels dynamiques mesurés par le capteur de forces placé sous le pied avant du surfeur à une distance *d* du centre du pilotage de l'hexapode. Ces efforts sont induits par le mouvement de la plateforme mobile de l'hexapode. Dans le cadre du projet SIMUSURF, les effets inertiels ont été considérés comme ceux de la masse uniforme du surfeur mise en rotation, respectivement autour des axes *x* et *y*. Cette masse est considérée variable au cours du temps et directement liée à l'effort vertical F_z du surfeur sur la planche par la relation *m_variable* = F_z/g avec *g* la constante gravitationnelle. Le bloc C2 générant à la composante accélération de ses efforts inertiels, elle est définie par :

$$\mathbf{C_2}(s) = \begin{bmatrix} \frac{\pi}{180}.s^2 & 0 \\ 0 & \frac{\pi}{180}.\frac{s^2}{d} \end{bmatrix}. \tag{4.11}$$

L'ensemble du système dynamique vu par l'élément stabilisant (bloc régulateur ici nommé « KxCRONE ») est défini par **H**(*s*) :

$$\mathbf{H}(s) = \mathrm{m}\mathbf{C}2(s)\mathbf{G}(s)\mathbf{C}1(s)\mathbf{P}(s). \tag{4.12}$$

L'hexapode étant un système assez bien découplé et le modèle d'interaction surfeur/vague choisi étant lui-même diagonal, le système $\mathbf{H}(s)$ est un système diagonal [2x2] avec les composantes notées $H_{11}(s)$ et $H_{22}(s)$. $H_{11}(s)$ concerne la boucle de commande relative à la force M_x et à l'angle α_x de l'hexapode. $H_{22}(s)$ concerne la boucle de commande relative à la force F_z et à l'angle α_y de l'hexapode.

La partie 3.2.2 traite de la synthèse du régulateur $\mathbf{K}(s)$ par une approche de commande robuste CRONE.

3.2.2 Approche CRONE : synthèse d'un régulateur

La commande CRONE, Commande Robuste d'Ordre Non Entier, est une méthodologie de synthèse de commandes robustes utilisant l'opérateur de dérivation/intégration non entière. La robustesse recherchée est celle du degré de stabilité du système en boucle fermée vis-à-vis des incertitudes ou variations paramétriques dont peut faire l'objet le procédé. Trois générations de commande CRONE ont été successivement développées afin d'étendre le domaine d'application (Sabatier, *et al.*, 2015). La dernière génération a également été étendue à la commande des systèmes multivariables, que ce soit avec une approche multi-SISO (approche SISO prenant néanmoins en compte le caractère MIMO du système à commander) ou avec une approche MIMO découplante. Une toolbox CRONE pour Matlab est disponible (Lanusse, *et al.*, 2013) : http://cronetoolbox.ims-bordeaux.fr

S'il est habituel que l'objectif du régulateur assure la stabilisation robuste du système en boucle fermée, il ne concerne pas ici un suivi de consigne. En effet, le capteur utilisé ici (la plateforme de force) fournit une mesure combinée de l'effort défini par le surfeur et des effets inertiels induits. La boucle fermée n'est pas ici ajoutée avec un objectif d'asservissement mais subie de par la nature du capteur. Afin de prendre convenablement en compte les efforts produits par le surfeur et alimenter le modèle simplifié d'interaction surfeur/vague, outre l'objectif de stabilisation, le régulateur doit ici être aussi transparent que possible, par exemple en présentant un gain unitaire sur la plus grande plage de fréquence possible.

L'ensemble $\mathbf{H}(s)$ du système dynamique vu par l'élément stabilisant $\mathbf{K}(s)$ étant diagonal, la synthèse d'un régulateur CRONE est réalisée en mettant en œuvre la méthodologie de commande CRONE de 3ème génération SISO. Cette mise en œuvre est ici tout particulièrement présentée pour le procédé $H_{11}(s)$ défini par (1.12). La Figure 109 représente le diagramme de Bode du procédé pour différente valeur de la masse du surfeur ici considérée lentement variable. La masse nominale du surfeur a été fixée à 70kg. Ce paramètre va être considéré comme pouvant évoluer (tout en restant constant dans le temps) de 50kg à 100kg. La Figure 110 représente le procédé et ses incertitudes dans le plan de Nichols. Le module de $H_{11}(j\omega)$ étant supérieur à 1 (0dB) sur toute une bande de fréquence, sans élément de stabilisation le point critique (-1) serait plusieurs fois entouré et le système instable en boucle fermée. Le challenge consiste donc ici à synthétiser un régulateur au gain unitaire en basse fréquence mais assurant également la stabilité robuste du système en boucle fermée.

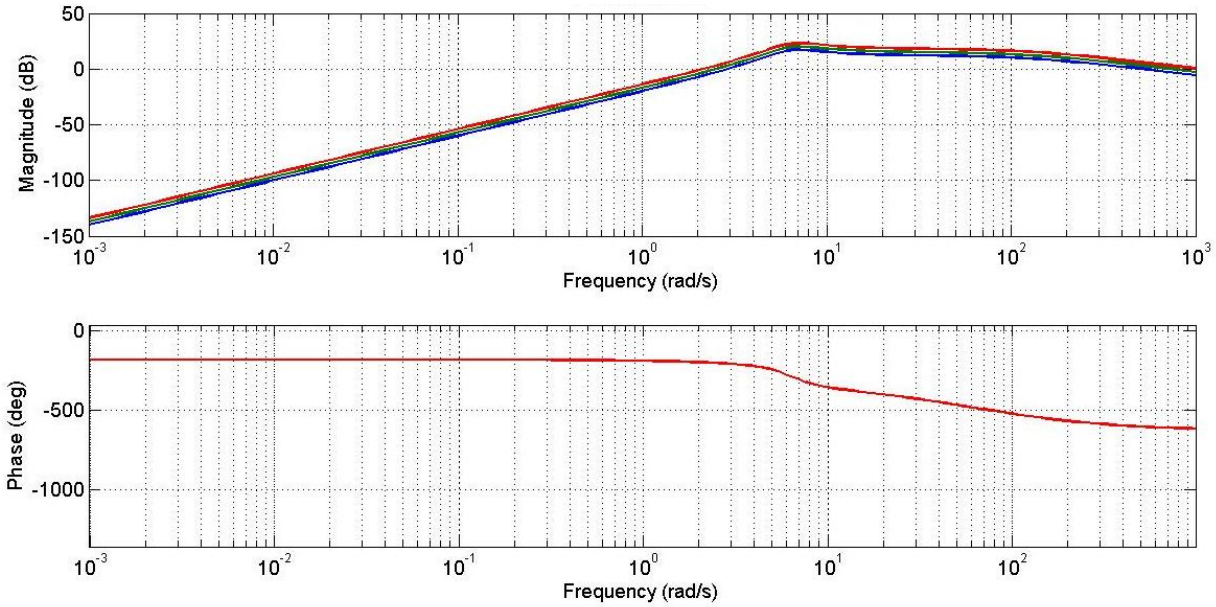


Figure 109 : Diagramme de Bode du procédé $H_{11}(s)$ pour une masse M de 50, 70 et 100kg, respectivement en bleu, vert et rouge

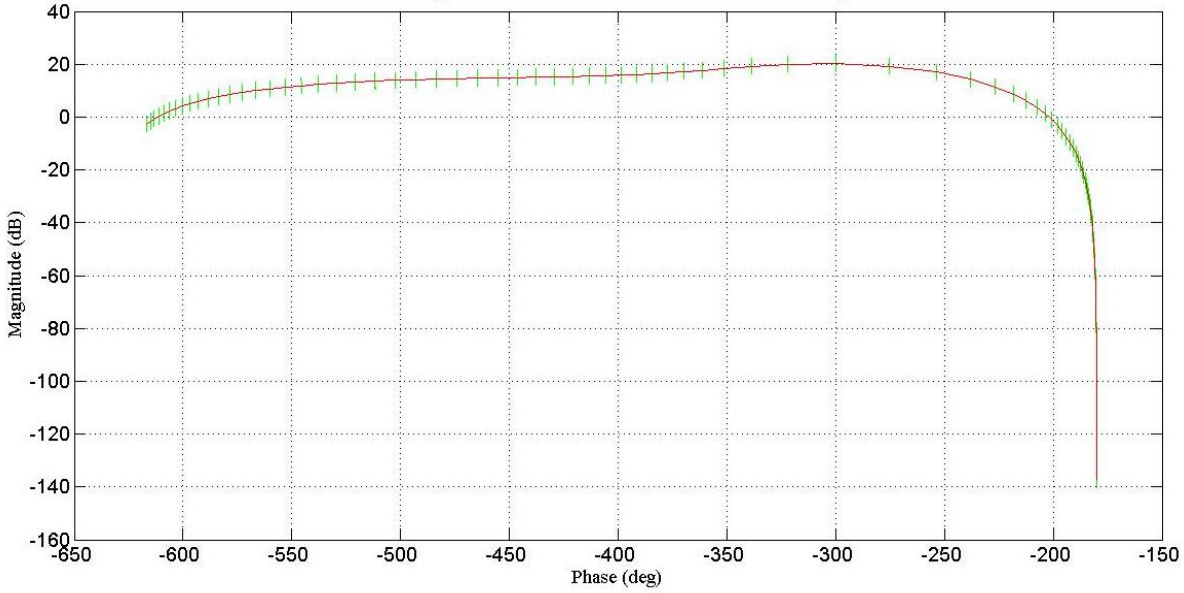


Figure 110 : Diagramme de Nichols du procédé $H_{11}(s)$ nominal (en rouge) et ses domaines d'incertitude (en vert)

Pour $\omega = 20$ rad/s, l'incertitude de la réponse fréquentielle du système $H_{11}(s)$ est de 6.0dB pour le gain et de 0.003° pour la phase. La fréquence de coupure en boucle ouverte peut varier de 15 à 27rad/s. Dans cet intervalle, la variation de la phase du procédé variant de 52°, la première génération de la méthode CRONE ne peut être utilisée. Le procédé ayant un zéro à partie réelle positive (résultant de l'approximation de Padé du retard dans le sous-système hexapode),

la seconde génération de la méthode CRONE ne peut non plus être utilisée. La troisième génération de l'approche CRONE est donc utilisée (Lanusse, *et al.*, 2000). Son principe repose sur : la paramétrisation de la fonction de transfert en boucle ouverte nominale à l'aide, notamment d'un ordre complexe d'intégration ; l'optimisation de ces paramètres en tenant compte de l'ensemble des réponses fréquentielles possible du procédé et afin d'obtenir une commande à la fois robuste et performante ; la synthèse d'un régulateur rationnel résultant du rapport entre les réponses fréquentielles de la fonction de transfert en boucle ouverte nominale optimisée et du procédé nominal. La robustesse du degré de stabilité permet de s'assurer que le système en boucle fermé reste stable malgré les variations du comportement des éléments de ce système. La robustesse en performance permet de vérifier que la performance du système bouclé est elle aussi conservée en cas de variations de comportement de ses éléments.

