

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GENIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE  
M. Ing.

PAR  
MOURAD BOUKHELIF

DÉVELOPPEMENT D'UN APPAREILLAGE EMBARQUÉ POUR LE  
MONITORAGE DES FORCES ET MOMENTS DE RÉACTION POUR LE  
SYSTÈME DE MESURE "SMARTWHEEL" DURANT LA PROPULSION  
MANUELLE EN FAUTEUIL ROULANT

MONTRÉAL, LE 22 MARS 2007

© Droits réservés de Mourad Boukhelif

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Rachid Aissaoui, directeur de mémoire  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Tony Wong, président du jury  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

M. Pascal Bigras, membre du jury  
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC  
LE 22 MARS 2007  
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

# **DÉVELOPPEMENT D'UN APPAREILLAGE EMBARQUÉ POUR LE MONITORAGE DES FORCES ET DES MOMENTS DE RÉACTION POUR LE SYSTÈME DE MESURE "SMARTWHEEL" DURANT LA PROPULSION MANUELLE EN FAUTEUIL**

Mourad Boukhelif

## **SOMMAIRE**

La propulsion en fauteuil roulant manuel (FRM) apporte une indépendance majeure pour les personnes ayant perdu l'usage de leurs membres inférieurs. La majorité des études biomécaniques sur la propulsion manuelle utilisent des ergomètres avec des systèmes à rouleaux pour simuler le mouvement du FRM. La collecte de donnée en laboratoire avec ces systèmes stationnaires ne peut donner qu'une approximation de l'effort réel sur le terrain produit par les utilisateurs du FRM.

Le but de cette étude est de développer un appareillage autonome, qui est relié à une plate-forme dynamométrique de type SmartWheel (Three Rivers Holdings, Inc). Ce dispositif sera capable de mesurer en temps réel les capacités de propulsion de l'utilisateur en FRM. Il permettra de faire l'acquisition des efforts lors de la propulsion non stationnaire. Ces efforts représentent les forces et les moments de réaction par la main. Le fait que l'appareillage soit embarqué avec le fauteuil roulant permet l'emploi du dispositif dans les conditions réelles de propulsion.

L'appareillage est développé autour d'un enregistreur de données (data logger Tattletale TT8, Onset Computer Corp) fonctionnant avec un microcontrôleur MC 68332. Grâce à une interface utilisateur claire et facile à utiliser, l'appareillage permet la programmation du nombre et de la durée des essais.

Une fois les acquisitions terminées, les données collectées sont transférées à un ordinateur pour faire la visualisation des forces et des moments ainsi que l'analyse des paramètres cinétiques, telles que le découpage des phases de propulsion, la détermination de la position du point d'application des forces (PFA) et l'évaluation de l'efficacité biomécanique. À partir du monitoring des efforts, des nouvelles informations ont été déterminées tel les changements de direction du FRM durant le parcours.

L'analyse de l'incertitude sur les forces et les moments montre que celle-ci en moyenne est de 5% pour les forces mesurées, et de 8% pour les moments exercés sur la main courante.

**DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED DEVICE TO MONITOR REACTION  
FORCES AND MOMENTS FOR THE MEASURING SYSTEM  
"SMARTWHEEL" DURING MANUAL WHEELCHAIR PROPULSION**

Mourad Boukhelif

ABSTRACT

Manual wheelchair provides high degree of independence to users with physical disabilities. In the majority of wheelchair propulsion studies, wheelchair ergometers are used with rollers to simulate wheelchair motion.

Lab-based data collection can only approximate the real environment where wheelchair users (WCUs) drive. The objective of this work is to develop an autonomous device. This device is connected to the dynamometric platform, the SmartWheel (Three Rivers Holdings, Inc) which is able to measure in real time the WCUs propulsion strength. The device collects data using high speed serial port. These data are used to compute hand forces and moments during a non stationary propulsion. Since this device is embedded with the wheelchair, it allows the measurement in real conditions.

This device is developed around a data logger (Tattletale TT8, Onset Computer Corp) using MC68332 controller with a simple and user-friendly interface. The number and the duration of trials can be set. Once the acquisition of data is done, the collected data are transferred to a computer for analysis and monitoring the forces and moments. The kinetics parameters such as propulsion phases, the point of force application (PFA) and biomechanical efficiency are computed.

From the monitoring of the data, new information is found such as variation in wheelchair direction. An analysis of the uncertainty of the forces and moments reveals that it stays between 5% for forces and 8% for moments acting at pushrim level.

## **REMERCIEMENTS**

Ce mémoire a été réalisé sous la direction du professeur M Rachid Aissaoui, que je remercie pour son soutien technique. Je remercie également les membres du laboratoire de recherche en imagerie et orthopédie (LIO) de l'École de technologie supérieure.

Je remercie ma femme Faiza pour sa patience, son encouragement et ses efforts en mon absence, qui a su m'épauler durant mes études.

À mes filles Rajaa, Amira, Hajer et la petite Kawter.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE .....	iii
ABSTRACT .....	iv
REMERCIEMENTS .....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	x
LISTE DES FIGURES.....	xi
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES .....	xiv
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES DISPOSITIFS DE MESURE DES EFFORTS LORS DE LA PROPULSION EN FAUTEUILS ROULANT MANUEL.....	3
1.1 Introduction.....	3
1.2 Dispositifs de mesure des efforts en FRM .....	3
1.2.1 Dispositifs de mesures des efforts statiques.....	4
1.2.2 Mesure des efforts par dispositifs externes .....	6
1.2.3 Mesure des efforts par roues instrumentées .....	9
CHAPITRE 2 DESCRIPTION DE LA SMARTWHEEL .....	17
2.1 Conception mécanique .....	17
2.2 Conception électronique.....	18
2.2.1 Acquisition et conditionnement du signal.....	20
2.2.1.1 Capture de la déformation.....	20
2.2.1.2 Jauges de contraintes.....	20
2.2.1.3 Relation entre variation de longueur et variation de résistance .....	21
2.2.1.4 Conditionnement du signal .....	22
2.2.1.5 Disposition mécanique des jauges .....	24
2.2.1.6 Filtrage et amplification .....	26
2.2.1.7 Encodeur optique .....	26
2.2.1.8 Numérisation et mise en série .....	26
2.2.2 Partie située en face de la roue.....	27
2.3 Procédure de mise en marche de la roue SmartWheel.....	27
CHAPITRE 3 CONCEPTION DU COLLECTEUR DE DONNÉES.....	29
3.1 Introduction.....	29
3.1.1 Système non embarqué .....	29
3.1.2 Système embarqué .....	30
3.2 Problématique .....	31
3.3 Étude de l'enregistreur de données Tattletale Modèle 8.....	34

3.3.1	Introduction.....	34
3.3.2	Le microcontrôleur MC68332.....	35
3.3.2.1	Unité centrale de traitement (CPU32 Central Processing Unit).....	36
3.3.2.2	Unité traitement du temps (TPU : Time Processor Unit).....	36
3.3.2.3	Module intégration système (SIM : System integration module).....	36
3.3.2.4	Module de communication série (QSM : Queued Serial Module) ....	36
3.3.3	Le coprocesseur PIC16C64.....	37
3.3.4	L'oscillateur HA7210.....	37
3.3.5	Les interfaces d'entrée et sortie.....	37
3.3.5.1	Les entrées analogiques.....	37
3.3.5.2	Les entrées / sorties numériques .....	38
3.3.6	La mémoire .....	38
3.3.7	Programmation de l'enregistreur de données.....	39
3.3.7.1	Le jeu de commandes du TxBasic .....	39
3.4	Conception de l'instrumentation.....	40
3.4.1	Analyse du signal d'entrée .....	40
3.4.1.1	Caractéristiques du signal série.....	41
3.4.2	Circuit pilote RS 232.....	43
3.4.2.1	Le choix du convertisseur RS232 .....	43
3.4.2.2	Description du convertisseur RS232 .....	43
3.4.3	Conception des entrées / sorties .....	45
3.4.3.1	L'afficheur LCD.....	45
3.4.3.2	Les boutons Poussoirs.....	46
3.4.4	L'alimentation .....	47
3.4.5	Mise en boîtier.....	48
3.4.5.1	Le circuit imprimé.....	48
3.4.6	Le récepteur Infrarouge.....	50
CHAPITRE 4	LA GESTION DU COLLECTEUR DE DONNÉES ET ROUTINES D'ANALYSE.....	52
4.1	Gestion de l'enregistreur de données .....	52
4.1.1	Réception des données.....	52
4.1.1.1	Création du port série.....	53
4.1.1.2	Mécanismes de gestion des entrées.....	53
4.1.1.3	Lecture des entrées.....	54
4.1.1.4	La vérification de la qualité des données .....	54
4.1.1.5	Causes et remèdes .....	55
4.1.2	Émission des données vers l'ordinateur.....	59
4.2	Routines d'analyse .....	60
4.2.1	Détection de début du paquet de données .....	60
4.2.2	Reconstitution des tension de sorties des ponts de mesure.....	61
4.2.3	Calcul des forces et moments.....	63
4.2.3.1	Définition du repère .....	63

CHAPITRE 5	BIOMÉCANIQUE DE LA PROPULSION EN FAUTEUIL ROULANT MANUEL .....	65
5.1	Introduction .....	65
5.2	L'analyse par dynamique inverse.....	66
5.3	Cycles de propulsion .....	70
5.3.1	Paramètres temporelles .....	70
5.3.2	Les patrons de la propulsion .....	71
5.4	Forces de réaction sur la main courante.....	72
5.4.1	Efficacité de la propulsion .....	75
5.5	Moments de propulsion.....	78
5.5.1	Moments de la force de réaction .....	79
5.5.2	Moment de la main.....	80
5.6	Le point d'application des forces (PFA) .....	83
5.6.1	Analyse technique du PFA par la cinétique .....	84
5.6.1.1	Analyse du PFA par la méthode du cosinus .....	84
5.6.1.2	Analyse du PFA par la méthode de la tangente .....	87
5.7	Incertitude de la mesure .....	90
5.7.1	Généralités.....	90
5.7.2	Incertitudes sur les paramètres mesurables : forces et moments.....	91
5.7.2.1	Les variables de base.....	92
5.7.3	Incertitudes des forces.....	92
5.7.3.1	Incertitudes absolues des forces .....	94
5.7.3.2	Incertitudes relatives des forces .....	95
5.7.4	Incertitudes des moments.....	97
5.7.4.1	Incertitudes absolues des moments .....	98
5.7.4.2	Incertitudes relatives des moments .....	99
5.7.5	Incertitude sur l'angle du PFA .....	100
5.7.5.1	Méthode 1 en utilisant le cosinus.....	101
5.7.5.2	Méthode 2 en utilisant la tangente .....	103
CONCLUSION	.....	108
ANNEXE 1	SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES ET BROCHAGE DE L'ENREGISTREUR DE DONNÉES TATTLETALE MODÈLE 8.....	110
ANNEXE 2	PROCÉDURE DE CHARGEMENT DU TXBASIC DANS L'EEPROM DU TATTLETALE MODÈLE 8.....	114
ANNEXE 3	LIAISON RS 232.....	117
ANNEXE 4	AFFICHEUR ALPHANUMÉRIQUE .....	122
ANNEXE 5	IMPLANTATION ET NOMENCLATURE DES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES .....	126

ANNEXE 6	LES FONCTIONS ET LE LISTING DU PROGRAMME TXBASIC UTILISÉES POUR LA GESTION DE L'ENREGISTREUR DE DONNÉES.....	130
ANNEXE 7	DÉTAILS DE LA MÉTHODE 1 DE CALCUL DU POINT D'APPLICATION DES FORCES ( PFA ).....	143
BIBLIOGRAPHIE.....		153

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Résumé des dispositifs de mesure des efforts de la propulsion manuelle en fauteuil roulant .....15
Tableau II	Répartition des canaux selon les trois bras .....25
Tableau III	Format utilisé par la liaison série de la SmartWheel .....42
Tableau IV	Effort enregistré à l'épaule dans différentes études .....69
Tableau V	Valeurs FEF et MEF dans différentes études .....77
Tableau VI	Incertitudes absolues moyennes des forces $F_x$ , $F_y$ et $F_z$ .....95
Tableau VII	Incertitudes relatives moyennes des forces $F_x$ , $F_y$ et $F_z$ .....96
Tableau VIII	Incertitudes absolues moyennes des moments $M_x$ , $M_y$ et $M_z$ .....99
Tableau IX	Incertitudes relatives moyennes des moments $M_x$ , $M_y$ et $M_z$ .....100

## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Principe de mesure des efforts par Tupling .....5
Figure 2	Schéma de l'ergomètre développé par Niesing et al. ....7
Figure 3	Schéma de l'ergomètre développé par Rodgers et al .....8
Figure 4	Schéma de l'ergomètre utilisé par Rodgers .....9
Figure 5	Roue instrumentée de Strauss .....10
Figure 6	Vue schématique de la 3D SmartWheel .....11
Figure 7	Photo de la nouvelle SmartWheel.....12
Figure 8	Vue de la roue instrumentée de Wu et al. ....13
Figure 9	Schéma de la roue instrumenté de van Drongelen.....13
Figure 10	Aspect mécanique de la roue SmartWheel. ....18
Figure 11	Chaîne de mesure de la roue instrumentée SmartWheel .....19
Figure 12	Jauge de contraintes .....20
Figure 13	Schéma du pont de Wheatstone .....22
Figure 14	Disposition des jauges sur le bras 1 de la roue .....24
Figure 15	Les ponts de mesures respectives .....25
Figure 16	Ergomètre utilisé au LIO .....32
Figure 17	Synoptique du collecteur de données pour la SmartWheel .....34
Figure 18	Photo du l'enregistreur de données Tattletale modèle 8 (TT8-1Mv2) ....35
Figure 19	Schéma fonctionnel de l'enregistreur de données Tattletale modèle 8 (TT8-1Mv2) .....35
Figure 20	Signal série envoyé par la SmartWheel .....40
Figure 21	Format du paquet des données envoyées par la SmartWheel à une fréquence de 240 Hz .....42
Figure 22	Convertisseur RS232 MC145407 .....44
Figure 23	Câblage du convertisseur MC 145407 .....44
Figure 24	Schéma de l'afficheur LCD.....45
Figure 25	Connexion de l'afficheur 16X 2 .....46
Figure 26	Circuit d'entrée .....47