La fonction de transfert en boucle ouverte dont les paramètres sont à optimiser est de la forme :

$$\beta_0(s) = K\left(\frac{\omega_{-N^-}}{s}+1\right)^{n_l}\prod_{k=-N^-}^{N^+}\left[\left(\frac{1+s/\omega_{k+1}}{1+s/\omega_k}\right)^{a_k}\left(\Re e_{/\mathrm{i}}\left\{\left(\alpha_k\frac{1+s/\omega_{k+1}}{1+s/\omega_k}\right)^{\mathrm{i}b_k}\right\}\right)^{-q_k\,\mathrm{sign}(b_k)}\right]\frac{G_0^*(s)}{\left(1+s/\omega_{N^++1}\right)^{n_h}} \tag{4.13}$$

K est un gain, n_l et n_h sont respectivement les ordres basse et haute fréquences, l'ensemble des pulsations de transition ω_k délimitent un ensemble de N^-+N^++1 comportements fréquentiels appelés « gabarits » et $G_0^*(s)$ comporte l'ensemble des éléments du procédé nominal que le régulateur ne doit pas compenser (retard, pôles et zéros à partie réelle positive, etc.)

Le procédé comportant une double dérivation et le régulateur devant être de gain unitaire constant en basse fréquence, l'ordre n_l est fixé à -2. Le procédé ayant un ordre relatif de 1 en haute fréquence, $G_0^*(s)$ comportant le zéro à partie réelle positive correspondant au retard présent dans le procédé nominal $H_{011}(s)$, l'ordre n_h est fixé à 3 afin d'obtenir un régulateur strictement propre. $N^-=N^+=0$ semble être suffisant pour résoudre le problème dans cet exemple. Ainsi, la fonction de transfert en boucle ouverte nominale dont les paramètres doivent être optimisés est la suivante :

$$\beta_{011}(s) = K\left(1+\frac{\omega_0}{s}\right)^{-2}\left(\frac{1+\dfrac{s}{\omega_1}}{1+\dfrac{s}{\omega_0}}\right)^{a_0}\left(\Re e_{/\mathrm{i}}\left\{\left(\alpha_0\frac{1+s/\omega_1}{1+s/\omega_0}\right)^{\mathrm{i}b_{q0}}\right\}\right)^{-q_0\,\mathrm{sign}(b_{q0})}\frac{\left(1-\dfrac{s}{50}\right)}{\left(1+\dfrac{s}{\omega_1}\right)^3} \tag{4.14}$$

L'objectif principal du calcul des paramètres du régulateur est d'amener un gain de 1 tout en assurant la stabilité en boucle fermée. Cinq paramètres sont optimisés : M_r, ω_r, Y_r, ω_0 et ω_1. M_r et ω_r définissent le pic et la pulsation de résonnance de la fonction de sensibilité

complémentaire $T_{11}(s) = K_{11}(s)H_{11}(s)/(1+K_{11}(s)H_{11}(s))$. Y_r est l'ordonnée du point de tangence du lieu de Nichols de $\beta_{011}(j\omega)$ au contour d'amplitude M_r. ω_0 et ω_1 définissent respectivement la fin du comportement basse fréquence et le début du comportement haute fréquence de $\beta_{011}(j\omega)$. Les valeurs des paramètres optimisés sont : M_r = -2dB, ω_r = 15rad/s, Y_r = -1dB, ω_0 = 15rad/s et ω_1 = 40rad/s.

La Figure 111 montre la boucle ouverte dans le plan de Nichols. La réponse fréquentielle en boucle ouverte du système tangente le contour M_r = -2 dB tout en plaçant les domaines incertains aussi loin que possible de la zone de faible degré de stabilité entourant le point critique.

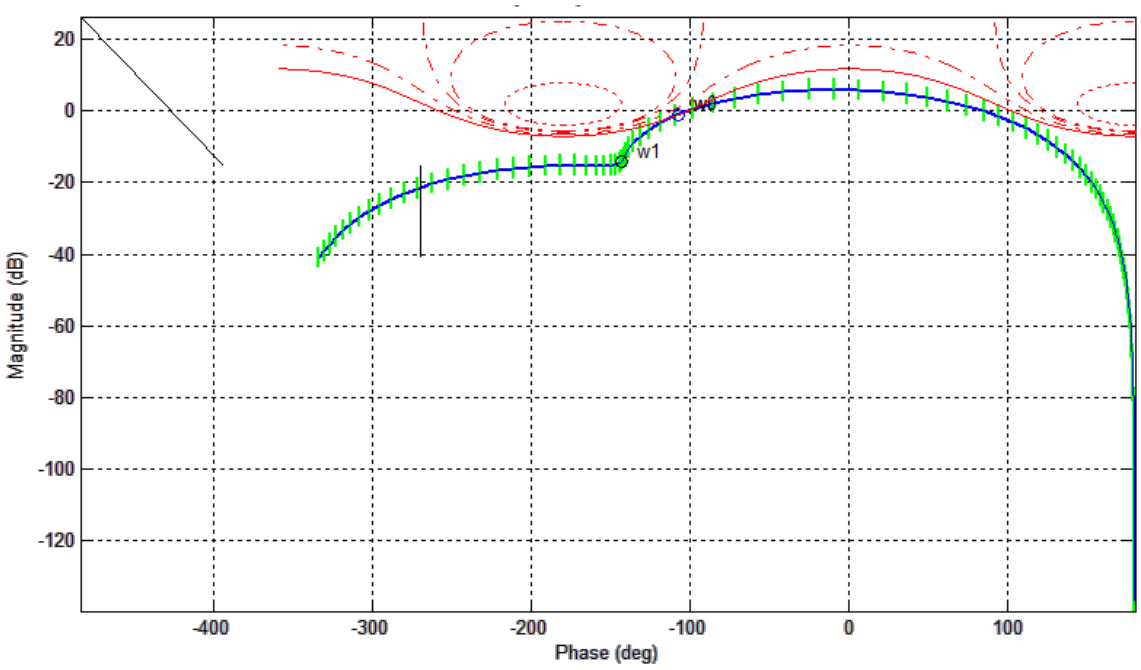


Figure 111 : Diagramme de Nichols de la fonction de transfert en boucle ouverte nominale $\beta_{011}(j\omega)$ (en bleu) et domaines d'incertitude (en vert).

La Figure 112 illustre les fonctions de sensibilité du système : $T_{11}(s)$, $S_{11}(s) = 1/(1+K_{11}(s)H_{11}(s))$, $CS_{11}(s) = K_{11}(s)/(1+K_{11}(s)H_{11}(s))$ et $GS_{11}(s) = H_{11}(s)/(1+K_{11}(s)H_{11}(s))$. On peut notamment remarquer que les pics de résonance des fonctions de sensibilité $T_{11}(s)$ et $S_{11}(s)$, restent modérés quel que soit l'état paramétrique du procédé ce qui permet de garantir un amortissement satisfaisant des phénomènes transitoires en boucle fermé.

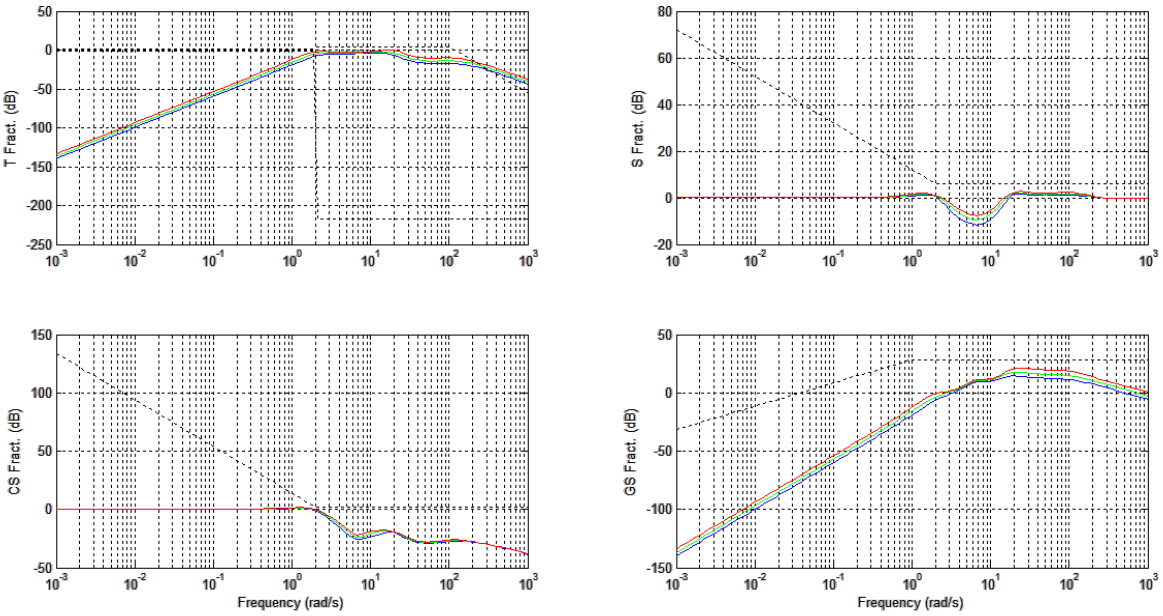


Figure 112 : Fonctions de sensibilité en boucle fermée nominales (en vert) et aux extrémités (en rouge et en bleu), contraintes du domaine (---)

La même procédure est utilisée pour définir le régulateur CRONE pour le transfert $H_{22}(s)$. La Figure 113 présente le lieu de Nichols des fonctions de transfert nominales pour les 2 boucles de commande. La mise en forme des 2 boucles ouvertes permet bien d'assurer la stabilité en boucle fermée.

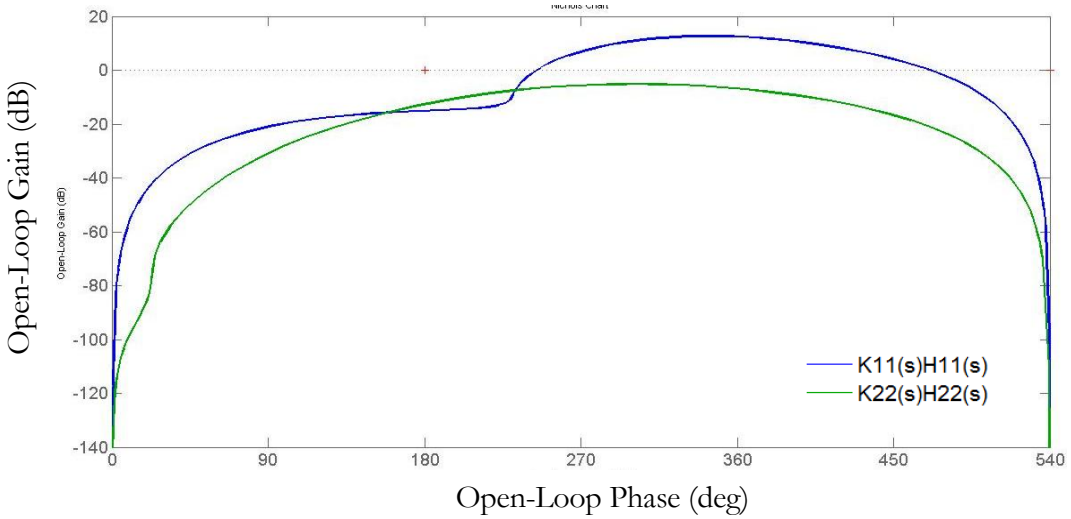


Figure 113 : diagramme de Nichols pour chaque élément diagonal du transfert $\mathbf{K}(s)\mathbf{H}(s)$

Les formes rationnelles des éléments du régulateur sont synthétisées à partir de l'identification du rapport des réponses fréquentielles de la fonction de transfert en boucle ouverte nominale optimisée et du procédé nominal, soit :

$$K_{R11}(j\omega)=\frac{\beta_{011}(j\omega)}{H_{011}(j\omega)} \quad \text{et} \quad K_{R22}(j\omega)=\frac{\beta_{022}(j\omega)}{H_{022}(j\omega)}. \tag{4.15}$$

La Figure 114 présente les diagrammes de Bode de $K_{R11}(s)$ et $K_{R22}(s)$ synthétisés. On peut remarquer que, comme désiré, le gain de ces deux filtres est unitaire en basse fréquence. Utilisant ces régulateurs, la Figure 115 décrit l'évolution de la boucle ouverte dans le plan de Nichols en fonction de l'évolution de la masse du surfeur utilisant l'hexapode. Plus la masse du surfeur augmente, plus les effets inertiels (gain de la boucle de retour) augmentent et plus le système tend à devenir instable (rapprochement du point critique). On note malgré tout que les deux régulateurs robustes obtenus maintiennent les réponses fréquentielles suffisamment éloignées du point critique.

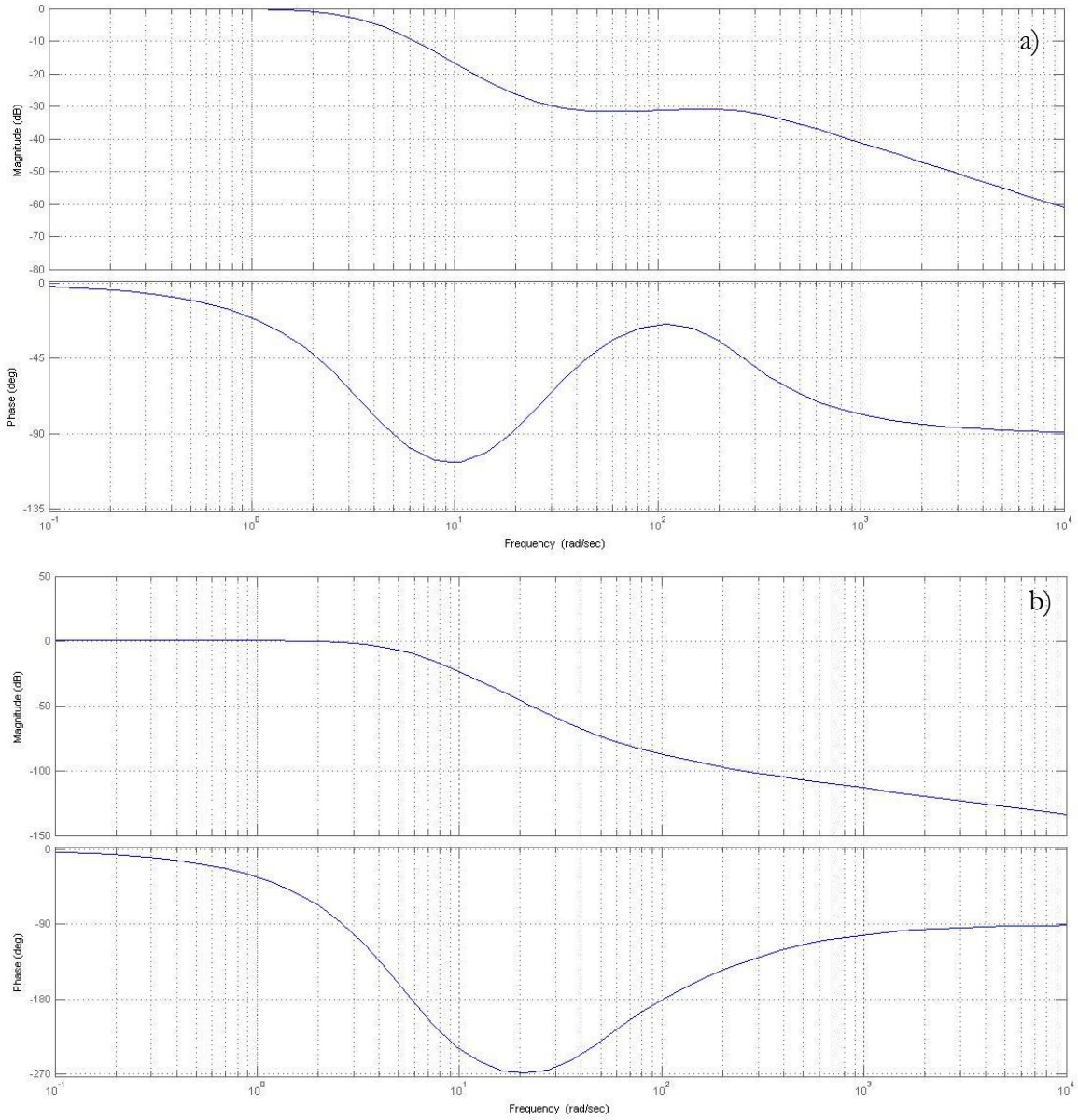


Figure 114 : Diagrammes de Bode de $K_{R11}(s)$ (a) et $K_{R22}(s)$ (b) synthétisés

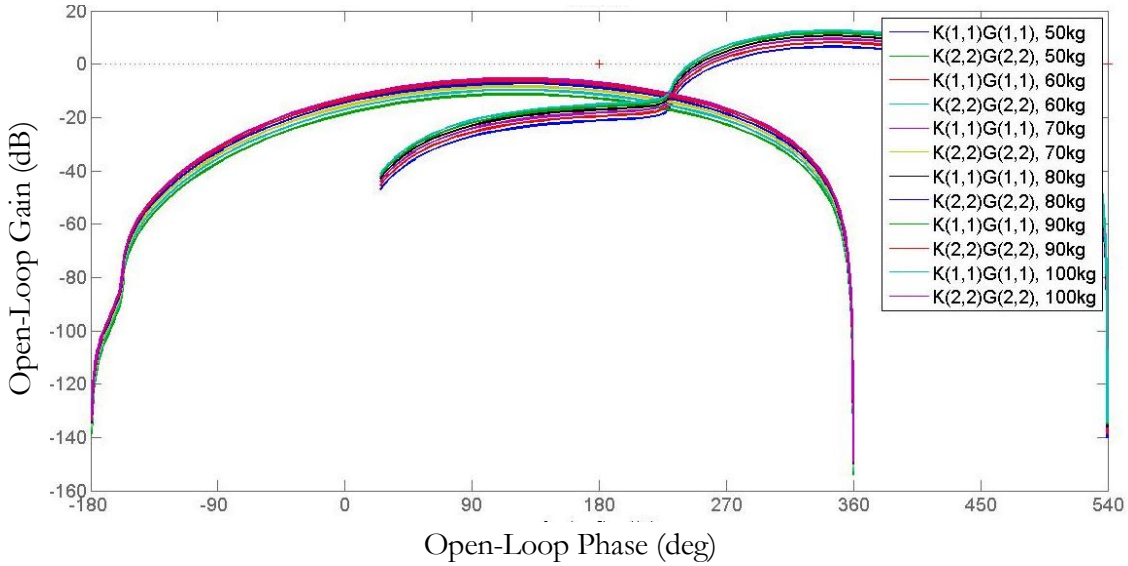


Figure 115 : Evolution de la stabilité du système lors de variation de la masse du surfeur

3.2.3 Prise en compte du couplage résiduel de l'hexapode

Le modèle **G**(*s*) représente le modèle dynamique de l'hexapode et contient une boucle interne de régulation en position (cf Chapitre 4 Partie 1.1). Il est nécessaire d'analyser l'impact d'un éventuel couplage résiduel en considérant ce modèle comme étant non-diagonal. Les éléments non-diagonaux du modèle dynamique de l'hexapode sont considérés de la forme :

$$\mathbf{G_2}(s) = \begin{bmatrix} \frac{G_0}{1+0.0078s} e^{-0.04s} & \frac{G_0}{1+0.0078s} e^{-0.04s} \frac{s}{120+s} \\ \frac{G_0}{1+0.0078s} e^{-0.04s} \frac{s}{120+s} & \frac{G_0}{1+0.0078s} e^{-0.04s} \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

Les termes non diagonaux de $\mathbf{G_2}$ ont été définis en considérant que la boucle interne de positionnement de l'hexapode n'est plus efficace à partir d'une pulsation de 120 rad/s. En deçà de 120 rad/s la boucle est totalement découplante. Au delà de 120 rad/s le découplage n'est plus assuré. Les valeurs singulières de $(\mathbf{I}+\mathbf{K}(s)\mathbf{H}(s))^{-1}$ en considérant le nouveau modèle dynamique de l'hexapode **G2**(*s*) sont présentées par la Figure 116.