Figure 27	Photo du collecteur de données issues de la SmartWheel .....	48
Figure 28	Schéma électrique du collecteur de données pour la roue SmartWheel .....	49
Figure 29	Photo de la fixation de récepteur infrarouge sur la roue SmartWheel .....	50
Figure 30	Organigramme de la routine de collecte de données par l'enregistreur de données.....	52
Figure 31	Diagrammes d'écriture et de lecture des données du buffer du port série du data logger.....	57
.Figure 32	Organigramme de la gestion de la réception par le dispositif de collecte de données.....	58
Figure 33	Détection de début de la trame des données .....	61
Figure 34	Reconstitution des canaux, angle et index à partir de la trame .....	62
Figure 35	Définition du repère associé à la SmartWheel .....	63
Figure 36	Schéma du modèle de dynamique inverse .....	67
Figure 37	Cycle de propulsion durant la phase de poussée.....	71
Figure 38	Forces ( $F_x$ , $F_y$ , $F_z$ ) de réaction sur la main courante .....	73
Figure 39	Forces appliquées par la main sur le cerceau de la roue (A : sur un plan horizontal, B sur une pente 1/10).....	74
Figure 40	Illustration des forces et des moments sur le cerceau de la roue. ....	76
Figure 41	Vecteurs Forces et moments appliqués au cerceau de la roue .....	79
Figure 42	Moments mesurés et appliqués sur le cerceau de la roue(A : sur un plan horizontal, B : sur une pente 1/10).....	82
Figure 43	Angle du PFA avec moment local de la main variant de 0 à 90%.....	85
Figure 44	Efficacité avec moment de la main variant de 0 à 90%.....	86
Figure 45	Angle du PFA par la méthode de la tangente avec $m_x=0$ , $m_y$ variable ....	87
Figure 46	L'angle du PFA, tiré de la tangente, au début de la propulsion, en fonction des rapport des moments $m_x$ $m_y$ et les moments $M_x$ et $M_y$ .....	88
Figure 47	L'angle du PFA, tiré de la tangente, au milieu de la propulsion, en fonction des rapport des moments $m_x$ $m_y$ et les moments $M_x$ et $M_y$ .....	89
Figure 48	L'angle du PFA, tiré de la tangente, à la fin de la propulsion, en fonction des rapport des moments $m_x$ $m_y$ et les moments $M_x$ et $M_y$ .....	89
Figure 49	Les forces tridimensionnelles utilisées dans l'incertitude .....	93
Figure 50	Les forces du la phase de poussée 4.....	94
Figure 51	Incertitudes absolues de forces de l'essai. ....	94

Figure 52	Incertitudes relatives des forces tridimensionnelles (phase de poussée 4) et moment $M_z$ .....	96
Figure 53	Moments tridimensionnelles utilisés dans l'incertitude de la phase de poussée 4.....	98
Figure 54	Incertitudes absolues des moments durant un essai.....	98
Figure 55	Incertitudes relatives des moments tridimensionnelles (phase de poussée 4). .....	100
Figure 56	L'incertitude sur l'angle PFA selon le moment local de la main.....	102
Figure 57	Incertitude sur l'angle du PFA en fonction des moments libres $m_x, m_y$ au début de la de propulsion .....	105
Figure 58	Incertitude sur l'angle du PFA en fonction des moments libres $m_x, m_y$ au milieu de la propulsion.....	106
Figure 59	Incertitude sur l'angle du PFA en fonction des moments libres $m_x, m_y$ à la fin de propulsion .....	106
Figure 60	Platine d'entrée sortie de l'enregistreur de données .....	111
Figure 61	Connections de l'enregistreur de données Tattletale M8.....	115
Figure 62	Polarité du connecteur d'alimentation DC.....	116
Figure 63	Représentation physique de connecteur DB9. ....	119
Figure 64	Format d'une trame asynchrone RS 232.....	120
Figure 65	Les niveaux électriques de la liaison RS232.....	121
Figure 66	Afficheur alphanumérique 16X2 modèle 632.....	123
Figure 67	Schéma d'implantation des composants. ....	127
Figure 68	Force totale dans les 2 repères, roue droite cadran supérieur gauche....	145
Figure 69	Détails de la force totale, roue droite cadran supérieur gauche .....	145
Figure 70	Force totale dans les 2 repères, roue droite cadran supérieur droit.....	147
Figure 71	Détails de la force totale, roue droite cadran supérieur droit.....	147
Figure 72	Force totale dans les 2 repères, roue gauche cadran supérieur droit.....	148
Figure 73	Détails de la force totale, roue gauche cadran supérieur droit.....	148
Figure 74	Force totale dans les 2 repères, roue gauche cadran supérieur gauche..	150
Figure 75	Détails de la force totale, roue gauche cadran supérieur gauche .....	150

## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

Bauds	Vitesse de transmission équivalent à bits/secondes
CPU32	Central Processing Unit, Unité centrale de traitement du contrôleur MC68332
Datafile	Emplacement de la mémoire vive de l'enregistreur de données
EEPROM	Mémoire morte programmable et effaçable électriquement
FRM	Fauteuil roulant manuel
FEF	Fraction de la Force Effective en (%)
$F_x$	Composante de la force selon l'axe de déplacement x
$F_y$	Composante de la force selon l'axe vertical de bas en haut y
$F_z$	Composante de la force selon l'axe de la roue z
Ko, Mo	Kilo Octets (1024 X 8 bits), Mega Octet(1048576 X 8 bits)
LCD	Afficheur à liquide cristallisé (Liquid Cristal Display)
LIO	Laboratoire d'Imagerie et d'Orthopédie
MCIII	Os situé dans la pomme de la main Troisième métacarpe
MEF	Efficacité Mécanique en (%)
$M_x$	Composante du moment autour de l'axe de déplacement x
$M_y$	Composante du moment autour de l'axe vertical de bas en haut y
$M_z$	Composante du moment autour l'axe de la roue z
N	Unité de mesure de la force Newton
Nm	Unité de mesure de moment Newton mètre
NPN	Transistor à base positive (Négatif Positif Négatif)
QSPI	Queued Serial Peripheral Interface,Port de communication série synchrone du contrôleur MC68332
PFA	Point d'application des forces
Phi ( $\phi$ )	Angle du point d'application des forces par rapport au zéro
SCI	Serial Communication Interface, Interface de communication série du contrôleur MC68332

Tétra ( $\theta$ )	Angle de rotation du bras de référence, le bras 1 par rapport au zéro
TPU	Time Processing Unit (Unité de traitement du temps) du contrôleur MC68332
TTL	Niveaux électriques logique Transistor Transistor Logic
TxBasic	Langage de programmation de l'enregistreur de données
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter, Émetteur Récepteur Universel Asynchrone
UIT	L'Union Internationale des Télécommunications
V28	Recommandations de UIT sur les spécifications électriques du format série

## INTRODUCTION

La première fonction du fauteuil roulant est a priori de donner à la personne présentant un handicap de déambulation la capacité de se déplacer et par là même de conquérir l'espace domestique et extra domestique. À la fois symbole d'autonomie retrouvée et de dépendance vis-à-vis de cet outil de déambulation, le pictogramme du fauteuil roulant est ainsi devenu le symbole international de la personne handicapée. Le fauteuil et la personne handicapée constituent en fait un couple fonctionnel. L'autonomie de la personne handicapée est étroitement liée aux qualités de son fauteuil roulant. L'usage du fauteuil roulant à propulsion manuelle ne correspond pourtant pas à un effort physiologique. Cet usage trop intense ou inadapté peut conduire au développement de pathologie dues à la sur utilisation telles que les tendinopathies et syndromes canaux du membre supérieur. (Pélissier, Jacquot, & Bernard, 1997)

L'Institut de réadaptation de Montréal (IRM) dispose de deux plateformes dynamométriques sous forme de roue nommées « SmartWheel ». Cette roue est capable de mesurer l'intensité de l'effort que développe un usager pendant la propulsion manuelle en fauteuil roulant. Cet effort est représenté par les forces et moments tridimensionnels agissant sur la main courante du fauteuil roulant. La plupart des études en propulsion manuelle ont été réalisées en laboratoire sur différents ergomètres à rouleaux qu'ils soient de type motorisés ou manuels. La différence essentielle entre ces ergomètres est la prise en considération de la friction et la stabilité du fauteuil roulant (Martin, Tordi, Bougeneot, & Rouillon, 2002). Dans les perspectives élaborées par ces auteurs Martin et al. (Martin et al., 2002), il en résulte que l'ensemble des limites des appareils et des protocoles implique la nécessité de développer une nouvelle génération d'ergomètres simulant précisément les interactions avec le terrain. C'est pourquoi la mesure des forces et des moments sur le terrain peut nous informer sur les conditions de charges réelles que subissent les usagers en fauteuil roulant

Le but principal de ce projet est le développement d'un appareil de monitoring et d'enregistrement des efforts de réaction exercés sur la main courante. Ce dispositif est organisé autour d'un enregistreur de données (un data logger). Ce dernier fonctionne avec un microcontrôleur le MC-68332 de Motorola, Inc. Cet appareil possède une mémoire vive de 1 Mo et sera donc un dispositif embarqué. Il sera autonome et programmable pour des durées d'acquisition variables. Une analyse de paramètres biomécaniques est faite en utilisant des données enregistrées par le dispositif développé dans le cadre de ce mémoire.

Le présent mémoire est divisé en cinq chapitres. Le premier chapitre fait une revue de littérature sur les différents types de dispositifs dynamométriques utilisés pour la mesure des efforts lors de la propulsion en fauteuil roulant manuel (FRM). Le deuxième chapitre sera consacré au fonctionnement de la roue dynamométrique « SmartWheel ». Le troisième chapitre traite de la conception de l'appareil d'acquisition et d'enregistrement des données de forces et sa réalisation matérielle. Le quatrième chapitre présente les aspects logiciels et les routines de gestion de l'appareillage ainsi que la visualisation des données. Le chapitre cinq sera consacré à la biomécanique de la propulsion en FRM. Dans ce dernier chapitre, les paramètres temporels et cinétiques seront décrits. Une attention particulière sera portée sur la position du point d'application de la force (PFA) sur la main courante. Nous proposerons de tester différents algorithmes pour l'estimation du PFA : ce dernier est essentiel pour l'estimation de l'efficacité mécanique lors de la propulsion. Enfin un développement analytique sur l'incertitude des forces et des moments ainsi que sur le PFA permettra d'indiquer quels algorithmes sont les plus stables le long du cycle de propulsion afin de déterminer avec précision l'efficacité ainsi que les patrons biomécaniques de la propulsion.

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LITTÉRATURE SUR LES DISPOSITIFS DE MESURE DES EFFORTS LORS DE LA PROPULSION EN FAUTEUILS ROULANT MANUEL**

#### **1.1 Introduction**

Aujourd'hui, la grande majorité des personnes se déplaçant en fauteuil roulant, utilisent les mains courantes comme mode de propulsion. Pour comprendre comment l'énergie est transférée de l'utilisateur au fauteuil roulant, et pourquoi certaine technique de propulsion demande plus d'énergie qu'une autre, des analyses biomécaniques ont été entreprises depuis plusieurs décennies. Ces aspects biomécaniques peuvent être analysés à l'aide des paramètres temporels, de l'analyse du mouvement, de l'activité musculaire, ainsi que de l'application des forces sur la main courante. Cette dernière fait référence à la collecte des données cinétiques en trois dimensions et notamment les forces et les moments appliqués par l'utilisateur du FRM. La mesure des forces et des moments au niveau de la main courante peut nous permettre de comprendre les causes des blessures souvent associées à la propulsion manuelle. La quantification de l'intensité des forces et des moments ainsi que de leurs orientations dans l'espace tridimensionnel est un impératif pour la compréhension de l'efficacité de la propulsion, l'évaluation des capacités physiques des usagers de FRM, l'amélioration de la performance des usagers, ainsi que le développement de techniques de préventions (Veeger, van der Woude, & Rozendal, 1991).

#### **1.2 Dispositifs de mesure des efforts en FRM**

Lors de la propulsion en FRM, les forces et les moments de réaction enregistrés au niveau de la main représentent les variables d'entrée à des modèles musculosquelettiques tel le modèle de la dynamique inverse. Cette modélisation est une

méthode permettant l'estimation des efforts articulaires aux segments distaux par rapport à la main courante (exemple : l'articulation du poignet, du coude ou celle glénohumérale (de l'épaule)).

L'instrumentation utilisée pour la mesure des efforts lors de la propulsion manuelle en FRM s'est nettement améliorée durant les deux dernières décennies. Les dispositifs de mesure utilisés dans les laboratoires de recherche actuels peuvent être divisés en trois catégories :

- Dispositifs de mesures des efforts statiques;
- Mesure des efforts par dispositifs externes;
- Mesure des efforts par roues instrumentées.

### **1.2.1 Dispositifs de mesures des efforts statiques**

En 1981, Brauer et al. (Roger L. Brauer & Bruce A. Hertig, 1981) ont mesuré le moment statique produit sur le cerceau de la roue d'un fauteuil roulant. Le cerceau était retenu par des ressorts et monté indépendamment des roues du fauteuil qui elles étaient fixes. L'ajustement des ressorts se faisait selon la force musculaire des sujets. Des résistances variables étaient montées entre le cerceau et la roue. Le mouvement différentiel entre ces dernières faisait varier la résistance qui était alimentée par une tension continue constante. On enregistrait alors la tension de sortie. Grâce à une calibration du système le moment appliqué sur la roue était mesuré. Les sujets devaient saisir le cerceau de la roue en six positions de test allant de -10 à 40 degrés par rapport à la verticale. Ils devaient appliquer un effort maximal pour faire tourner les deux roues. Les moments ainsi enregistrés variaient entre 17 Nm et 46 Nm. Les auteurs conclurent que la quantification du moment dépendait de la force d'agrippement de la main, de son point d'application ainsi que des caractéristiques fonctionnelles du cerceau, à savoir : le profil de la section de celui-ci et du matériau.

En 1982, Brubaker et al. (Brubaker, S.Ross, & McLaurin, 1982) ont étudié l'effet de la position du siège sur le fauteuil roulant sur la force de propulsion statique au niveau du cerceau. Le dispositif de mesure était composé de bras sur lesquels des jauges de contraintes ont été montées. Le sujet devait agripper le cerceau en quatre positions (-30, 0, 30 et 60 degrés). Les forces statiques mesurées variaient entre 500 et 750 N (Brubaker et al., 1982).

En 1986, Tupling et al. (Tupling, Davis, Pierrynowski, & Shephard, 1986) ont étudié l'initiation du mouvement en fauteuil roulant et, spécialement, les techniques de démarrage :

- Démarrage par agrippement (Grab start);
- Démarrage par impulsion (Strike Start).

Le fauteuil roulant n'était pas instrumenté, mais la mesure des forces se faisait par une plate-forme de force piézoélectrique de type Kistler. Cette plate-forme statique pouvait soutenir les quatre roues du fauteuil roulant. L'essai se terminait lorsque les quatre roues quittaient la plate-forme. On mesure alors les forces au sol. Les forces ainsi obtenues, par la méthode d'agrippement, étaient de 300 N dans le sens de la propulsion (antérieur) et de 40 N dans le sens latéral, et un moment de torsion maximal autour de l'axe vertical de 6 Nm.

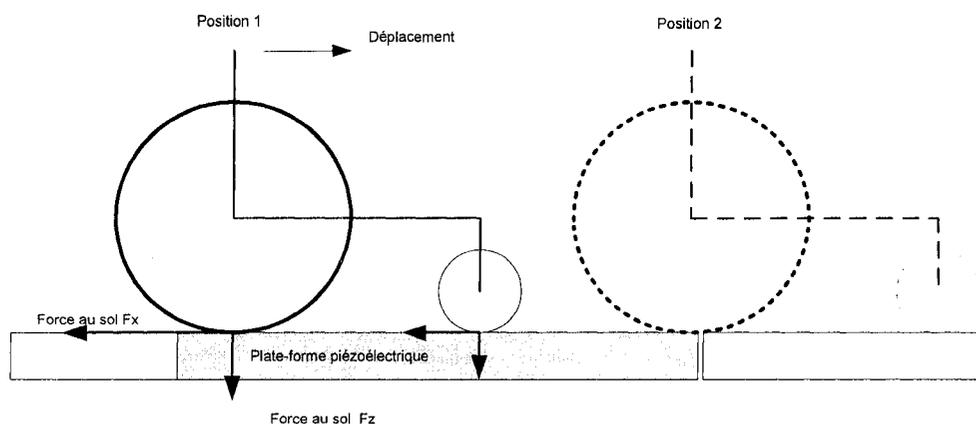


Figure 1 Principe de mesure des efforts par Tupling

Les auteurs (Tupling et al., 1986) ont conclu que la méthode par agrippement était plus efficace que celle par impulsion. Leur conclusion était basée sur le fait que la méthode par agrippement produisait des forces dans un intervalle de temps de 28% inférieur à celui produit par la méthode par impulsion

### **1.2.2 Mesure des efforts par dispositifs externes**

Les systèmes de mesure des efforts statiques (R.L. Brauer & B.A. Hertig, 1981; Brubaker et al., 1982; Tupling et al., 1986) ont fournis des informations importantes sur la quantification des charges maximales appliquées sur la main courante. Néanmoins, ces études ne renseignent en rien sur l'aspect dynamique de la propulsion manuelle en fauteuil roulant.

Pour évaluer les efforts dynamiques développés par les usagers de FRM, Niesing et al. (Niesing et al., 1990) ont développé un ergomètre stationnaire contrôlé par ordinateur (Fig.2). Cet ergomètre est capable de mesurer les forces agissant sur la main courante pour différentes puissances de propulsion. Cette puissance de l'ergomètre est ajustée par la résistance de roulement et l'angle de cambrage c'est-à-dire l'inclinaison entre le plan de la roue et le plan sagittal de propulsion.

Les forces sont mesurées dans les directions tangentielles, radiales et medio-latérales, l'étendu de mesure des forces est de 850 N dans les 3 directions et un moment maximum de 100 Nm (Niesing et al., 1990).

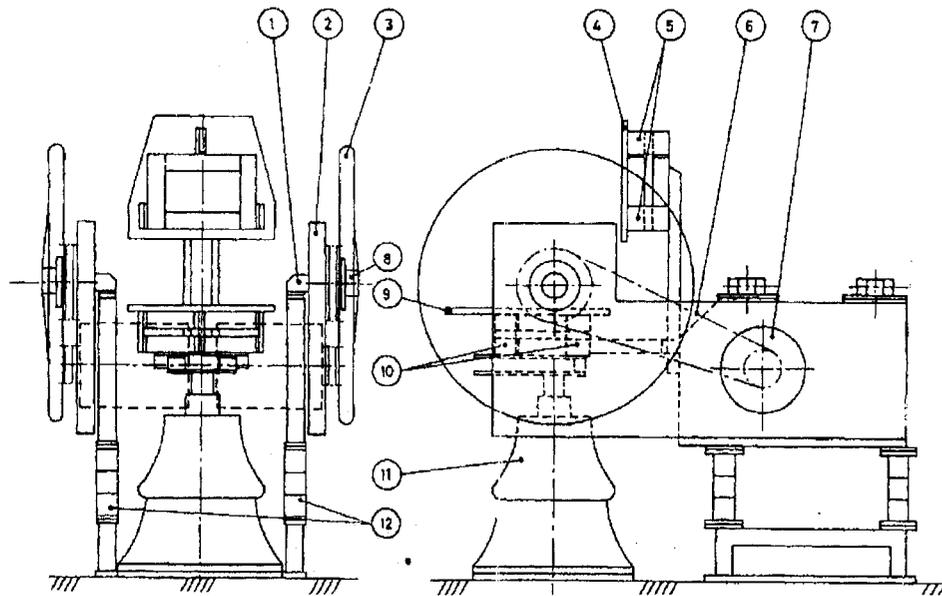


Figure 2 Schéma de l'ergomètre développé par Niesing et al.

1-Chassis, 2- Sous châssis, 3- Roue, 4- Dossier, 5- Capteur de force, 6-Couroie, 7- Moteur, 8- Capteur de moment, 9- Siège, 10-Capteur de force, 11-console, 12- Capteur de force.

L'étude de Veeger et al. (Veeger, Vanderwoude, & Rozendal, 1992) où cet ergomètre a été utilisé, est l'une des premières études qui a rapporté des données dynamiques sur les forces et les moments en trois dimensions ainsi que sur l'efficacité de la propulsion. Les auteurs (Veeger, Vanderwoude et al., 1992) ont mesuré les forces de réaction chez cinq individus valides à une vitesse linéaire de 1.11 m/s. La force maximale moyenne dans la direction antéropostérieure était de  $58.6 \pm 11.1$  N. La force maximale moyenne dans la direction médio-latérale était de  $27.9 \pm 15.2$  N. La force maximale moyenne dans la direction verticale était de  $171.5 \pm 9.7$  N. L'efficacité biomécanique correspondant au ratio de la force tangentielle sur la force totale appliquée sur la main courante était de  $78 \pm 8$  %. Les auteurs ont montré que la vitesse de propulsion modifiait significativement les forces verticales enregistrées.

Rodgers et al. (Rodgers et al., 1994) ont utilisé un fauteuil roulant instrumenté pour étudier les caractéristiques de la propulsion durant des essais de fatigue musculaire. Le

dispositif comprenait 16 jauges de contrainte montées en paire et en opposition sur 4 bras espacés de 90 degrés (Fig. 3). Les tensions de sorties des jauges sont proportionnelles aux charges appliquées qui représentaient les forces tangentielles seulement. Le dispositif est positionné sur un système de rouleaux, où des charges externes (masses) sont appliquées pour simuler les forces de friction résistives.

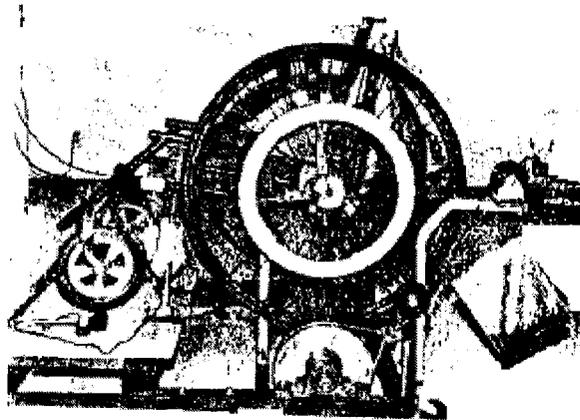


Figure 3 Schéma de l'ergomètre développé par Rodgers et al

Une autre version du dispositif de mesure (Rodgers, Keyser, Gardner, Russell, & Gorman, 2000) utilisant cette fois 6 capteurs de force et de moment, pouvait mesurer un moment maximal de 150 Nm et des forces allant jusqu'à 3500 N dans le plan de la roue (Fig. 4).

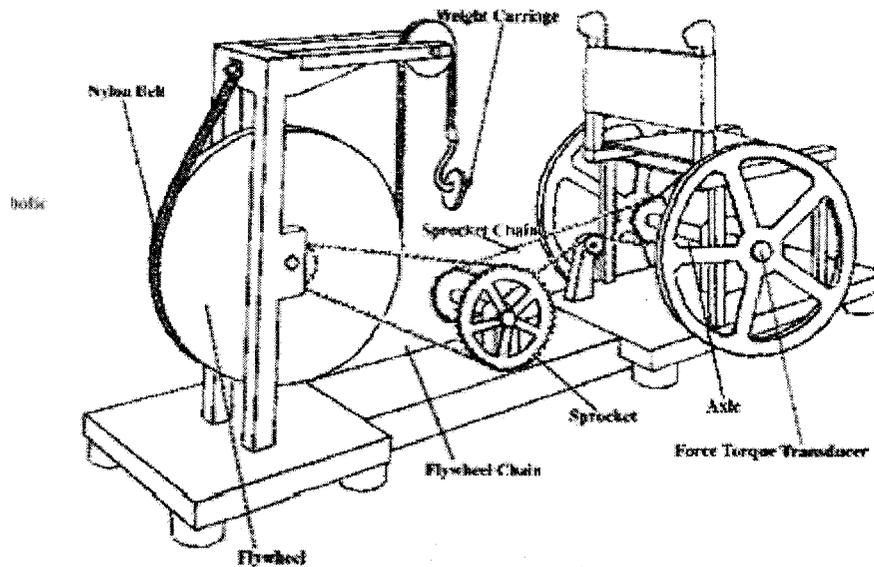


Figure 4 Schéma de l'ergomètre utilisé par Rodgers

En 1994, Ruggles et al. (Ruggles, Calahan, & An, 1994) testent 3 types de roues en utilisant un système à rouleaux stationnaire, le moment maximal, le déplacement angulaire et les durées de propulsions ainsi que le travail étaient alors comparés. Les moments mesurés variaient entre 60 et 80 Nm. Les auteurs ont conclu que le design et les dimensions du fauteuil relatives aux données anthropométriques des utilisateurs ont une influence sur les caractéristiques biomécaniques de la propulsion.

### 1.2.3 Mesure des efforts par roues instrumentées

Dans le but de surmonter deux problèmes principaux : à savoir l'encombrement et la stationnarité des dispositifs, certains laboratoires ont développé des systèmes basés sur des capteurs de forces fixés directement sur les roues arrière de propulsion. Ces capteurs sont conçus pour une mesure directe de l'effort sur la main à savoir les trois composantes des forces  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ , et les trois composantes des moments  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  autour de trois axes orthogonaux.

Strauss et al. (M. G. Strauss, Moeinzadeh, M. H., Schneller, M., and Thimble, J., 1989) ont considéré les critères suivants :

- Le système de mesure, pour une propulsion normale, doit permettre la collecte de données sans modifier ni influencer la mesure elle-même;
- Le système de mesure doit être capable de collecter des données dans des régimes transitoires et permanents.

Le dispositif est composé de 14 capteurs dont 8 jauges de contraintes de base et 6 rosettes, montés de telle manière que les charges axiales, celles de torsion et de fléchissement peuvent être distingués simultanément (Fig. 5). Le transfert des données entre le dispositif de mesure et le système d'acquisition se faisait à la fois par voie câblée et par voie de radiofréquence.

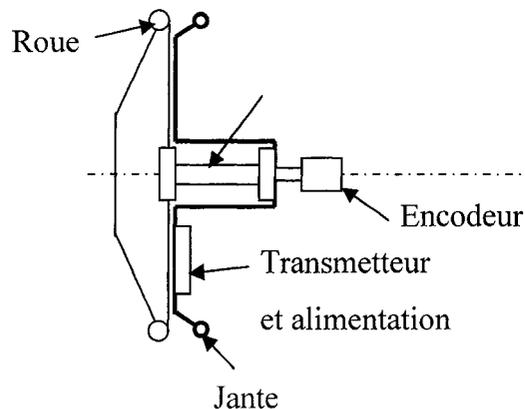


Figure 5 Roue instrumentée de Strauss

Des problèmes de linéarité des capteurs et de dérive n'ont permis seulement que des mesures de moments. En 1991, Strauss et al. (M. G. Strauss, Maloney, J., Ngo, F., and Phillips, M., 1991) modifient leur montage initial avec une électronique adaptée (des conditionneurs, des amplificateurs de signal.), mais ne fournissent aucune information sur les forces de propulsion.

En 1989, Cooper et Cheda (R.A. Cooper & Cheda, 1989) développèrent une roue instrumentée mesurant de façon dynamique les forces et les moments de propulsion appliqués sur la main courante. Le dispositif était formé de 3 bras reliant le cerceau au moyeu de la roue. Les bras étaient espacés d'un angle respectif de 120 degrés. Chaque bras supportait des jauges de contraintes montées en paires.

La partie électronique comprend l'amplification, la compensation en température des capteurs, la modulation et le multiplexage par division de fréquence. Les données ainsi collectées étaient transférées par un câble à une unité de traitement. En 1993, Asato et al. (Asato, Cooper, Robertson, & Ster, 1993) présentaient une version améliorée, nommée "SmartWheel", qui constitue la base des études cinétiques de la propulsion à l'Université de Pittsburgh (Fig. 6).

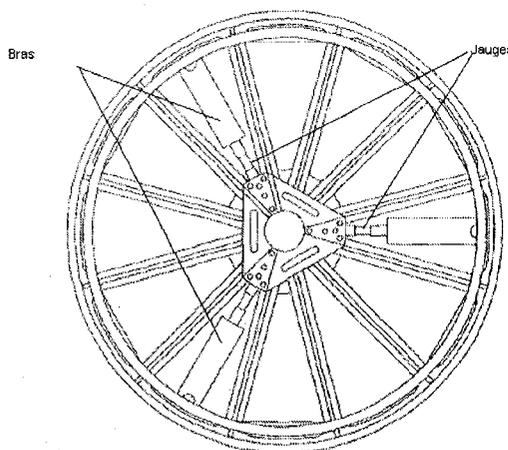


Figure 6 Vue schématique de la 3D SmartWheel

Les auteurs utilisaient des formulations mathématiques pour l'évaluation des forces et moments en fonction des constantes de calibration et de l'angle de rotation du bras de référence, le bras numéro 1. Cet angle est mesuré par un encodeur optique. Cette version de roue ne pouvait générer que deux forces, soit la direction horizontale et verticale dans le plan de la roue. Trois programmes étaient utilisés pour sauvegarder, convertir et afficher les données.

Une version améliorée de la SmartWheel (R.A. Cooper, Boninger, VanSickle, Robertson, & Shimada, 1997) était capable de mesurer les forces et les moments dans l'espace tridimensionnel. Les forces et les moments mesurés pouvaient varier respectivement entre  $\pm 155$  N et  $\pm 77$  Nm. La résolution sur les forces et les moments était de 1N et de 1Nm (Fig. 7). Pour éliminer les connecteurs rotatifs entre la roue et le dispositif de collecte une liaison infrarouge a été intégrée (Liu et al., 1997).