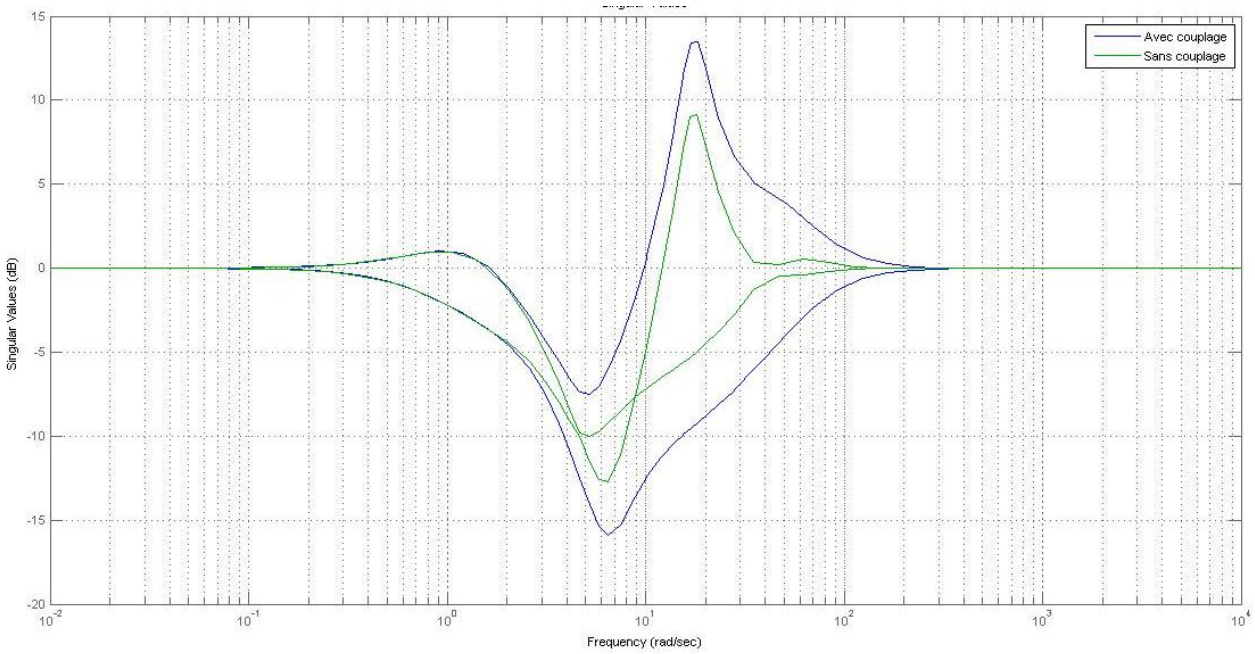


Figure 116 : Valeurs singulières de $(\mathbf{I}+\mathbf{K}(s)\mathbf{H}(s))^{-1}$

Le maximum des valeurs singulières augmentant peu, et n'ayant aucune influence aux fréquences voisines du premier mode de résonnance (environ 1 rad/s), le couplage résiduel de l'hexapode ne remet pas en cause la stabilité du système en boucle fermée. Aussi, on peut considérer que des simulations temporelles telles que nous allons les réaliser sans tenir compte de ce couplage résiduel restent réalistes.

3.2.4 Simulation des réponses temporelles du système de commande

Le régulateur CRONE $\mathbf{K}(s)$ peut être intégré au simulateur numérique en utilisant la modélisation par blocs suivante que présente la Figure 117.

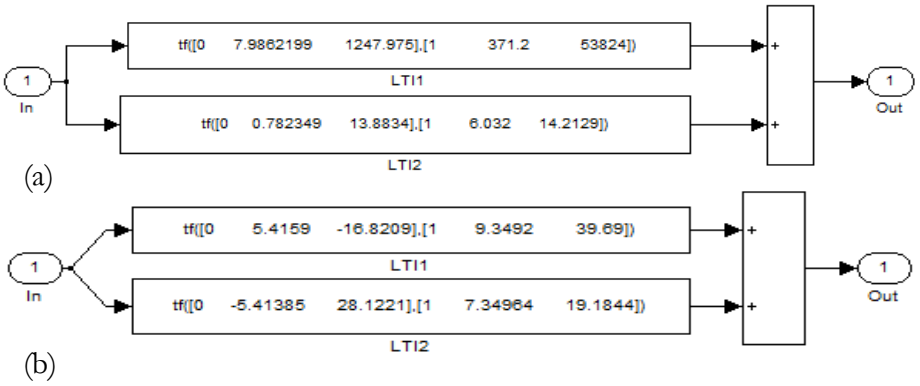


Figure 117 : Modélisation par blocs des éléments $K_{R11}(s)$ (a) et $K_{R22}(s)$ (b) régulateur CRONE diagonal [2x2] calculé respectivement pour $H_{11}(s)$ et $H_{22}(s)$

La Figure 118 et la Figure 119 illustrent un exemple de simulation numérique du schéma de commande global (Figure 108). Dans ce cas, la masse M du surfeur est de 50kg. La consigne

utilisateur correspond à des échelons de ±40Nm et ±200N respectivement pour M_x et F_z. α_x et α_y désignent le couple des positions angulaires de l'hexapode qui en résultent.

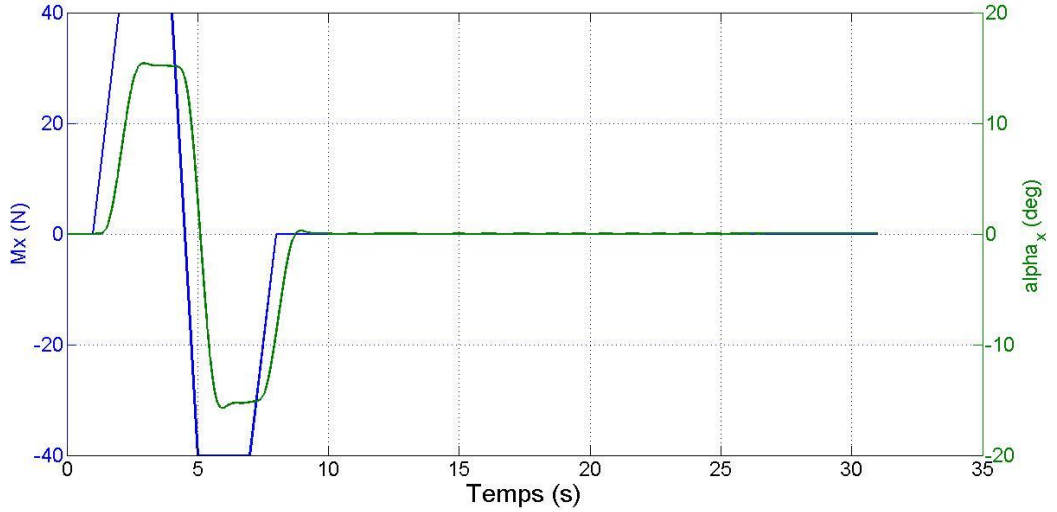


Figure 118 : Simulation numérique d'interactions entre l'appui M_x de l'utilisateur et la trajectoire angulaire de l'hexapode a_x

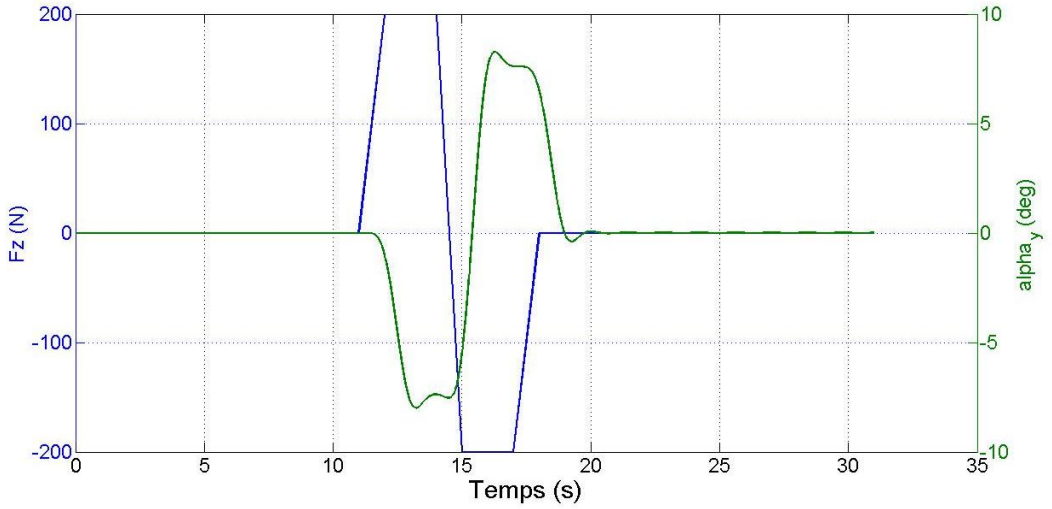


Figure 119 : Simulation numérique d'interactions entre l'appui F_z de l'utilisateur et la trajectoire angulaire de l'hexapode a_y

La Figure 118 permet également d'illustrer l'opposition de phase entre F_z et a_y apparue lors de l'identification du modèle $\mathbf{P}(s)$ réalisée à partir des données de la campagne expérimentale.

Une première analyse de la robustesse du système consiste à vérifier à la fois la robustesse en stabilité et également en performance pour différentes masse du surfeur. Si la Figure 115 illustre une tendance du système à se rapprocher de l'instabilité lorsque la masse du surfeur augmente, les performances du système ne semblent pas être impactées. En effet, pour des

masses de 50kg à 100kg, les Figure 120 et Figure 121 montrent l'évolution du comportement de l'hexapode en réponse aux appuis de l'utilisateur [M_x;F_z] correspondant toujours à des échelons de ±40Nm pour M_x et à des variations d'appui F_z de ±200N.