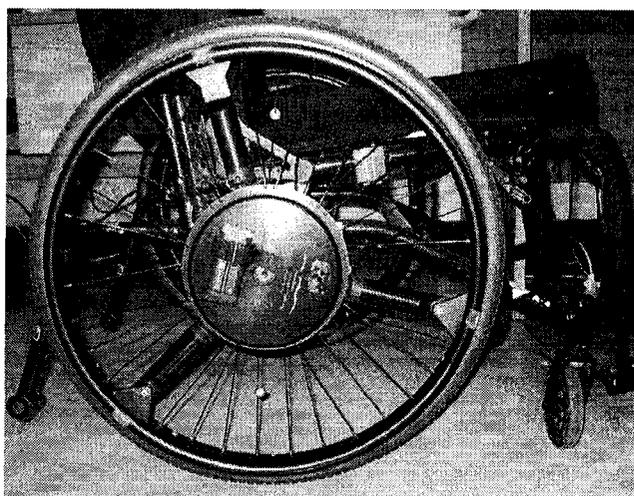


Figure 7 Photo de la nouvelle SmartWheel

En 1998, Wu (H.-W. Wu et al., 1998) a développé une roue équipée de capteurs de force à six composantes, les trois forces et trois moments. Les forces maximales atteignaient 1113 N dans le plan de la roue et 2226 N dans l'axe de la roue. Les moments mesurés pouvaient atteindre la valeur maximale de 127 Nm dans les trois directions. La fréquence d'échantillonnage était fixée à 100 Hz. Un dispositif d'enregistrement des données (data-logger, M5, Onset Computer Corp) et incorporé à la roue, permettait l'élimination de câbles entre la roue et le dispositif de traitement (Fig. 8).

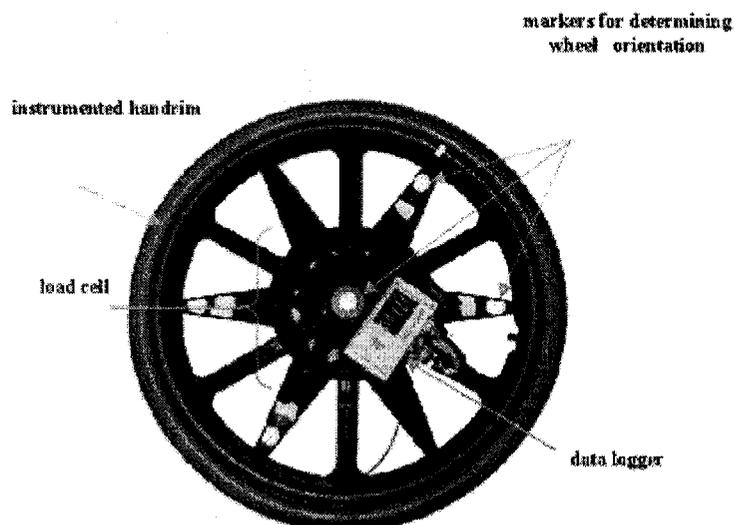


Figure 8 Vue de la roue instrumentée de Wu et al.

Van Drongelen et al. (van Drongelen, Veeger, van der Woude, Angenot, & Thomas, 2002) ont élaboré une version de roue autonome, et surtout moins encombrante que celles de Wu et al. Les capteurs tridimensionnels de forces et des moments (MC3A-6-1000, AMTI™, USA) étaient fixés au milieu de la roue (Fig. 9).

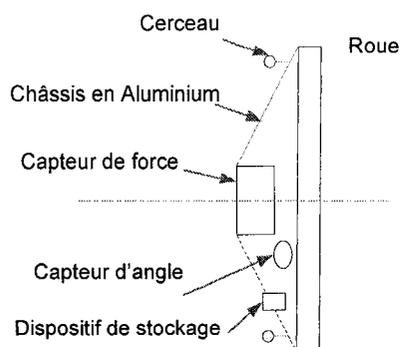


Figure 9 Schéma de la roue instrumenté de van Drongelen

Un équipement de stockage et d'enregistrement des données était incorporé à la roue pour éliminer tous les liens filaires entre le système de mesure et le système d'acquisition. Les auteurs (van Drongelen et al., 2002) estiment la précision de la force

appliquée dans chaque direction: 3.0 N dans direction antéropostérieure  $F_x$ , 2.8 N dans la direction verticale  $F_y$ , et enfin 4.1 N dans la direction médio-latérale. La précision sur les moments était respectivement égale à 0.3 Nm pour  $M_x$ , 0.7 Nm pour  $M_y$ , et 0.4 Nm pour le moment  $M_z$ .

Dabonneville et al. (Dabonneville et al., 2005) ont conçu un ergomètre sur la base d'un fauteuil roulant standard équipé de :

- Deux dynamomètres destinés à la mesure des six composantes des forces et moments appliqués sur le cerceau de roues;
- Potentiomètres rotatifs pour la mesure de la position angulaire;
- Une plate-forme de force placé sous le siège du fauteuil pour l'étude du comportement du centre de pression durant les phases de propulsion et de relâche;
- Un accéléromètre 3D pour l'analyse cinétique du mouvement permettant d'avoir la vitesse linéaire instantanée et le travail mécanique;
- Un ordinateur portable qui collecte les 24 signaux à 500Hz en utilisant une technologie sans fil.

En résumé, le tableau I donne les principaux systèmes de mesure utilisés pour la mesure des efforts de propulsion:

Tableau I

Résumé des dispositifs de mesure des efforts de la propulsion manuelle en fauteuil roulant

Dispositifs	Étude	Année	Forces (N)	Moments (Nm)	Précision	Capteurs	Fréquence d'échantillonnage (Hz)	Liaison
Dispositif de mesures des efforts statiques	(R.L. Brauer & B.A. Hertig, 1981)	1981	Indisp(*)	Entre 17 et 46Nm	Indisp(*)	Ressorts	Indisp(*)	filaire
	(Brubaker et al., 1982)	1982	500N : 750N	Indisp(*)	Indisp(*)	Jauges de contraintes	Indisp(*)	filaire
	(Tupling et al., 1986)	1986	300 N → 40 N↓	6 Nm/ axe de rotation	Indisp(*)	Plateforme piézoélectrique	Indisp(*)	filaire
Dispositifs externes de mesure des efforts	(Niesing et al., 1990)	1990	3 axes 850 N max	Axial 100 Nm max	Indisp(*)		100	filaire
	(Rodgers et al., 1994)	1994	Tangentielles 90 : 130 N	Indisp(*)	Indisp(*)	16 jauges sur 4 bras	Indisp(*)	filaire
	(Rodgers et al., 2000)	2000	3 axes : 3500 Nmax → 3500 N max ↓	3 axes : 150Nm max axial	Indisp(*)	Jauges Bertec 6 canaux	360	filaire

Tableau I (suite)

Dispositifs	Étude	Année	Forces	Moments	Précision	Capteurs	Fréquence d'échantillonnage (Hz)	Liaison
Mesure des efforts par roues instrumentées	(Asato et al., 1993; R. Cooper, 1997; R.A. Cooper et al., 1997; R.A. Cooper & Cheda, 1989)	1989 : 1997	3 axes : ±155N max	3 axes : ± 87 Nm	1.2N 0.6Nm	24 jauges Micro_Mesurement EA13-062-AQ350	240	Filaire et infrarouge
	(H. Wu, 1998)	1998	3 axes : 1113 N max → 1113 N max ↓ 2226 N max axial	3 axes : 127 Nm max 3 axes	Indisp(*)	Jauges JR3 à 6 canaux	100	Enregistreur de données
	(Dabonneville & Vaselín, 2000)	2000	3 axes	3 axes	Indisp(*)	Capteur TSR à 6 canaux	500	Sans fil
	(van Drongelen et al., 2002)	2002	3 axes	3 axes	2.8 :4.1 N 0.3 :0.7 Nm	Capteur AMTI M3 1000	Indisp(*)	Enregistreur de données
(*) = Indisponible								

## **CHAPITRE 2**

### **DESCRIPTION DE LA SMARTWHEEL**

Depuis la première version de la roue « SmartWheel » introduite par Cooper et Cheda en 1989 (R.A. Cooper & Cheda, 1989) jusqu'à la version commerciale développée par la compagnie Three Rivers Holdings inc, le principe de base de la mesure employée est demeuré le même. Le système de la SmartWheel est basé sur l'emploi de capteurs d'extension, montés d'une manière spécifique sur trois bras sous la forme d'un « Y » et espacés géométriquement de manière symétrique sur la main courante de la roue. Lorsque ces capteurs sont soumis à un effort, ils subissent alors une déformation réversible. Les déformations sont quantifiées en une grandeur mesurable représentée par une tension électrique.

#### **2.1 Conception mécanique**

La roue SmartWheel est développée selon les dimensions d'une roue normale dont le cerceau, l'élément de préhension lors de la propulsion, est reliée au moyeu par trois bras en aluminium placés en Y à 120 degrés l'un de l'autre. Chaque bras est composé de deux parties, une partie rigide avec le cerceau et une autre partie rigide avec le moyeu de la roue. Les deux parties s'emboîtent l'une dans l'autre par l'intermédiaire de roulements linéaires, de sorte qu'un effort sur un bras sera transféré aux autres bras (Asato et al., 1993) (Fig. 10).

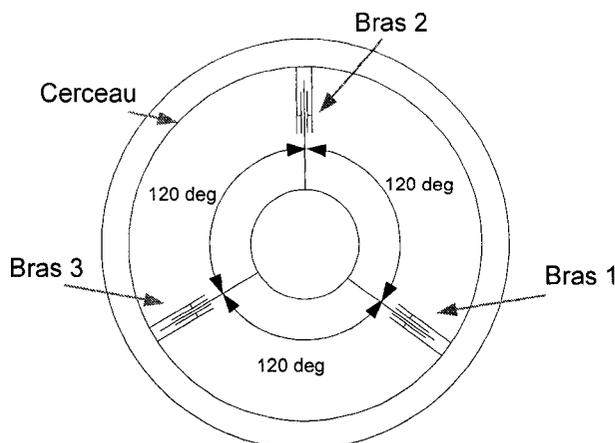


Figure 10 Aspect mécanique de la roue SmartWheel.

## 2.2 Conception électronique

La chaîne de mesure de la SmartWheel est divisée en deux parties (Fig. 11):

- Une partie localisée dans la roue, qui comporte les capteurs de déformations qui sont les jauges de contraintes, un encodeur optique pour la détection de la position des bras et le traitement électronique qui s'en suit, à savoir le conditionnement du signal, le filtrage, l'amplification, la numérisation du signal, la mise en paquets et son émission par rayonnement infrarouge (Asato et al., 1993);
- Une deuxième partie, localisée dans la ligne de champs de l'émetteur infrarouge, qui comporte un récepteur infrarouge, un convertisseur en série pour assurer la connexion avec l'unité de traitement des données.

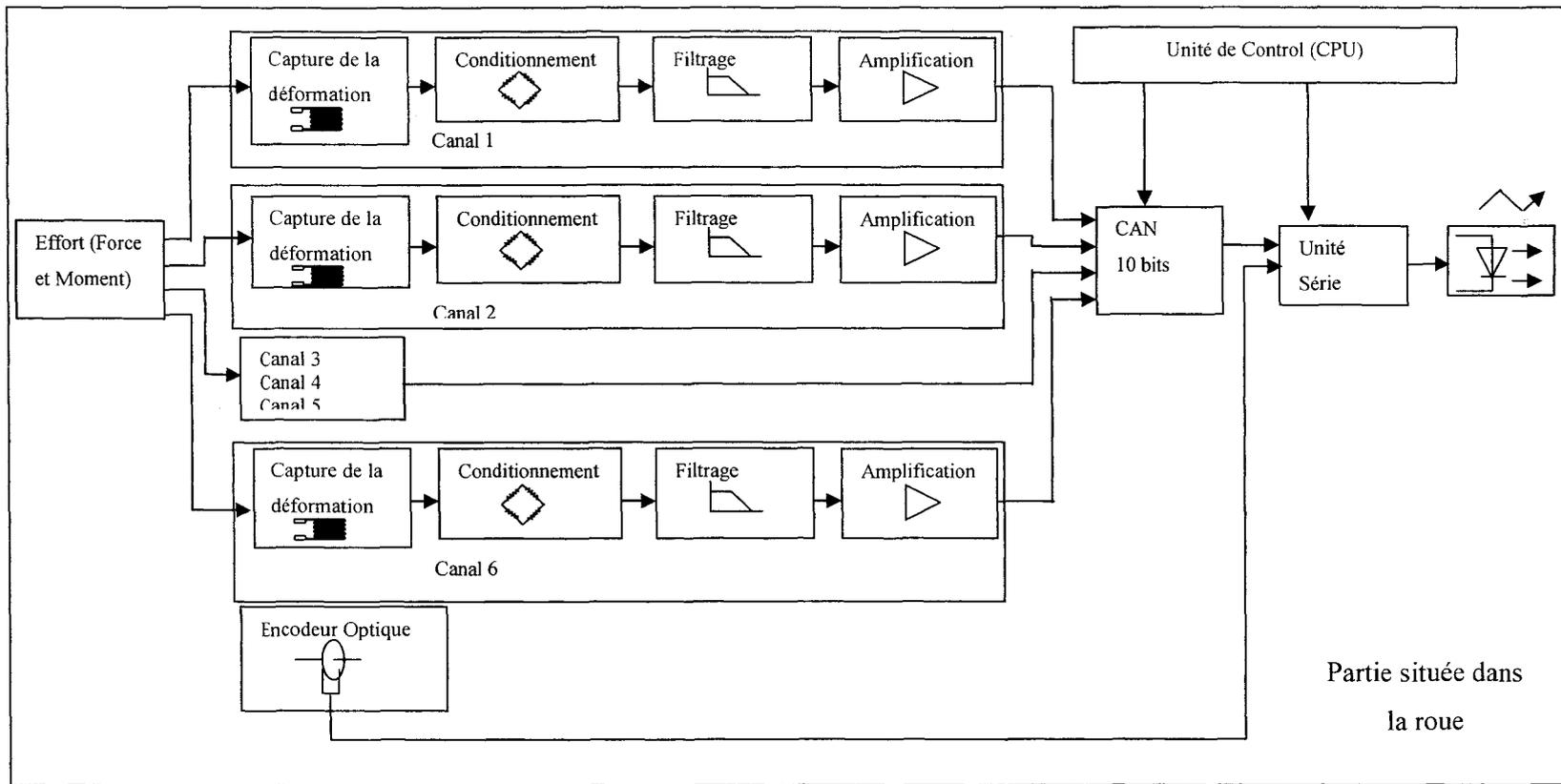


Figure 11 Chaîne de mesure de la roue instrumentée SmartWheel

## 2.2.1 Acquisition et conditionnement du signal

### 2.2.1.1 Capture de la déformation

Les capteurs d'effort également appelés dynamomètres ou cellule de force représentent le noyau de la chaîne de mesure. Ces capteurs ayant une longueur  $L$ , sont collés sur la structure mécanique subissant les efforts. Les déformations sont régies par la loi de Hooke :

$$\sigma = E \frac{\Delta L}{L} \quad (2.1)$$

Avec  $E$  : Le module de Young étant une constante intrinsèque à chaque matériau;

$\sigma$  : La contrainte que subit le capteur, exprimée en force par unité de surface;

$L$  : La longueur du corps du capteur.