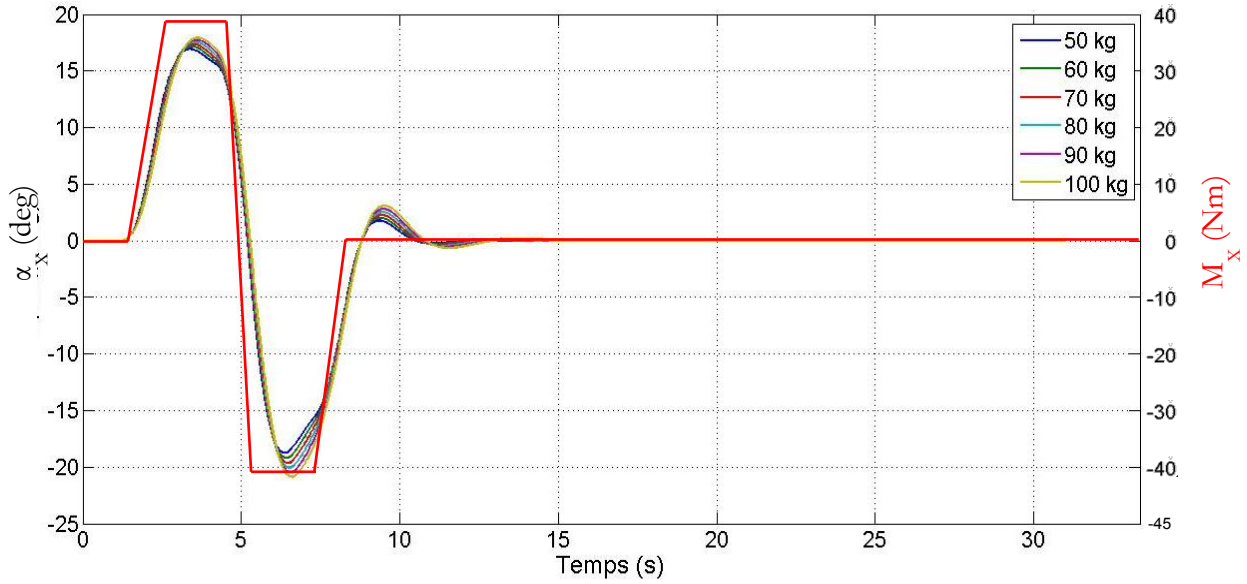


Figure 120 : Evolution des performances pour différentes masses du surfeur (illustrée pour la sortie a_x)

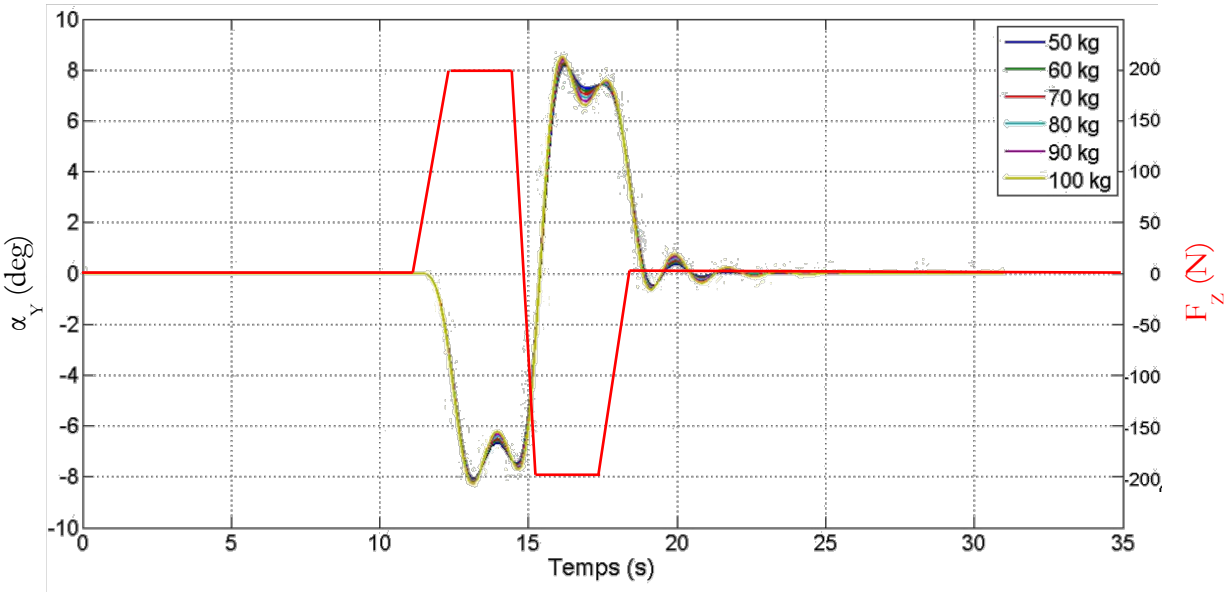


Figure 121 : Evolution des performances pour différentes masses du surfeur (illustrée pour la sortie a_y)

Les performances du système semblent robustes. Le comportement de l'hexapode reste stable pour l'ensemble de masses du surfeur considéré. Lors des rotations a_x et a_y du plateau de l'hexapode, une faible sensibilité à la masse est observée, les réponses restant toujours

convenablement amorties. La variation de la masse inertielle étant déterminée par simple division de la force d'appui F_z par la gravité, on constate que même si le régulateur n'a pas été synthétisé en tenant compte du caractère non stationnaire du système, il se révèle suffisamment robuste.

Les différentes simulations réalisées permettent de conclure que le régulateur synthétisé à l'aide de la méthodologie CRONE assure la robustesse du système avec les performances voulues et malgré la variation de la masse du surfeur.

4 Résultats expérimentaux de la simulation de surf en environnement contrôlé

Le modèle simplifié **P**(*s*) d'interactions entre le surfeur et l'hexapode a été identifié et validé. Un travail de simulation numérique a été réalisé pour synthétisé un régulateur permettant la mise en œuvre de la commande hybride externe de l'hexapode. L'objectif de cette partie est de présenter les résultats préliminaires de commande en temps réel de l'hexapode par un utilisateur (le surfeur) positionné sur le plateau mobile.

4.1 Trajectoires générées en laboratoire

Dans le cadre de notre approche, le protocole expérimental consiste en premier lieu à équiper l'utilisateur (harnais de sécurité) et à lui indiquer de se positionner sur la planche de surf préalablement fixée sur le plateau de l'hexapode (illustré Figure 97).

Le système de commande de l'hexapode est alors activé. Le système d'acquisition des efforts de la plateforme de forces est initialisé en prenant en compte la masse du surfeur positionné à l'équilibre. En parallèle, le système de mesure est enclenché, mesurant à une fréquence de 100Hz les composantes du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur l'hexapode et les composantes de la trajectoire du plateau mobile de l'hexapode. Le surfeur peut alors générer des variations d'appuis avec l'ensemble de son corps (jambes et haut du corps). Les variations dF_z et dM_x génèrent, en temps réel, la trajectoire de l'hexapode a_x et a_y.

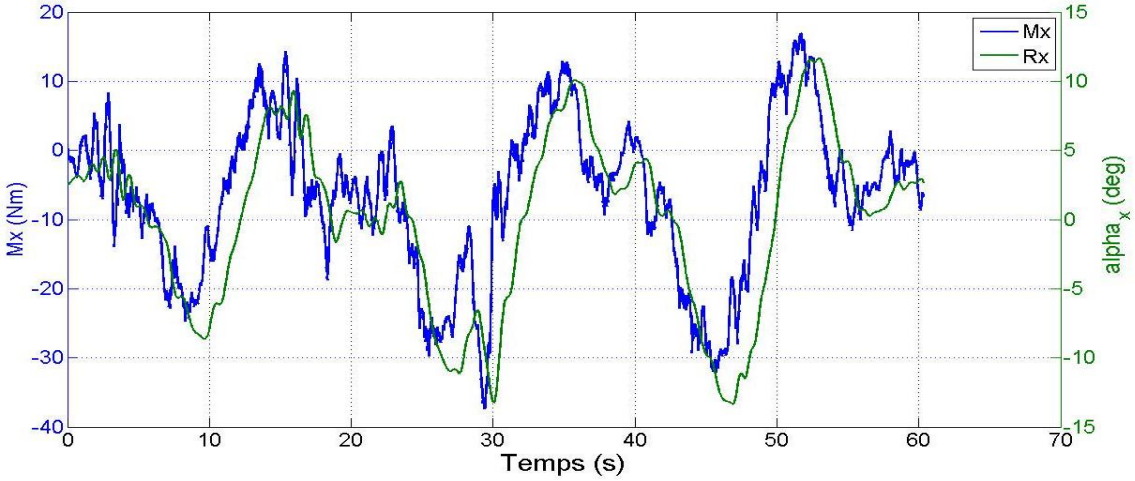


Figure 122 : Trajectoire angulaire a_x générée en temps réel par l'utilisateur

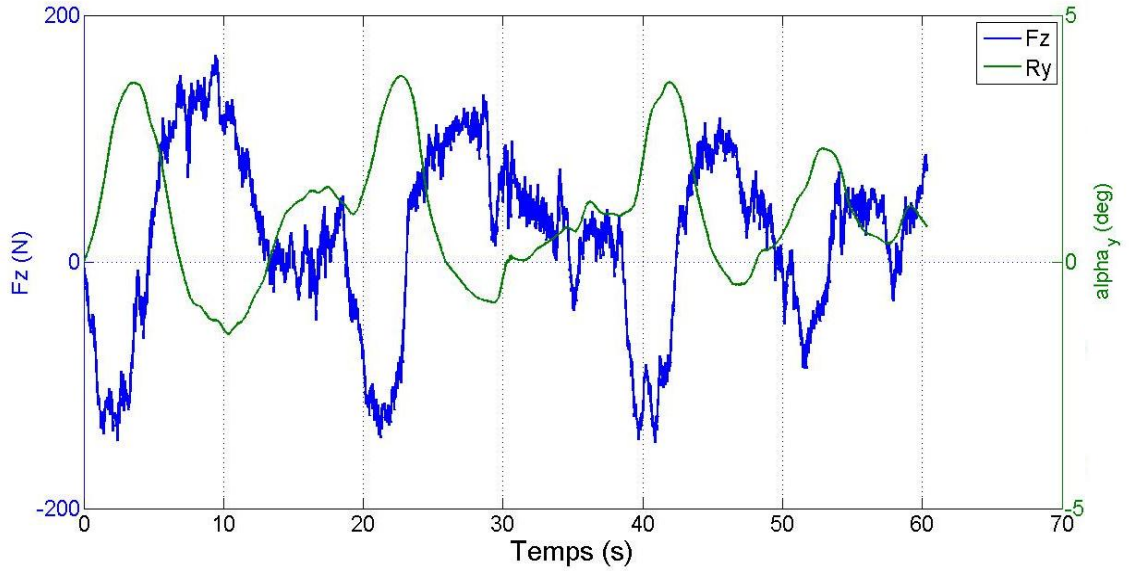


Figure 123 : Trajectoire angulaire a_y générée en temps réel par l'utilisateur

Les Figure 122 et Figure 123 illustrent les trajectoires générées par le surfeur positionné sur l'hexapode. La consigne donnée à l'utilisateur dans cet exemple était d'utiliser la projection mentale pour s'imaginer évoluer de face sur une vague et générer une prise de vitesse (cf Chapitre 2). Les résultats préliminaires ont permis d'évaluer un retard de 60ms entre la mesure du torseur d'actions mécaniques du surfeur sur la planche et le début du mouvement de l'hexapode. Il est alors intéressant de confronter ce retard au ressenti de l'utilisateur.

4.2 Ressenti du surfeur débutant VS celui du surfeur confirmé

Dans le cadre de la première campagne expérimentale de simulation de surf en environnement contrôlé sur l'hexapode, deux utilisateurs ont participé au protocole : un surfeur dit « débutant » et un surfeur dit « confirmé ». L'objectif est d'évaluer le ressenti quant aux interactions entre la génération de trajectoires et la réalisation effective de celle-ci. Trois principaux critères qualitatifs ont été considérés afin d'établir un retour utilisateur : la réactivité du simulateur, la position neutre d'équilibre et la capacité à se projeter dans un environnement autre que l'environnement laboratoire. Dans le cadre du protocole expérimental, il leur a été demandé de se projeter comme évoluant de face sur une vague et de générer des trajectoires libres pendant une minute (avec la possibilité de se tenir aux extrémités de la cage de sécurité si besoin). Après la première génération de trajectoires, chaque utilisateur a dû répondre au questionnaire présenté par le Tableau 9.

Tableau 9 : Questionnaire qualitatif de ressenti suite à une génération de trajectoires en temps réel sur le simulateur (pour le surfeur débutant et le surfeur confirmé)

	Pratiquant débutant	**Pratiquant confirmé**
Critère 1 : Réactivité du simulateur (évaluer de 1 à 5, 5 étant le plus réaliste possible)	5	4
Critère 2 : Capacité à trouver une position d'équilibre stable (évaluer de 1 à 5, 5 étant le plus stable)	1	5
Critère 3 : Capacité à se projeter dans l'environnement opérationnel d'un surfeur évoluant sur une vague (évaluer de 1 à 5, 5 étant le moins éloigné de la réalité)	1	2

D'après les résultats préliminaires d'évaluation qualitative du ressenti de l'utilisateur présenté Tableau 9, les critères 1 et 3 semblent indépendants du niveau du pratiquant. En première approximation, il semble donc que le retard mesuré entre la génération de trajectoires et la réalisation effective de celle-ci ne soit pas significatif pour l'utilisateur.

Le critère 2 est quant à lui très contrasté et semble directement dépendant du niveau du pratiquant. Le surfeur débutant ne semble pas en mesure de trouver une position stable sur l'hexapode. Un questionnement plus détaillé et une analyse vidéo de la génération de trajectoires de cet utilisateur montrera en effet son incapacité à positionner le plateau mobile de l'hexapode en position neutre « à plat ». La composante du vecteur trajectoire de l'hexapode (T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z) la plus difficile à stabiliser pour cet utilisateur est la rotation R_x autour de l'axe longitudinal de la planche de surf. Cette difficulté est directement liée au modèle mathématique définissant l'interaction entre le moment M_x selon l'axe longitudinal de la planche et le mouvement de rotation R_x de la planche. Chaque appui de la pointe ou du talon du pied avant de l'utilisateur entrainant la planche dans un mouvement de rotation autour de l'axe *x*. Si le surfeur confirmé est habitué à contrôler la trajectoire de sa planche principalement grâce à son appui du pied avant, le pratiquant débutant quant à lui ne parvient pas à trouver cette stabilité. La réactivité de l'hexapode est cohérente avec les sensations et ressentis du surfeur confirmé mais n'est pas en adéquation avec la capacité d'un novice à interagir avec sa planche. Ainsi, cette première évaluation qualitative permet de définir un premier critère d'ajustement utilisateur-dépendant du modèle prédictif défini dans le système de commande de l'hexapode. Ce critère permet d'ajuster le modèle en fonction principalement du niveau de l'utilisateur. Il doit permettre de réduire le gain de la fonction de transfert $P_{11}(s)$ tout en gardant la stabilité de la boucle de commande (déterminé grâce à la simulation numérique cf 3.2.2 du chapitre 4).

4.3 Couplage avec un modèle de réalité virtuelle

Au vu de la difficulté du surfeur placé sur le simulateur à se projeter dans l'environnement opérationnel d'un surfeur évoluant sur une vague, le couplage avec un modèle de réalité virtuelle a été nécessaire. Cette étape de validation permet d'immerger pleinement le surfeur dans son environnement. La Figure 124 illustre la mise en situation du simulateur couplé à la réalité virtuelle. Le traitement en temps réel du comportement du surfeur placé sur l'hexapode ne change pas. Cependant, les coordonnées permettant de définir en temps réel la position du plateau mobile de l'hexapode sont également transmises au système de réalité virtuelle. Le système utilisé dans le cadre de ce démonstrateur est le jeu de sports de glisse Youriding (Youriding, 2016). Ce système de réalité virtuelle reproduit un monde à 360° dans lequel une vague déroule et dans lequel l'utilisateur est immergé sur une planche de surf. Le système est totalement immersif et la planche de surf virtuelle est synchronisée avec la planche du simulateur. Enfin la technologie de l'Oculus Rift permet la spatialisation en 3D (Oculus, 2016) c'est-à-dire le transfert des données du système de réalité virtuelle au travers d'un masque porté par l'utilisateur (Figure 125).

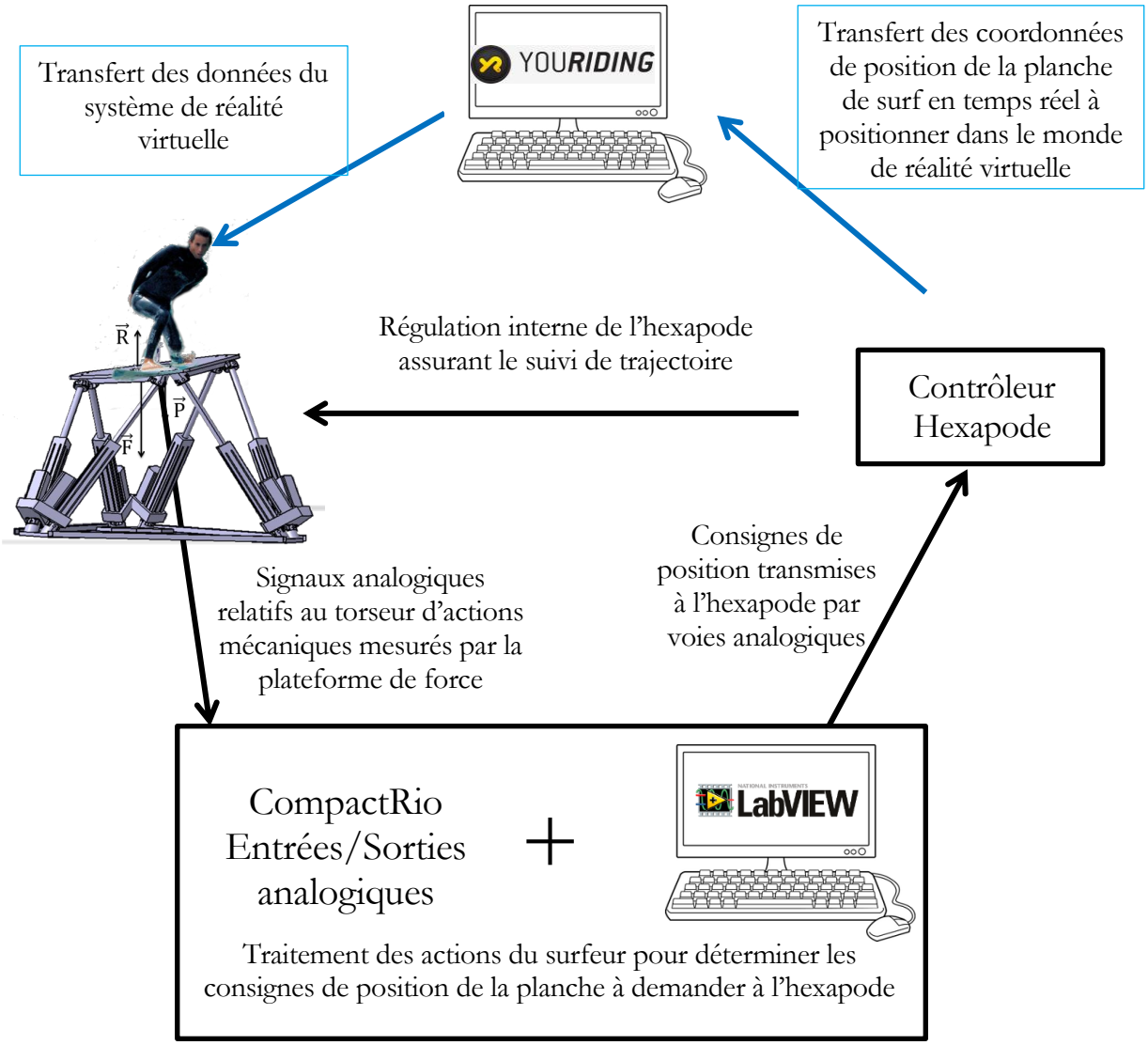


Figure 124 : Schéma de mise en place du simulateur couplé à la réalité virtuelle



Figure 125 : Système de réalité virtuelle utilisé

La Figure 126 illustre le simulateur en état de fonctionnement. L'utilisateur contrôle la trajectoire de la planche de surf grâce à ses appuis en fonction de la vague qu'il est en train de surfer et qu'il visualise grâce au système de réalité virtuelle. Cela correspond au premier démonstrateur fonctionnel et autonome du projet SIMUSURF.