Tant que cette déformation reste dans le domaine élastique, elle se traduit par la proportionnalité entre l'effort (la force ou le moment) et la déformation (allongement ou flexion).

### 2.2.1.2 Jauges de contraintes

La jauge de contraintes est un composant électrique constitué par un fil électrique fin monté en forme d'épingles, et collé sur un support mince et extensible. Le support est lui-même collé sur la structure mécanique dont on veut mesurer les déformations, voir la figure 12.

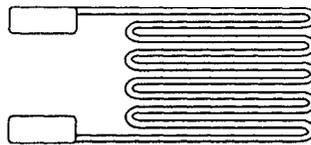


Figure 12 Jauge de contraintes

Le fil électrique, parcouru par un faible courant électrique, subit des variations de résistance suivant l'extension, la contraction ou la flexion du capteur, de sorte que l'on peut recueillir les variations de tension à ces 2 bornes. Les jauges de contraintes utilisées dans la roue SmartWheel ont une résistance nominale de 350 Ohms.

### 2.2.1.3 Relation entre variation de longueur et variation de résistance

Les variations géométriques de la jauge de contraintes se traduisent par des variations de sa résistance, qui seront exploitées pour identifier l'amplitude de la contrainte. La résistance d'un conducteur uniforme de longueur  $L$ , de section  $S$  et de résistivité spécifique  $\rho$  est donnée par :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (2.2)$$

La différentielle totale  $dR$  après normalisation, est donnée par :

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} \quad (2.3)$$

Or la variation de la section peut être exprimée par :

$$\frac{dS}{S} \approx -2\nu \frac{dL}{L} \quad (2.4)$$

Où  $\nu$  est une constante représentant le coefficient de Poisson.

La variation de la résistivité est donnée par :

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C(1-2\nu) \frac{dL}{L} \quad (2.5)$$

Où  $C$  est la constante de Bridgman du matériau, et  $V$  le volume du fil,

$$\frac{dR}{R} = (1 + C(1-2\nu) + 2\nu) \frac{dL}{L} = G \frac{dL}{L} \quad (2.6)$$

Où  $G$  est le facteur de jauge  $G = (1 + C(1-2\nu) + 2\nu)$  (2.7)

Les différentielles  $dR$  et  $dL$  peuvent être approximées par  $\Delta R$  et  $\Delta L$  respectivement . On définit alors la déformation par :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.8)$$

Ce qui donne :

$$\frac{\Delta R}{R} = G\varepsilon \quad (2.9)$$

Pour les jauges métalliques  $G$  varie entre 1.8 à 6 (Dally & Riley, 1991). L'équation (2.9) montre une relation linéaire entre la variation de résistance  $\Delta R$  et la variation de la longueur  $\Delta L$  dans la zone de déformation élastique. Pour une déformation dans le domaine élastique de  $\varepsilon = 0.0014$  et un facteur de jauge de 2.1 et une résistance nominale de jauge de  $350 \Omega$ , on aura une variation de résistance  $\Delta R$  d'environ  $1 \Omega$ . Les variations sont très faibles pour être évaluées avec précision par une lecture directe, d'où la nécessité d'un dispositif capable de réagir à ces variations.

#### 2.2.1.4 Conditionnement du signal

Pour déterminer les changements des résistances sous l'effet de l'effort, le pont de Wheatstone est le plus souvent utilisé. Les jauges de contraintes représentées par leurs résistances ohmiques sont montées en pont complet. On utilise alors quatre jauges actives par pont, tel que représenté dans la figure 13. Ces jauges sont alimentées par une source de tension continue  $V_{in}$ .

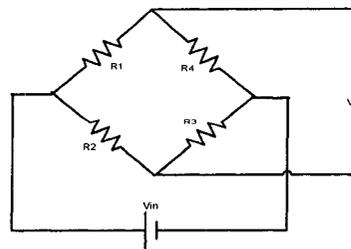


Figure 13 Schéma du pont de Wheatstone

La tension de sortie  $V_s$  du pont est donnée par :

$$V_s = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_m \quad (2.10)$$

Le pont peut être considéré comme équilibré si la tension de sortie  $V_s$  est nulle : ceci est possible en choisissant dans les conditions de repos (sans effort) la condition suivante :

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2.11)$$

Dans la roue "SmartWheel" on utilise les même jauges de contraintes : on a alors au repos l'égalité des résistances ( $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ ). C'est cet état d'équilibre qui permet l'utilisation du pont de Wheatstone comme un appareil de mesure. Initialement équilibré ( $V_s=0$ ), tout effort de déformation de la structure mécanique supportant la jauge induit une variation de longueur  $L$  de la jauge. Cet effort produit une variation de résistance selon les équations (2.1) et (2.9).

Si les résistances  $R_i$  sont augmentées de  $\Delta R_i$ , alors la tension de sortie peut être exprimée selon 2.10 par :

$$\Delta E = V_s = \frac{(R_1 + \Delta R_1)(R_3 + \Delta R_3) - (R_2 + \Delta R_2)(R_4 + \Delta R_4)}{(R_1 + \Delta R_1 + R_2 + \Delta R_2)(R_3 + \Delta R_3 + R_4 + \Delta R_4)} V_m \quad (2.12)$$

Sachant que le produit des variations  $\Delta R_i \times \Delta R_j$  est négligeable devant  $\Delta R_i$  et après normalisation de la tension de sortie  $V_s$  est :

$$V_s = \frac{r}{(1+r)^2} \left( \frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V_m \quad (2.13)$$

Avec :

$$r = \frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4} \quad (2.14)$$

Pour des jauges de même matériau donc ayant un facteur de jauges  $G$  identique l'équation (2.13) devient :

$$V_s = \frac{Gr}{(1+r)^2} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) V_m \quad (2.15)$$

L'équation (2.15) montre qu'on peut quantifier la déformation que subit un corps en mesurant la tension de sortie du pont de mesure. Selon l'équation (2.13) le signal sera maximal si on dispose judicieusement les jauges sur le corps mécanique de telle manière à obtenir un rapport  $\frac{\Delta R_i}{R_i}$  le plus grand possible afin d'éviter l'effet neutralisant des valeurs algébriques de l'équation. Les signes positifs et négatifs doivent s'additionner algébriquement.

### 2.2.1.5 Disposition mécanique des jauges

Des capteurs d'aspect très semblable ont des applications différentes suivant la disposition des jauges dans le pont de Wheatstone. Les trois bras de la roue SmartWheel montés à 120 degrés sont les supports sur lesquels sont collées les jauges. Chaque bras est donc équipé de deux ponts complets (réalisés avec quatre jauges actives). Pour chaque bras les jauges sont montées comme le montre la figure 14.

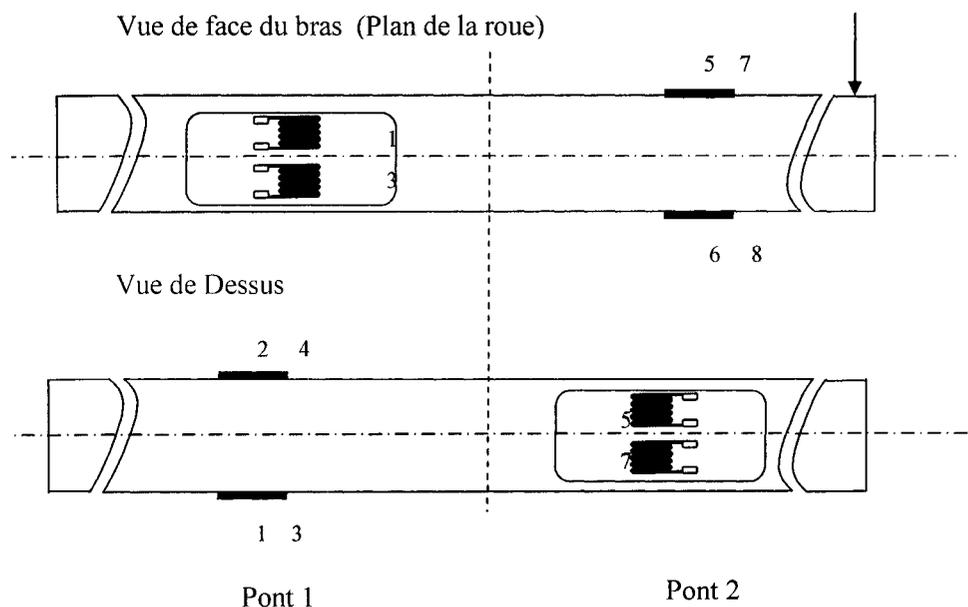


Figure 14 Disposition des jauges sur le bras 1 de la roue

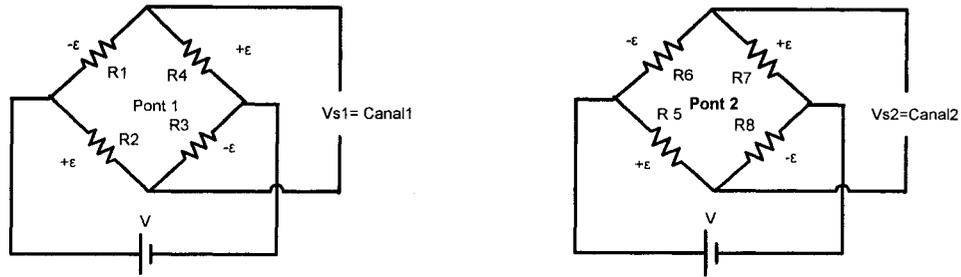


Figure 15 Les ponts de mesures respectives

Chaque bras est donc le support de deux ponts de mesure (voir tableau II), si une composante d'une force est appliquée sur le cerceau dans le plan de la roue, elle produit une extension des capteurs 5 et 7, voir figure 14 et 15, et une compression des capteurs 6 et 8 appartenant au pont 2, les capteurs du pont 1 réagissent à une déformation minime comparée au pont 2.

Tableau II

Répartition des canaux selon les trois bras

	Plan de la roue (sagittale)	Plan Orthogonal
Bras 1	Pont 1 (Canal 1=v1)	Pont 2(Canal 2=v2)
Bras2	Pont 3 (Canal 3=v3)	Pont 4(Canal 4=v4)
Bras3	Pont 5 (Canal 5=v5)	Pont 6(Canal 6=v6)

Les résistances  $R_5$  et  $R_7$  vont croître, et les variations  $\Delta R_5$  et  $\Delta R_7$  seront positives. De même que les résistances  $R_6$  et  $R_8$  vont diminuer et leurs variations  $\Delta R_6$  et  $\Delta R_8$  seront négatives. En tenant compte de l'équation (2.13), la tension de sortie  $V_s$  du pont de mesure croit, la sensibilité du pont sera d'autant plus grande.

### **2.2.1.6 Filtrage et amplification**

Le signal de sortie du pont de mesure est filtré par un filtre analogique passe-bas à une fréquence de 50Hz pour éviter les effets de repliement de spectre. C'est un phénomène qui est causé par la conversion analogique numérique. La bande passante de 50 Hz est amplement suffisante pour mesurer la dynamique de la propulsion en fauteuil roulant (R.A. Cooper, VanSickle, Robertson, Boninger, & Ensminger, 1995). L'opération de filtrage est suivie par une opération d'amplification avec un rapport allant de 500 à 1000. Les efforts opérant dans le plan de la roue sont évalués respectivement par les ponts 1, 3 et 5. Les efforts opérant dans la direction médio-latérale de la roue sont évalués quant à eux par les ponts 2, 4 et 6.

### **2.2.1.7 Encodeur optique**

La roue est munie d'un encodeur optique pour mesurer l'angle de rotation. Cet encodeur est caractérisé par le nombre d'impulsion par révolution. On définit alors le pas comme étant le rapport entre 360 degrés et le nombre d'impulsion par tour. Chaque impulsion a une largeur de la durée d'un pas. Pour évaluer le sens de rotation, horaire ou antihoraire, l'encodeur génère deux signaux en quadrature de phase. La comparaison des phases des deux signaux détermine le sens de rotation. Le comptage des impulsions générées, donne l'angle de rotation. Pour avoir une référence absolue, une condition nécessaire est de s'assurer que le bras de référence, en l'occurrence le bras 1 soit en position horizontale, avant d'alimenter le circuit électrique de la SmartWheel. De cette façon, l'angle que donne l'encodeur optique est celui du bras 1 par rapport à l'horizontale.

### **2.2.1.8 Numérisation et mise en série**

Les informations utiles pour l'évaluation des forces et des moments sont les tensions électriques recueillies auprès des six canaux ( $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$ ). Ces tensions seront numérisées par un convertisseur analogique numérique (CAN) d'une résolution de 10

bits à une fréquence d'échantillonnage fixe de 240Hz. Les données ainsi numérisées et codées seront envoyées dans un format sériel par des mots de 8 bits. On fait une troncature des canaux sur 8 bits, et les 2 bits restants seront assemblés pour former deux autres octets dans la trame en série. Le signal électrique est transformé en un signal optique grâce à une diode infrarouge, dans le but d'éliminer les liens filaires.

### **2.2.2 Partie située en face de la roue**

Un récepteur infrarouge devra en tout temps être placé dans le champ de la diode infrarouge émettrice pour recevoir les données. Il faut noter que le dispositif décrit en paragraphe 2.2.1, formé par les jauges de contraintes, les circuits de conditionnement, le filtrage, l'amplification, la conversion et l'émission infrarouge est solidaire à la roue, lors de la propulsion le dispositif est entraîné dans le mouvement de rotation de la roue. Le récepteur infrarouge transforme le signal optique en un signal électrique conforme à celui de l'émission.

### **2.3 Procédure de mise en marche de la roue SmartWheel**

Pour que la roue SmartWheel fonctionne correctement une procédure de mise en marche est nécessaire. Elle se résume comme suit :

1. Aligner le bras de référence (le bras 1) en une position horizontale correspondant à un angle de 0 degrés, cette horizontalité est vérifiée par l'emploi d'un bras articulé (Le MicroScribe) qui donne les coordonnées de sa pointe en 3 dimensions. Ces coordonnées sont données dans un référentiel commun ou défini par l'utilisateur.
2. Alimenter la roue en courant électrique par batterie.
3. Entraîner la roue en rotation, au moins deux tours, en évitant d'utiliser le cerceau comme moyen d'entraînement.

Le circuit électronique incorporé à la roue amorce alors l'envoi des paquets de données, ceci est vérifiable par un LED indicative.

## CHAPITRE 3

### CONCEPTION DU COLLECTEUR DE DONNÉES

#### 3.1 Introduction

Les systèmes d'acquisition des données pour l'étude biomécanique de la propulsion en fauteuil roulant peuvent être divisés en deux catégories:

- Système non embarqué;
- Système embarqué.

##### 3.1.1 Système non embarqué

Les dispositifs de mesure des paramètres biomécaniques de la propulsion manuelle réalisée en laboratoires sont formés de deux parties :

- La chaîne de mesure, comportant la roue instrumentée pour l'acquisition des efforts, le dispositif de friction et de résistance;
- L'unité de traitement et d'analyse des données collectées.

L'impossibilité de rendre la chaîne de mesure autonome et ambulatoire et le fait de ne pas éliminer les liens physiques entre la chaîne de mesure et l'unité de traitement et d'analyse forme un système non embarqué. Au cours des essais sur les paramètres biomécaniques de la propulsion en fauteuil roulant les signaux électriques collectés et non traités sont acheminés vers l'unité de traitement par des liens filaire avec des formats et des liaisons standardisés. Parmi les signaux qui circulent, on y trouve généralement le flux d'information qui représente les données collectées, l'alimentation en courant électrique ainsi que les commandes de réglage.

Ce type de connexion et de transmission se trouve dans les premières études réalisées sur la propulsion par Tupling et al. , Rodgers et al. , Cooper et al (R.A. Cooper & Cheda, 1989) et Niesing et al (Niesing et al., 1990).

### **3.1.2 Système embarqué**

L'avancement technologique a permis la miniaturisation et l'intégration des composants électroniques et des capacités traitement énormes. On désigne par système embarqué, un équipement portable qui sera physiquement et mécaniquement associé au fauteuil roulant, ayant pour fonction de sauvegarder les données de propulsion. Cette liberté de locomotion et collecte de données permet de disposer de données réelles de propulsion, sur différents types surfaces, d'inclinaison de parcours, de vitesse de déplacement ainsi que la nature du trajet.

La roue SmartWheel, instrumentée pour la mesure des efforts, sera munie d'un dispositif essentiellement de stockage de données. On utilise alors un enregistreur de données, "un data logger". Il est composé essentiellement de microcontrôleurs et de la mémoire vive et morte. Une fois l'enregistrement terminé, le système sera connecté à un ordinateur pour effectuer des analyses et des traitements.

Cette topologie de système a été appliquée à la roue introduite par Wu en 1998(H.-W. Wu et al., 1998), qui utilise un enregistreurs de données modèle 5 (Onset Corp), et dans la version récente de roue utilisée par l'équipe de Veeger en 2002 (van Drongelen et al., 2002) avec un enregistreur de données Porti ( Twenty Medical Systems International). Dans les deux dispositifs cités, toutes la chaîne d'acquisition comportant la mesure, le conditionnement, le traitement analogique, la numérisation et le stockage sont fait par les enregistreurs de données.

Dans leur étude Dabonneville (Dabonneville et al., 2005) utilisent un dispositif embarqué avec une technologie sans fil pour le transfert des données entre le fauteuil et l'ordinateur.

### **3.2 Problématique**

Le laboratoire du LIO-ETS dispose de deux roues SmartWheel permettant l'acquisition des forces et des moments exercés sur la main courante d'un fauteuil roulant manuel. Afin de pouvoir utiliser ces deux roues pour une collecte de données biomécaniques de propulsion, des contraintes matérielles imposent l'utilisation avec le fauteuil roulant d'autres équipements indispensables, on note :

- L'utilisation du fauteuil roulant dans un environnement qui permet la propulsion tout en étant immobile et simulant les résistances de friction opposées au déplacement. Ce dispositif est un ergomètre avec un système à deux rouleaux, nécessitant un calibrage statique et dynamique pour être le plus près du milieu réel de propulsion des usagers (voir figure16);
- L'alignement de récepteur infrarouge avec le moyeu de la roue (qui comprend l'émetteur) pour avoir une visibilité directe faute de quoi il y a une perte de données;
- La connexion série filaire entre le récepteur et l'unité de traitement muni de logiciel pour la sauvegarde des données SmartWheel Interface "SWI". Les six canaux et l'angle de rotation de la roue représentent les données de base pour le calcul des forces et des moments en 3 dimensions.

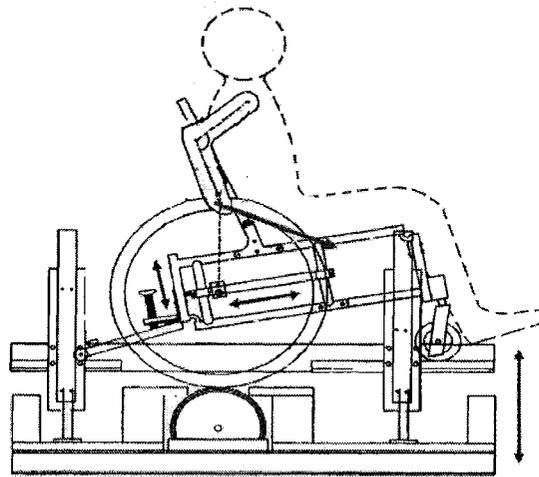


Figure 16 Ergomètre utilisé au LIO

L'idée est d'équiper la roue SmartWheel d'un dispositif de stockage autonome et embarqué. Le système reçoit un signal type série qu'envoie la roue. Une fois la collecte de données des essais de propulsion est terminée, alors le dispositif embarqué sera connecté à un ordinateur pour le transfert de l'information du dispositif vers l'ordinateur. De ce fait on élimine les contraintes citées à savoir l'utilisation d'un ergomètre comme dispositif de simulation et de friction. L'utilisation du fauteuil roulant pourra se faire sur différents types de surface, de terrains et d'inclinaison. La mesure des contraintes que subissent les utilisateurs se fera dans les conditions réelles de propulsion en donnant une liberté de mouvement en dehors laboratoire.

Le projet comprend donc :

1. La conception du dispositif de stockage basé sur un enregistreur de données de type modèle 8, qui sera connecté à la SmartWheel;
2. La programmation des routines de gestion, de collecte et de sauvegarde des données;
3. Le Transfert des données des essais vers un ordinateur en utilisant une interface série avec Matlab (MathWorks inc);

4. L'analyse des paramètres biomécanique notamment l'étude de la détermination du point d'application des forces et l'analyse de l'incertitudes sur ces forces et ces moments.

Le point de départ de la conception comprend un simple cahier de charge qui impose au dispositif :

- D'être capable de faire l'acquisition et la lecture des signaux qu'envoie la SmartWheel.
- Pouvoir stocker assez d'essais que le permet la mémoire et de les renvoyer pour le traitement.

La conception de ce dispositif dont le synoptique global est donnée à la figure 16. Elle est basée sur l'emploi d'un enregistreurs de données (data logger) Tattletale modèle 8 de Onset Corp. Des dispositifs d'entrées/sorties sont adaptés et ajoutés pour former une interface utilisateur capable de piloter le dispositif embarqué.

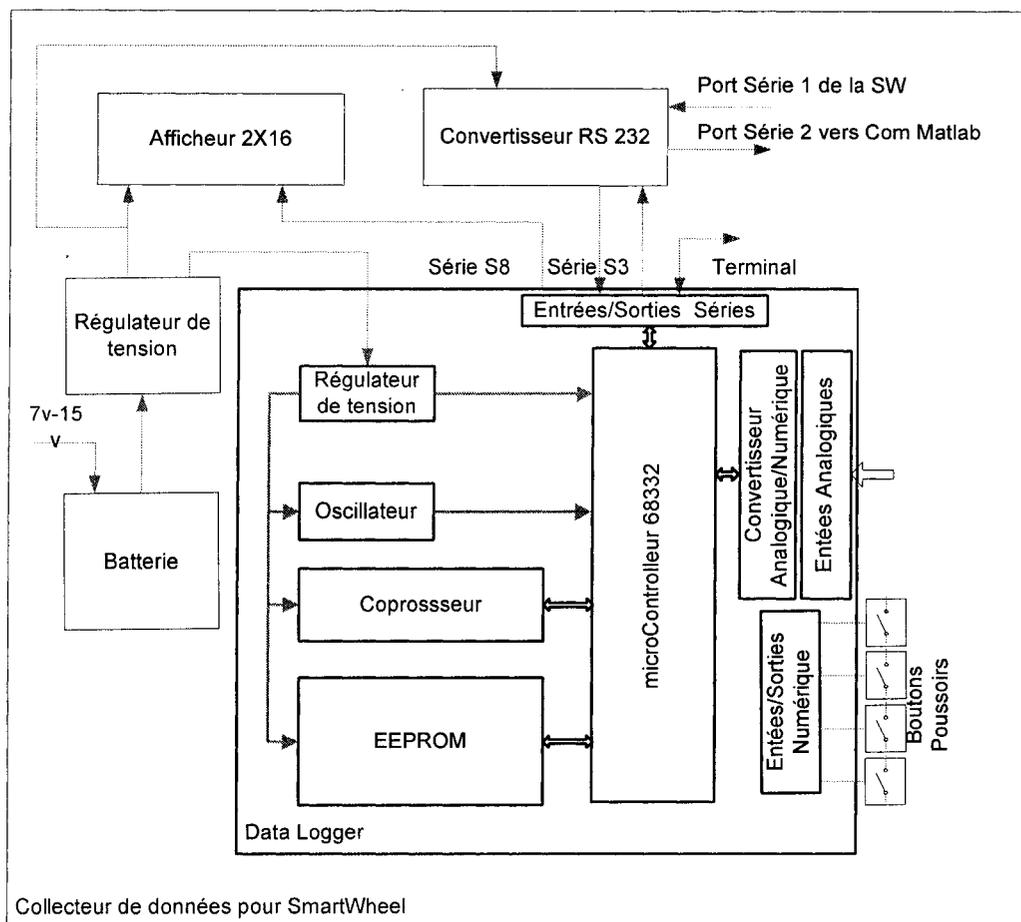


Figure 17 Synoptique du collecteur de données pour la SmartWheel

### 3.3 Étude de l'enregistreur de données Tattletale Modèle 8

#### 3.3.1 Introduction

Le but principal du design du modèle 8 est de minimiser sa taille. Il est composé de plusieurs sous-ensembles, une fois programmé selon l'application requise, il fonctionne d'une manière autonome, avec un encombrement réduit. Il est composé physiquement de deux cartes superposables, l'une supportant tous les composants actifs de l'enregistreur de données, voir figure 17, et l'autre, appelée I/O-8, servant de support pour les lignes

d'entrée et sortie. Les deux parties sont reliées par deux connecteurs de 16 pins (A1-A16) et de 20 pins (B1-B20) voir annexe 1.

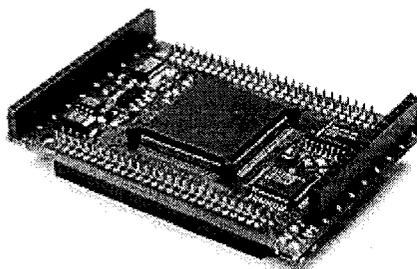


Figure 18 Photo du l'enregistreur de données Tattletale modèle 8 (TT8-1Mv2)

L'enregistreur de données est formé des blocs fonctionnels donnés dans la figure 18 :

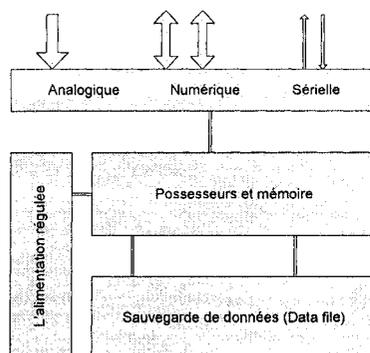


Figure 19 Schéma fonctionnel de l'enregistreur de données Tattletale modèle 8 (TT8-1Mv2)

### 3.3.2 Le microcontrôleur MC68332

Le cœur de l'enregistreur de données est le microcontrôleur de Motorola MC68332 opérant sur un format de 32 bits, ayant quatre ports (Port C, Port E, port F, et Port QS) de 8 bits multiplexés, il est composé essentiellement des blocs suivants (Harman, 1991) :

- Unité centrale de traitement (CPU32 Central Processing Unit);
- Unité traitement du temps (TPU : Time Processor Unit);
- Module intégration système (SIM : System integration module);
- Module de communication série (QSM : Queued Serial Module);

### **3.3.2.1 Unité centrale de traitement (CPU32 Central Processing Unit)**

L'unité CPU gère tout les activités du MC68332, elle initialise les modules qui opèrent indépendamment du CPU pour la plus part des opérations, et elle manipule les mots de 32 bits. Le traitement des données comporte en résumé le chargement des variables, les calculs, les tests, et la sauvegarde des résultats. L'unité CPU opère sur des registres internes et des emplacements mémoire avec différent type d'adressage. Cette unité utilise des ports pour la communication avec l'environnement externe.

### **3.3.2.2 Unité traitement du temps (TPU : Time Processor Unit)**

L'unité de traitement du temps, la TPU, est l'élément principal après le CPU32 du microcontrôleur. Elle possède 16 canaux bidirectionnels. Elle permet la génération d'une variété de signaux d'horloge, d'impulsions pour la commande de périphériques externes tels que des moteurs, des timers, en entrée. Elle est capable de faire la lecture et la mesure des périodes de signaux externes.

### **3.3.2.3 Module intégration système (SIM : System integration module)**

Le module intégration système détermine l'état du contrôleur après une remise à zéro. Il est composé de plusieurs sous modules tel que le synthétiseur d'horloge qui génère les horloges du système, le timer d'interruption, le sélecteur de boîtier (Chip-Select Outputs).

### **3.3.2.4 Module de communication série (QSM : Queued Serial Module)**

Le module de communication série a pour fonction d'interfacer le microcontrôleur et toute dispositif externe communiquant en mode série. Il est composé de deux blocs :

- Port de communication série synchrone (QSPI): Queued Serial Peripheral Interface : Ce port contrôle les entrées /sorties synchrone série à haute vitesse;

- Interface de communication série (SCI): Serial Communication Interface: Elle contrôle les entrées /sortie série en mode asynchrone à bas débit. Elle comporte deux ports séries indépendants.

### **3.3.3 Le coprocesseur PIC16C64**

Le coprocesseur PIC16C64 est un microcontrôleur CMOS 8 bit (Micochip technology Inc) destiné essentiellement à mettre le 68332 en mode éveil après des périodes d'inactivité. Dans cette étape le coprocesseur prend le contrôle de l'enregistreur de données.

### **3.3.4 L'oscillateur HA7210**

Le circuit HA7210 est un oscillateur a cristal à faible puissance, de Intersil Americas Inc., fournissant une fréquence cadencée à 40 KHz. De cette fréquence de base le microcontrôleur génère des fréquences dérivées. Ces horloges sont indispensables pour aux différents modules du microcontrôleur. Le Tattletale peut fonctionner à des fréquences qui oscillent entre 0,16 MHz à 40 MHz.

### **3.3.5 Les interfaces d'entrée et sortie**

Pour pouvoir communiquer avec le monde extérieur l'enregistreur de données est muni d'interfaces :

- Les entrées analogiques;
- Les entrées / sorties numériques.

#### **3.3.5.1 Les entrées analogiques**

Le microcontrôleur MC 68332 n'est pas équipé d'interface pour la lecture des entrées analogiques, pour cela un convertisseur analogique numérique MAX 186 a été ajouté.

Il permet la conversion de huit signaux multiplexés ayant une amplitude entre 0 et 5v avec un temps de conversion de 6 $\mu$ s. Le Convertisseur CAN délivre les données converties sous le format série synchrone, le MC68332 utilise son interface QSPI pour l'acquisition et la sauvegarde des données ainsi numérisées.

### **3.3.5.2 Les entrées / sorties numériques**

L'enregistreur de données dispose de 25 lignes ou canaux numériques qui sont configurables soit en entrée soit en sortie. En entrée, ces canaux peuvent être utilisés pour le comptage d'événements et de transitions, pour la mesure de périodes et la détermination de l'état d'une ligne. En sortie, on utilise ces canaux pour la génération de signaux à différentes fréquences et à des temps précis avec des états de transition spécifiques.

Ces canaux sont composés de treize lignes du module TPU du microcontrôleur MC68332. Ces lignes sont multiplexées avec les ports du CPU32. On utilise alors cinq bits du port D, six bits du port E et deux bits du port F. Les lignes TPU peuvent être programmées comme interface série à hauts débits.

L'utilisation des entrées analogiques nécessite l'emploi de circuits de protection contre les charges statiques. L'enregistreur de données possède deux ports série de l'interface SCI, des UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) à bas débit dont une est utilisée par le terminal pour la programmation de l'enregistreur de données.

### **3.3.6 La mémoire**

La mémoire est divisée en deux types :

- Une mémoire vive RAM de 1Mo destinée à héberger, les variables et constantes utilisées dans le programme de l'utilisateur ainsi que les données collectées, adressable séquentiellement, appelée le " Datafile";
- Une mémoire morte effaçable (EEPROM) de 256Ko pour héberger le programme source de l'application et l'interpréteur TxBasic du Tattletale.

### **3.3.7 Programmation de l'enregistreur de données**

L'enregistreur de données, le Tattletale doit être programmé par un langage de programmation propriété de Onset Computer corp, le TxBasic. Il est développé sur la base du langage Basic. Il offre des commandes évoluées variées écrites en microcode donnant accès aux fonctionnalités du microcontrôleur MC68332. Un éditeur simple TxTools offrant l'édition, le chargement des programmes, la vérification syntaxique et le lancement de l'interpréteur.

#### **3.3.7.1 Le jeu de commandes du TxBasic**

Les commandes du TxBasic peuvent être regroupées en :

- Commandes de stockage dans le datafile;
- Commandes de lecture dans le datafile;
- Fonctions arithmétiques et de contrôle;
- Commandes des entrées et sorties numérique;
- Commande des entrées analogiques;
- Commandes d'horloge;
- Commandes du module TPU.

Le chargement du TxBasic vers l'EEPROM de l'enregistreur de données est présenté en annexe 2.

### 3.4 Conception de l'instrumentation

Afin que le dispositif à concevoir soit capable de faire l'acquisition et la lecture du flux de données envoyé par la roue SmartWheel, il faut que celui-ci soit doté d'interfaces électriques indispensables ayant un format adéquat et une capacité mémoire suffisante pour sauvegarder les données durant toute la période des essais. Le signal électrique que délivre la roue SmartWheel sera le point de départ de l'étude du dispositif embarqué.

#### 3.4.1 Analyse du signal d'entrée

Le chronogramme du signal fournit par la SmartWheel est représenté en figure 20:

- Il est généré par la SmartWheel en tout temps, il n'y a aucun contrôle lors de l'émission;
- Il est composé d'une suite de bits de 1.18 ms suivie d'un arrêt de 2.98ms, le tout est répété chaque 4.16 ms correspondant à une fréquence de 240 Hz qui est la fréquence d'échantillonnage de la SmartWheel. De cette façon la roue émet pendant 1.18 ms un paquet de données issues des canaux échantillonnés et mis en série. Cet envoi est périodique.
- Les données sont encapsulées dans un format série (voir annexe 3).

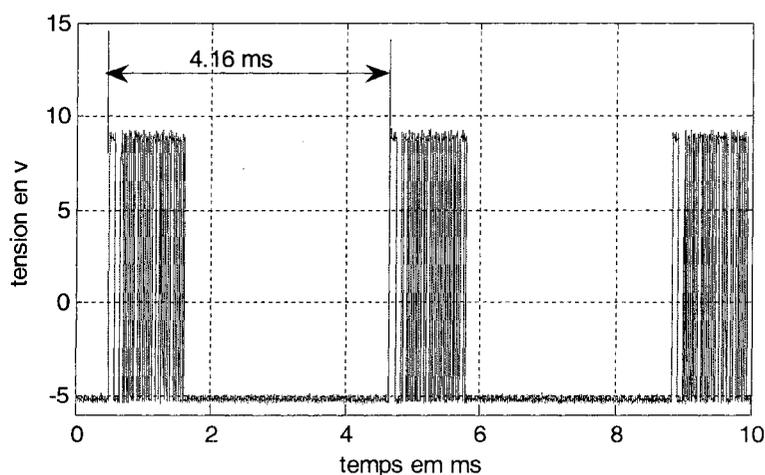


Figure 20 Signal série envoyé par la SmartWheel

Pour que ce signal puisse être lu par le microcontrôleur, on a besoin de le rendre électriquement compatible. En effet les signaux série destinés à être connectés aux ports des ordinateurs (le cas du récepteur infrarouge de la roue SmartWheel) ont des niveaux de tension de  $-5\text{v}$  à  $+12\text{v}$  compatible avec la norme V28 de UIT (l'Union Internationale des Télécommunications) voir annexe 3.

#### **3.4.1.1 Caractéristiques du signal série**

En déterminant la durée en temps d'un seul bit, on peut trouver la vitesse de transmission à laquelle le flux de données est envoyé. Du moment que le signal est asynchrone, aucune horloge n'est disponible. En mesurant la durée d'un bit à l'intérieur du paquet envoyé par l'oscilloscope, celui-ci dure 8.7 microsecondes correspondant ainsi à une vitesse de 114 942 bits/s. La vitesse normalisée la plus proche normalisée est 115 200 bits/s (qui donne une durée d'un bit de 8.68 microsecondes). Le format utilisé pour l'envoi est résumé dans le tableau III :

Tableau III

Format utilisé par la liaison série de la SmartWheel

Caractéristique	Format
Vitesse de transmission (bits/s ou bauds)	115 200
Taille de la donnée (bits)	8
Parité	0
Bit de stop	1
Control DTR	désactivé
Control RTS	désactivé

Chaque paquet envoyé est composé de 12 octets dont le format est donné à la figure 21 :

- Un (01) octet qui est un zéro indiquant le début de la salve;
- Dix (10) octets pour l'information utile dont :
  1. Huit (08) octets utilisés pour le calcul des canaux v1 à v6;
  2. Deux (02) octets pour la mesure d'angle de rotation de la roue.
- Un (01) octet utilisé comme un index qui s'incrémente de 0 à 255.

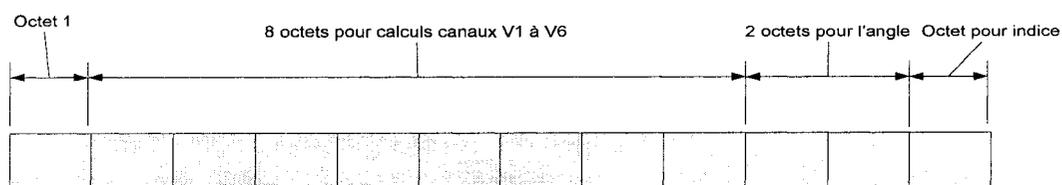


Figure 21 Format du paquet des données envoyées par la SmartWheel à une fréquence de 240 Hz

### **3.4.2 Circuit pilote RS 232**

Le format TTL est compatible avec les interfaces de l'enregistreur de données, il est défini par un "0" binaire correspond un 0 volt et un "1" binaire correspond à 5volts. L'utilisation d'un convertisseur de niveau est alors nécessaire. Ce circuit fait alors la transformation des signaux émanant du récepteur infrarouge de la roue ayant des niveaux de tension de  $\pm 10$  volts (format RS232) à des signaux ayant un format TTL.

#### **3.4.2.1 Le choix du convertisseur RS232**

Dans le marché il existe plusieurs convertisseurs assurant cette fonction, notre choix s'est porté sur le MC145407 de Motorola Inc pour deux raisons :

- Il englobe 6 convertisseurs (3 pour la réception et 3 pour l'émission) dans un seul boîtier de 20 broches;
- Il permet de générer deux tensions symétriques  $\pm 10$ v par le biais d'un habillage de condensateurs chimiques autour de son oscillateur. Ces tensions seront utilisées pour l'alimentation en courant du récepteur infra rouge.
- Il est alimenté par une seule source de courant +5v.

#### **3.4.2.2 Description du convertisseur RS232**

Le convertisseur RS232 est destiné à adapter des signaux ayant un format série TTL avec une amplitude variant de 0 à 5v en un format série V28 ayant une amplitude  $\pm 10$ v et inversement. Il opère avec une alimentation unique de +5v. Il est équipé d'un doubleur de tension, pour délivrer les tensions symétriques  $\pm 10$ v à partir du 5v, et d'un inverseur internes, il peut générer une tension symétrique. Il est composé de trois conditionneurs d'émission et trois récepteurs voir figure 22.

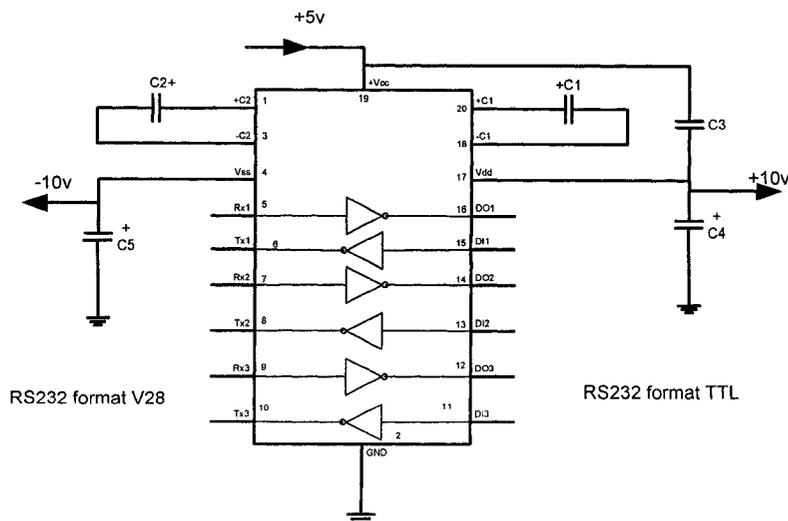


Figure 22 Convertisseur RS232 MC145407

Le signal émanant de la roue est injecté dans l'entrée 5, Rx<sub>1</sub>, pour le récupérer à la sortie 16, DO<sub>1</sub>, du MC145407 sous format TTL. Tel que mentionné précédemment, le récepteur infrarouge de la SmartWheel exige une alimentation symétrique pour son fonctionnement (alimentation de la diode infra rouge réceptrice, l'amplificateur et l'UART), sans quoi le signal série sera absent. Les liaisons sont représentées dans la figure 23.

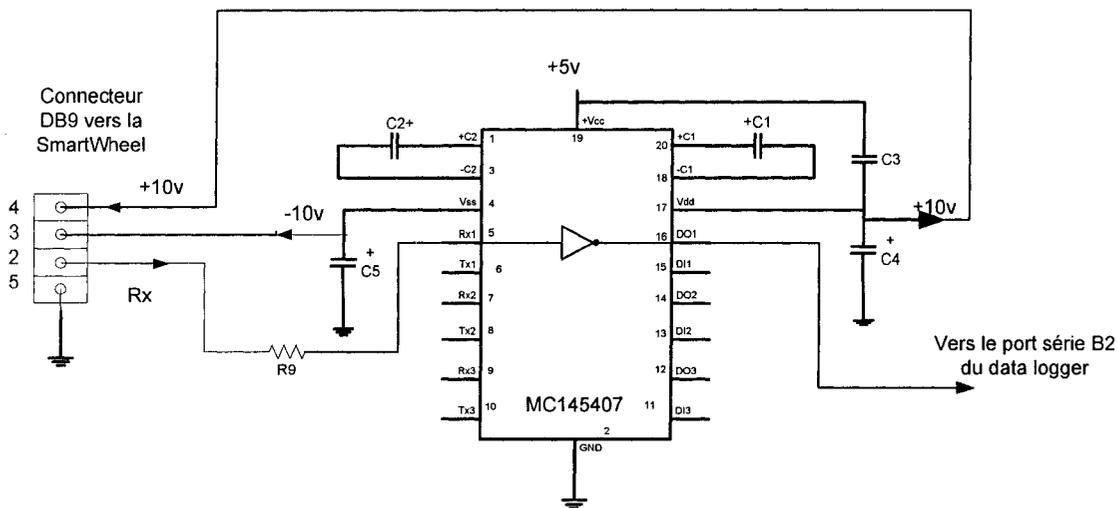


Figure 23 Câblage du convertisseur MC 145407

Les signaux de control de communication qui gère habituellement les transferts série "Hand Shaking", ne sont pas fonctionnels, la SmartWheel envoie en continue des paquets de données chaque 4.16 ms, qui est la période d'échantillonnage ( $f_e = 240.385 \text{ Hz} = \frac{1}{4.16} 10^3 \text{ Hz}$ ). Le signal série transformé peut être injecté dans une ligne d'entrée numérique. On utilise une ligne du module TPU du microcontrôleur.

### 3.4.3 Conception des entrées / sorties

Une fois que le noyau de la collecte est implémenté et que les limites de l'enregistreur de données sont cernées, il reste à définir l'interface utilisateur à adopter. La solution est de poser à l'utilisateur des questions simples avec des réponses à choix multiple. Le tous à l'aide d'un afficheur à liquide cristallisé (LCD) et quatre boutons poussoirs en périphérie tel que le montre la figure 24. Selon le choix de l'utilisateur, des menus correspondants seront proposés.

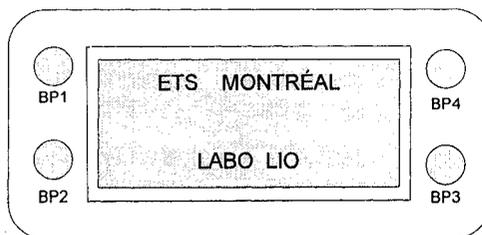


Figure 24 Schéma de l'afficheur LCD

#### 3.4.3.1 L'afficheur LCD

Contrairement aux afficheurs LCD graphiques les afficheurs alphanumériques obéissent à des règles au niveau de leurs signaux et même de leurs brochages, les plus courants sont à deux lignes de seize caractères (2X16c). L'afficheur employé est un afficheur série de chez Crystalfontz Inc 632 v2 possédant un microcontrôleur autonome. Pour

minimiser le nombre de broches l'afficheur reçoit les commandes et les données sur une entrée série, voir Annexe 4.

Le port série de l'afficheur LCD est utilisé pour pouvoir communiquer avec l'enregistreur de données. Toutefois une conversion de niveau est indispensable. Le port "Data\_in" de l'afficheur utilise un format V28 avec des tensions de  $\pm 10\text{v}$  et l'enregistreur de données dispose d'interface série en format TTL. On utilise une ligne du driver RS232 le MC145407. La figure 25 donne les connexions de l'afficheur.

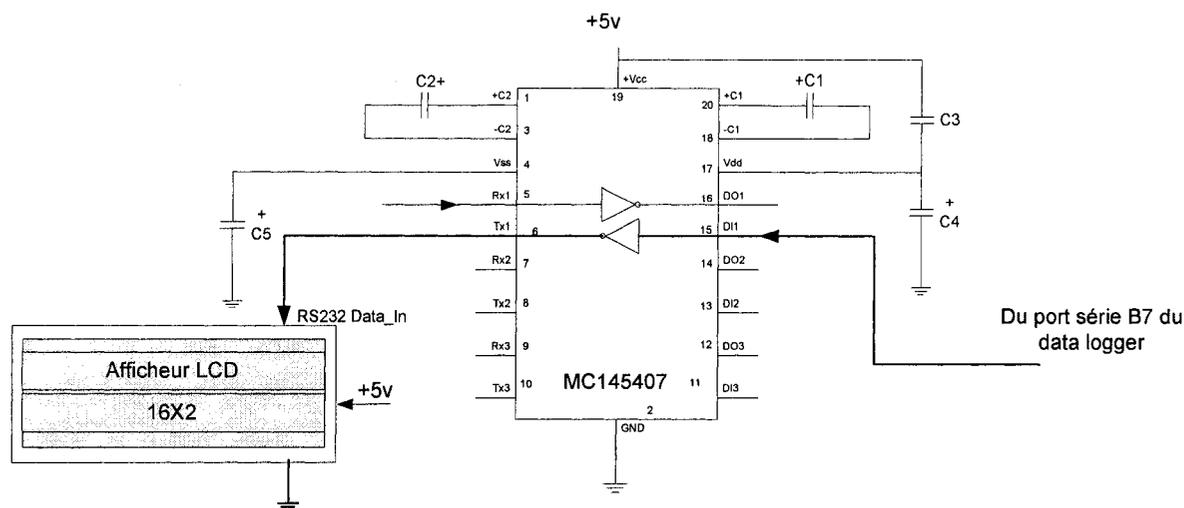


Figure 25 Connexion de l'afficheur 16X 2

### 3.4.3.2 Les boutons Poussoirs

Le fait de proposer à l'utilisateur des menus avec des questions à choix multiples exige de ce dernier la sélection du choix par boutons poussoirs. Chaque bouton est disposé aux abords des débuts et fins des deux lignes d'affichage de telle manière que chaque bouton représente un choix possible. On affecte à chaque bouton poussoir une entrée numérique de l'enregistreur de données. Par la scrutation de ces lignes d'entées on dirige le programme de gestion selon l'évolution des choix de l'utilisateur. Le circuit d'entrée est identique pour les quatre boutons poussoirs.

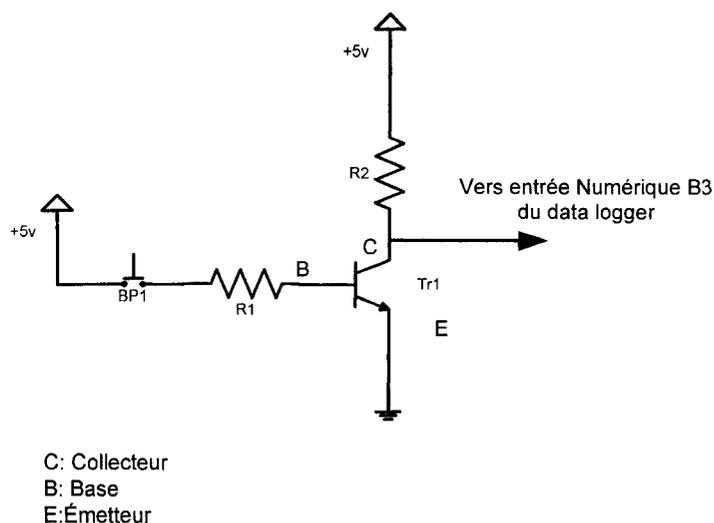


Figure 26 Circuit d'entrée

On utilise un transistor NPN, voir figure 26, en mode commutation, il est commandé par une impulsion de courant de base par le biais du bouton poussoir BP<sub>1</sub>. Il passe de l'état bloqué, définit dans les conditions où la tension entre collecteur et émetteur est égale à presque à la tension d'alimentation et où le courant du collecteur est presque nul, à l'état saturé, définit par une tension collecteur émetteur presque nulle et un courant de collecteur maximale.

La résistance R<sub>1</sub> régule le courant de base maximale, la résistance R<sub>2</sub> régule le courant de collecteur maximale. En fermant le bouton poussoir BP<sub>1</sub>, on sature le transistor, la tension qui va à l'enregistreur de données est presque nulle. En relâchant le BP<sub>1</sub>, le courant de base est nul, le transistor passe en état bloqué. La tension de sortie est en état haut +5v. Ce circuit permet de protéger les entrées numériques des perturbations de tension causées par le bouton poussoir.

#### 3.4.4 L'alimentation

L'enregistreurs de données exige une tension d'alimentation de 7 à 15v continue, on utilise une batterie rechargeable de 9.6v et 1250 mAh, pour le besoin des autres circuits

tel l'afficheur, les circuits d'entrées, le convertisseur RS232, on utilise +5v obtenu par l'intermédiaire d'un régulateur de tension le MC7805, qui délivre une tension stable de 5v à 1A avec une entrée maximale de 35v.

### 3.4.5 Mise en boîtier

Le montage électrique a été testé ainsi que les procédures de lecture des données en provenance de la roue SmartWheel. Le dispositif doit être mis dans un boîtier compact. On a choisit un boîtier en plastique (voir figure27).

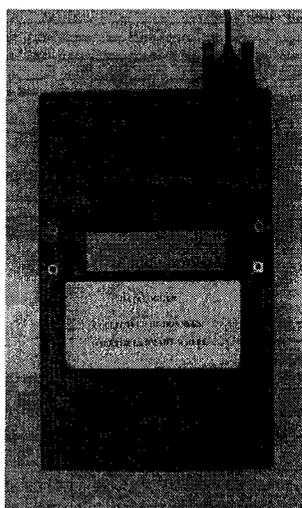


Figure 27 Photo du collecteur de données issues de la SmartWheel

#### 3.4.5.1 Le circuit imprimé

Une plaque principale regroupant les circuits, mesure 100mm x 60 mm. Elle est fixée dans le boîtier à l'aide de vis écrous en plastique. Le circuit a été réalisé sur une plaque multipoints cuivrée individuellement, la disposition est donnée en annexe 4. Les connexions sont réalisées par enroulement "Wrapping". La figure 28 montre le schéma électrique général du collecteur de données.

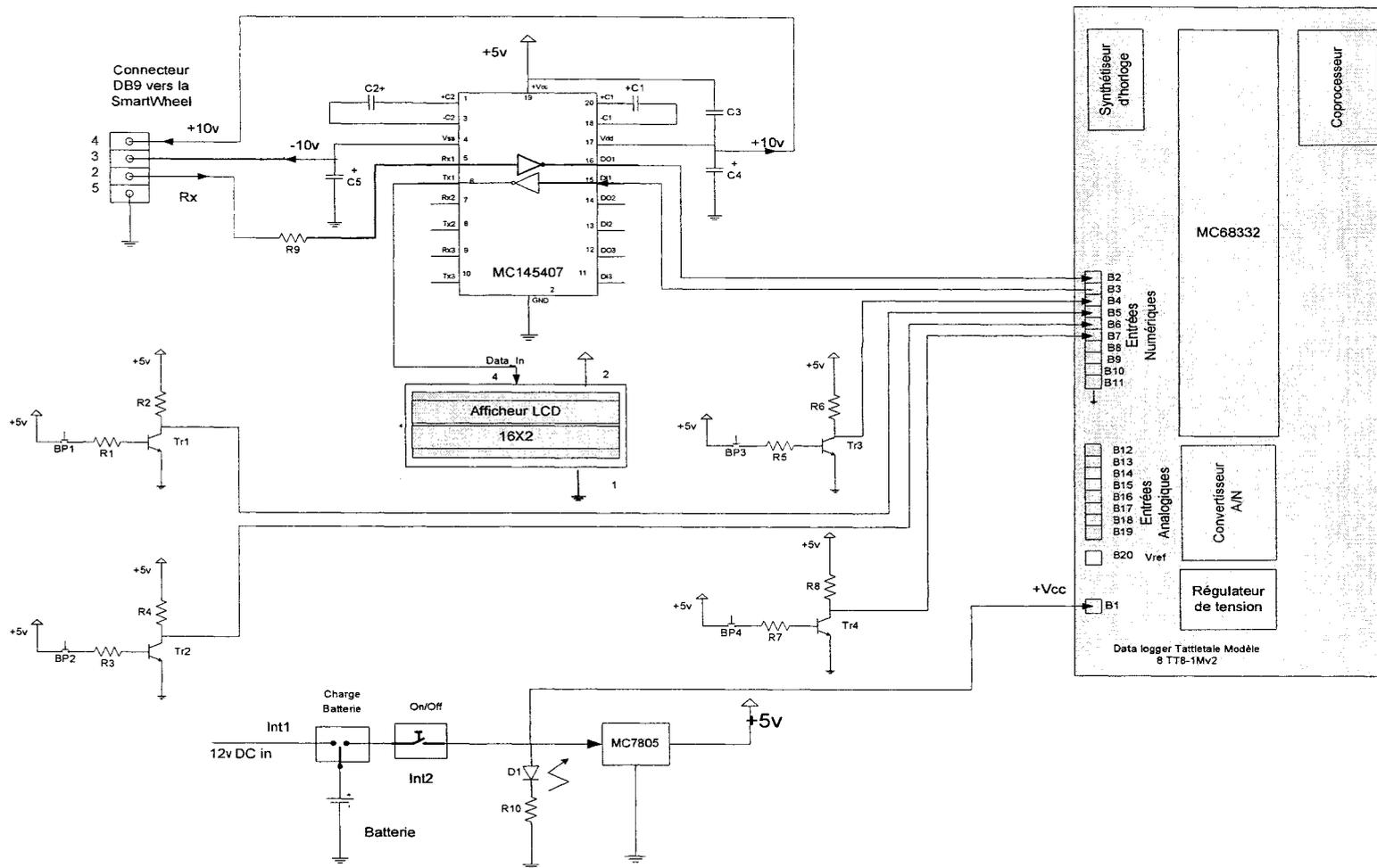


Figure 28 Schéma électrique du collecteur de données pour la roue SmartWheel

### 3.4.6 Le récepteur Infrarouge

Pour que le système soit du type embarqué, il faut que le récepteur infrarouge, décrit dans le paragraphe 2.2.2, suit le déplacement de la roue, faute de quoi, une perte de données aura lieu. Comme l'émetteur infrarouge est fixé à la roue, il dispose d'une ouverture permettant le passage des rayons infrarouge voir figure 29. Cette fente, durant la rotation de la roue décrit un cercle, le faisceau décrit un cône désaxé. Une fixation du capteur à la structure du fauteuil a été réalisée par le biais d'une lame en aluminium, voir figure 29.

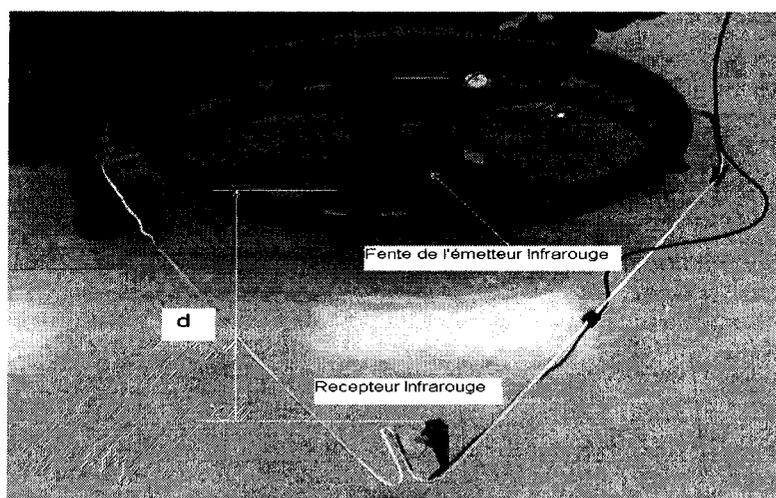


Figure 29 Photo de la fixation de récepteur infrarouge sur la roue SmartWheel

Une distance minimale "d" entre l'émetteur et le récepteur est requise pour que le récepteur reste dans le champ de l'émetteur. Cette distance minimale a été évaluée en utilisant trois différentes méthodes de collecte de données à partir d'essais de propulsion stationnaires :

- L'utilisation du logiciel fourni avec la roue le SmartWheel Interface (SWI) qui fait la collecte de canaux;
- En raccordant directement la roue à un ordinateur, une routine en Matlab fait la collecte directement;

- En utilisant l'appareillage développé : le collecteur de données.

Il a été remarqué que les trois méthodes citées donnent des erreurs et des pertes de données au cas où le récepteur est placé à une distance de moins de 45 cm. Ceci est dû au fait que l'émetteur infrarouge est muni d'un mouvement de rotation.

## CHAPITRE 4

### LA GESTION DU COLLECTEUR DE DONNÉES ET ROUTINES D