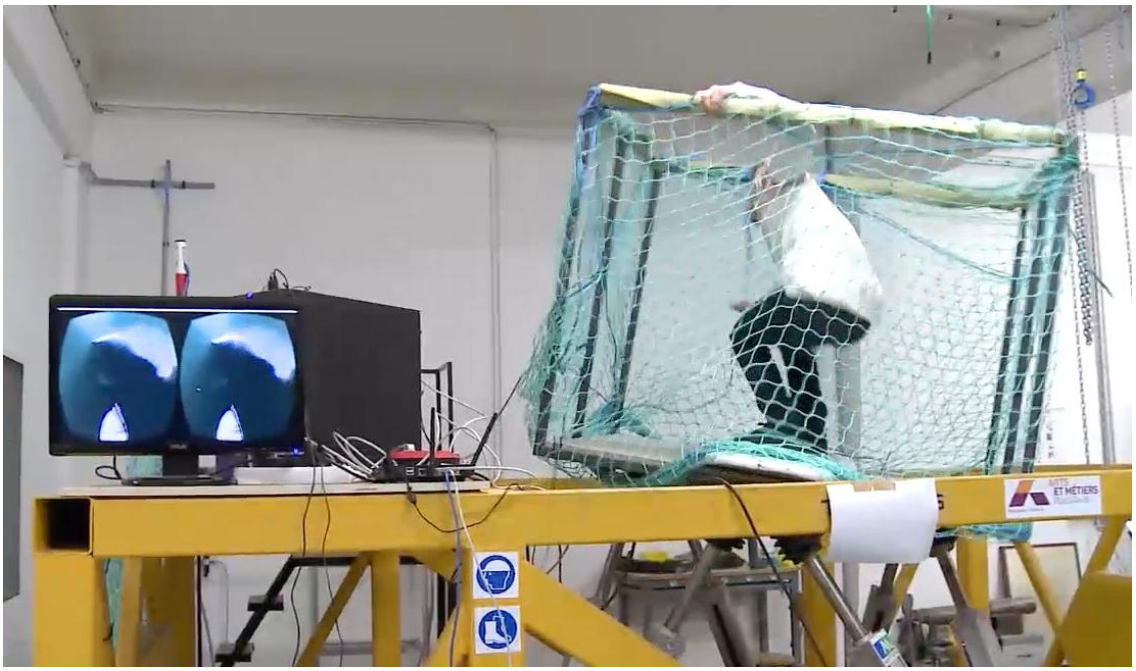


Figure 126 : Démonstrateur fonctionnel en environnement contrôlé

Approche utilisée pour implanter une loi de commande réaliste et robuste dans le simulateur

L'intégration dans l'hexapode d'un modèle simplifié d'interactions surfeur/planche/vague a ainsi permis de mettre en œuvre une approche de commande multivariable efficace tout en optimisant le pilotage de la machine pour atteindre les trajectoires désirées générées par le surfeur. En effet, ce travail a permis de synthétiser des lois de commande à la fois performantes et robustes, c'est-à-dire résistant à une connaissance imparfaite du système commandé. Après de fructueux développements et applications numériques pour analyser le modèle global $W(s)$ et son niveau de couplage, nous avons identifié et proposé un modèle simplifié réaliste d'interactions. Puis nous avons utilisé l'approche CRONE pour synthétiser un régulateur assurant la robustesse du système de commande. Enfin nous avons utilisé un environnement adapté à la simulation de surf (planche et réalité virtuelle) pour proposer des résultats préliminaires à propos de la simulation de surf en environnement contrôlé.

SIMULATION DE TRAJECTOIRES COMPLEXES A L'AIDE D'UN HEXAPODE DE MOUVEMENT : APPLICATION AUX SPORTS DE GLISSE

Le projet SIMUSURF visant à la conception d'un simulateur réaliste de surf a été abordé sous deux principaux aspects : d'un point de vue instrumentation et acquisition et d'un point de vue mécanique et robotique.

En effet, la simulation en environnement contrôlé des trajectoires correspondant aux mouvements sur l'eau de l'ensemble {surfeur+planche} a nécessité la constitution d'une base de données expérimentales. Pour ces mesures *in situ* l'instrumentation d'une planche de surf a été réalisée et une première base de données a été construite. Les perspectives à propos de ces avancées en matière d'instrumentation de planche de surf résident principalement dans la miniaturisation de l'ensemble des réseaux de capteurs. L'objectif est de réduire l'encombrement de l'instrumentation et de la rendre intégrable sur l'ensemble des types de matériels utilisés par les surfeurs. Un brevet a par ailleurs été déposé le 19 Juin 2015 quant à une activité inventive visant à optimiser l'instrumentation d'une planche de surf issue de nos travaux de recherche. La base de données d'interactions surfeur/planche/vague pourra ainsi être mise à jour au fur et à mesure de campagnes expérimentales menées avec différents utilisateurs.

De plus, dans le cadre du projet SIMUSURF, il a été nécessaire d'optimiser le pilotage d'un hexapode de mouvement pour atteindre et reproduire les trajectoires désirées à imposer dans le cas particulier d'un pilotage en effort d'un surfeur positionné sur le robot. Une commande robuste, basée sur la méthodologie CRONE, du modèle de l'hexapode a été synthétisée pour en asservir l'attitude, puis les efforts reproduits. Le caractère incertain de la position et des réactions du surfeur porté par l'hexapode a été particulièrement considéré.
Un premier modèle expérimental d'interactions surfeur/planche/vague a été intégré à l'hexapode et une comparaison avec les mesures *in situ* a été effectuée. Le surfeur ayant participé à l'acquisition des données réelles a participé à la validation des mouvements recréés en laboratoire et les performances de robustesse (résistance à la variabilité des effets produits par le surfeur) ont été vérifiées. L'évolution de la construction du modèle expérimental d'interactions surfeur/vague pourra être basée sur la prise en compte d'un plus grand nombre de paramètres issus de la base de données.

Pour valider le travail réalisé lors de ce projet, le simulateur a été couplé à un système de réalité virtuel. Le démonstrateur ainsi mis en place est le premier outil hyperréaliste de simulation de surf et de trajectoires complexes en temps réel. La réalité virtuelle permet en effet de reproduire l'ensemble des sensations continues (vitesse et déplacement) tandis que le robot permet à l'utilisateur d'interagir directement sur le simulateur grâce au comportement de son corps. L'ensemble des variations relatives de position et des accélérations peuvent alors être

reproduites et ressenties par le surfeur. Enfin, lors de la conception d'un simulateur, la notion de mouvement et de perception de mouvement propre induisent la nécessité de mettre en place des algorithmes de restitution inertielle (ARI). Dans le cadre de l'évolution du simulateur, une perspective concerne donc l'intégration de ces algorithmes dans le système de commande du robot. En effet, la mise en place de ces algorithmes permettra d'augmenter et de préciser le ressenti utilisateur. Sur le plan de la glisse, le simulateur ainsi évolué pourra constituer un outil d'apprentissage pour les débutants ou d'entrainements pour les professionnels et permettra de faciliter l'accessibilité aux sports de glisse. Dans ce sens, un jeu de revendications couvert par le brevet déposé traite d'un dispositif de simulation du surf et plus largement des sports de glisse grâce à un hexapode commandé en temps réel par les appuis d'un utilisateur.

Enfin, en ce qui concerne les verrous scientifiques levés sur le plan de la génération de trajectoires complexes en effort et en temps réel, les perspectives d'utilisation sont vastes et variées. L'utilisation de l'outil proposé et sa stratégie de commande correspondante va principalement permettre de travailler avec des trajectoires et sollicitations non plus imposées mais qui vont pouvoir varier au cours du temps en fonction de l'environnement et selon un modèle de comportement prédéterminé.

Sur le plan de l'architecture mécanique de l'hexapode, des travaux sont actuellement en cours pour proposer une machine parallèle adaptée spécialement à la simulation des sports de glisse. En effet, les résultats de nos recherches ont montré que l'ensemble des six degrés de liberté du plateau de l'hexapode ne sont pas nécessaires à la reproduction des sensations de glisse lors de l'évolution sur une vague. L'objectif est alors de pouvoir conserver et améliorer la stratégie de commande développée au Chapitre 4 tout en considérant une machine parallèle à trois degrés de liberté pour l'ensemble des rotations.

Ce projet de thèse pluridisciplinaire et très transversal alliant la robotique, la biomécanique, l'automatique, l'instrumentation en milieu sévère et la réalité virtuelle a permis d'aborder avec une approche novatrice la pratique des sports de glisse. La compréhension et la modélisation tout particulièrement des interactions entre un surfeur, sa planche et la vague représentent un point de départ quant aux futures évolutions et optimisations techniques de la pratique du surf.

Bibliographie

Andrew, D-P, Chow, J-W et Knudson, D-V. 2003. Effect of ball size on player reaction and racket acceleration during the tennis volley. *Journal of Science and Medicine in Sport.* 2003, Vol. 6(1), 102-112.

Arduino. 2016. Arduino. [En ligne] 2016. www.arduino.cc.

Attia, R, et al. 2012. Reference generation and control strategy for automated vehicle guidance. *Intelligent Vehicles Symposium.* 2012.

Augustin, J-P. 1994. *Surf Atlantique. les territoires de l'éphémère.* Talence : Edition de la Maison des Sciences de l'Homme d'Aquitaine, 1994.

Barrientos, A, et al. 1999. *Fundamentos de robotica.* s.l. : McGrowHill, 1999.

Berthoz, A et Droulez, J. 1980. Tutorial on linear motion perception. *Laboratoire de physiologie neurosensorielle du CNRS.* 1980.

Besser, M, Kowalk, D et Vaughan, C. 1993. Mounting and calibration of stairs on piezoelectric force platforms. *Gait Posture.* 1993.

Bishop Museum Archive. *Sketch of the Polynesians wave riding.* Bishop Museum Archive, s.l. : s.n.

Blake, Tom. 1929. *Tom Blake in Waikii Beach.*

Boucher, M. 2005. Limites et précision d'une analyse mécanique de la performance sur ergocycle instrumenté. *Thèse de doctora.* Université de Poitiers, 2005.

CHUZEL, Y. 2009. Caractérisation exprimentale et simulation numérique d'impacts de glaçe à haute vitesse. *Thèse de doctorat.* INSA de Lyon, 2009.

Dagdelen, M. 2005. *Restitution des stimuli inertiels en simulation de conduite.* s.l. : Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005.

Dauchez, P, Fraisse, P et Pierrot, F. 2005. A Vision/Position/Force Control Approach for Performing Assembly Tasks with a Humanoid Robot. *Humanoids'05.* 2005.

Delacroix, S. 2014. *Evaluation des effets cinématiques et dynamiques induits par le port d'orthèses plantaires lors de la marche. Thèse de doctorat.* Lyon : Université Claude Bernard, 2014.

Denoual, T. 2012. Contribution à l'objectivation des prestations dynamiques sur simulateur de conduite. *Thèse de doctorat, Ecole centrale de Nantes.* 2012.

Dickson. 2013. Fiche technique Seaguard Flex. *Dickson Constant.* [En ligne] 19 12 2013. www.dickson-constant.com/fr/FR/equipement-des-bateaux/seaguard-flex.

Elloumi, H. 2006. *Commande des plates-formes avancées de simulation de conduite. Thèse de doctorat.* s.l. : Ecole des mines de Paris, 2006.

Etel Motion Technologie. 2011. *AccurET Modular Operation & Software Manual.* 2011.

Gibson, J-J. 1954. The visual perception of objective motion and subjective movement. *Psychological Review.* 1954, Vol. 61, 5.

GoPro. 2016. GoPro. *GoPro.* [En ligne] 2016. www.gopro.com.

Gough, V.E. et Whitehall, S.G. 1962. Universal type test machine. *Proceedings of the FISITA Ninth International Technical Congress.* 1962.

Guérard, S, et al. 2014. Development of a new experimental device for tridimensional impacts - Results on foam core sandwich panels. *4th International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures.* 2014.

Hogan, N. 1985. Impedance control : an approach to manipulation. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control.* 1985.

Holthuijsen, L. 2007. *Waves in Oceanic and Coastal Waters.* Cambridge, UK : Cambridge university Press, 2007.

Lacome, M. 2013. *Analyse de la tâche et physiologie appliquée au rugby : étude de la fatigue associée à l'exercice maximal isométrique répété.* s.l. : Thèse de l'université de Lyon, 2013.

Lanusse, P, Malti, R et Melchior, P. 2013. Crone control system design toolbox for the control engineering community: tutorial and a case study. *Philosophical Transactions of the Royal Society A.* 2013, doi: 10.1098/rsta.2012.0149.

Lanusse, P, Oustaloup, A et Mathieu, B. 2000. Robust control of LTI square MIMO plants using two CRONE control design approaches. *Proceedings of the IFAC ROCOND.* 2000.

Lepoutre, J-P. 2007. Modélisation biomécanique du mouvement : vers un outil d'évaluation pour l'instrumentation en orthopédie . *Thèse de doctorat.* Université du Sud Toulon - Var, 2007.

Lundgren, L, et al. 2015. Relevance, reliability and limitations of a drop and stick landing analysis. *33rd International Conference on Bioechanics in Sports.* 2015.

Lundgren, L, Tran, T-T et Dunn, M. 2014. Analysis of manoeuvres and scoring in competitive surfing. *International Journal of Sports Science and Coaching.* 2014, Vol. 9, 4.

Merlet, J-P. 1998. *Determination of the presence of singularities in 6d workspace of a gough parallel manipulator.* s.l. : ARK, 1998.

Merlet, J-P. 1997. *Les robots parallèles.* s.l. : Hermès, 2ème édition revue et augmentée, 1997.

Merlet, J-P. 2000. Parallel Robots. *Solid mechanics and its applications.* Kluwer Academic Publishers, 2000, Vol. 74.

Merlet, J-P. 2005. *Parallel Robots, 2nd Edition.* s.l. : Springer, Heidelberg, 2005.
Merlet, J-P. 2004. Solving the forward kinematics of a gough–type parallel manipulator with interval analysis. *International Journal of Robotics Research.* 2004, Vol. 3, 23.

Monnet, T, Lacouture, P et Colloud, F. 2010. *Analyse 3D du mouvement.* s.l. : Association Française de Mécanique, 2010. ISBN: 978-2-7466-2058-2.

Oculus. 2016. Oculus Rift. [En ligne] 2016. www.oculus.com.

Ombede, G. 1996. *Analyse de la compliance par répartition de puissance Robot-Environnement. Thèse de doctorat.* Lyon : Institut National des Sciences Appliquées, 1996.

Paccot et F. 2009. Contribution à la commande dynamique référencée capteurs de robots parallèles. *Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II.* 2009.

Parrish, R V et J, Martin D. 1976. Comparison of a linear and a non linear washout for motion simulator utilizing objective and subjective data from transport landing approach. *Rapport Technique, NASA.* 1976.

Parrish, R V, et al. 1975. Coordinated adaptive washout for motion simulators. *Journal of aircraft.* 1975, Vol. 12, 1.

Perdereau, V. 1991. *Contribution à la commande hybride force-position. Application à la coopération de deux robots.* Paris : Thèse de doctorat en Sciences Appliquées, 1991.

Prelle, C. 1997. *Contribution au contrôle de la compliance d'un bras de robot a actionnement electropneumatique. Thèse de doctorat.* s.l. : Laboratoire d'Automatique Industrielle de l'INSA de Lyon, 1997.

Renault. 2016. http://www.experts.renault.com/kemeny/projects/ultimate/accueil.html. [En ligne] 2016.

Reymond, G, et al. 2001. Role of lateral acceleration in curve driving: driver model and experiments on a real vehicle and a driving simulator. *Human Factors.* 2001, Vol. 43, 3.

Sabatier, J, et al. 2015. *Fractional Order Differentiation and Robust Control Design.* s.l. : Springer, 2015.

Salazar Garcia, M. 2009. Aide à la conception d'un robot hexapode hydraulique à haute vélocité. *Thèse de doctorat.* Ecole doctorale n°432 : Sciences des métiers de l'ingénieur, 2009.

Sato, N, Nunome, H et Ikegami, Y. 2014. Kinematic Analysis of Basic Rhythmic Movements of Hip-hop Dance: Motion Characteristics Common to Expert Dancers . *Journal of Applied Biomechanics.* 2014.

Schmidt, S F et Conrad, B. 1970. Motion Drive signals for piloted flight simulators. *Rapport technique, NASA.* 1970.

Sensix. 2016. Sensix. [En ligne] 2016. www.sensix.fr.

Siegler, I, et al. 2001. Sensorimotor integration in a driving simulator: contributions of motion cueing in elementary driving tasks. *Proceedings of the Driving Simulation Conference.* Sophia Antipolis (Nice), 2001.

Skogestad, S et Postlethwaite, I. 2005. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design.* s.l. : Chapter 3, 2005.

Taghirad, H. D. 2013. *Parallel Robots: Mechanics and Control.* s.l. : CRC Press, 2013.

Terrien, M, Colloud, F et Begon, M. 2012. Effect of stroke rate on paddle tip path in kayaking. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité.* 2012.

Tounsi, R, et al. 2011. Quasi-static and dynamic behavior of aluminum honeycomb under multiaxial load: numerical experiments. *3rd International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures.* 2011.

Tribord. 2016. La formation des vagues en surf. *www.tribord.tm.fr/conseils/la-formation-des-vagues-en-surf-a_16654.* [En ligne] 2016.

Valverde, Brittney. 2015. *Quiver of a professional surfer Evan Valiere.*

Van Brussel, H et De Schutter, J. 1988. Compliant robot motion II: a control approach based on external control loops. *International Journal of Robotics Research.* 1988.

Viot, P et Beani, F. 2003. Comportement de mousses polymères en compression dynamique . *Revue des Composites et des Matériaux Avancés.* 2003.

Vivas, O.A, Poignet, P et Pierrot, P. 2003. Predictive Functional Control for a Parallel Robot. *International Conference on Intelligent Robots and Systems.* 2003.

Volpe, R et Khosla, P. 1995. The equivalence of second-order impedance control and. *The International Journal of Robotics Research.* 1995, Vol. 14, 6.

Youriding. 2016. Youriding. *Youriding.* [En ligne] 2016. www.youriding.com.

Zhu, Y. 2001. *Multivariable System Identification For Process Control.* s.l. : Elsevier, 2001.

Zong, C. 2013. Système embarqué de capture et analyse du mouvement. *Thèse de doctorat.* Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 2013.

SIMULATION DE TRAJECTOIRES COMPLEXES A L'AIDE D'UN HEXAPODE DE MOUVEMENT – APPLICATION AUX SPORTS DE GLISSE

RESUME : Le projet SIMUSURF consiste en l'utilisation d'un robot hexapode de mouvement pour l'analyse de la réponse biomécanique d'un sujet positionné sur un plateau mobile et soumis à des mouvements de translation et/ou de rotation. L'étude concernant le développement d'un simulateur de surf (transposable aux autres sports de glisse par la suite) à partir de l'hexapode équipé d'une plateforme de forces a été abordée sous deux aspects.
- d'un point de vue instrumentation et acquisition, les mouvements de l'ensemble {surfeur + planche} sur l'eau a nécessité la constitution d'une base de données expérimentales permettant notamment d'identifier un modèle dynamique de comportement d'interactions entre le surfeur, sa planche et la vague.
- d'un point de vue mécanique et robotique, il a été indispensable d'optimiser le pilotage de cette machine (au total 6 vérins avec des vitesses potentielles de 5 m/s) pour atteindre les trajectoires désirées ou les efforts multiaxiaux à imposer dans le cas particulier d'un pilotage complexe en effort imposé par l'utilisateur.
Afin de reproduire les mouvements complexes et de dynamiques élevées d'une planche de surf sur une vague et soumis aux efforts du surfeur, les phénomènes de couplage dynamiques existants entre les actionneurs ont été étudiés. Une approche de commande multivariable efficace a été mise en œuvre : une approche CRONE permettant de synthétiser des lois de commande à la fois performantes et robustes, c'est-à-dire résistant à une connaissance imparfaite du système commandé.

Mots clés : Sollicitations dynamiques – pilotage complexe – analyse du mouvement

SIMULATION OF COMPLEX TRAJECTORIES USING A STEWART PLATFORM - APPLICATION TO RIDING SPORTS -

ABSTRACT : The project SIMUSURF consists in using an hexapod to analyze the biomechanical response of a human subject positioned on the moving platform of the hexapod and submitted to a translation and/or rotation movement. The development of a surfing simulator, using the hexapod equipped with multi-axis force plates has been approached from two aspects.
- From an instrumentation and acquisition point of view, simulation of the trajectories corresponding to the movements of the set {surfer + board} on the ocean required the constitution of an experimental database to identify such a behavioral dynamic model of the interactions between the surfer, his board and the wave.
- From a mechanical and robotics point of view, it was essential to optimize the control of the hexapode (a total of 6 actuators with the potential speed of 5 m/s) to reach the desired trajectory or multiaxial efforts to impose in the special case of a force complex command required by the user.
In order to reproduce the complex movements and high dynamic of a surfboard on a wave and submitted to the efforts of surfer. Existing dynamic coupling phenomena between actuators have been studied. Effective multivariable control approach has been implemented: CRONE approach synthesizing control laws both powerful and robust,that is resistant to imperfect knowledge of the controlled system.

Keywords : Dynamic solicitation - complex motion control - movement analysis



ARTS ET MÉTIERS ParisTech

ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY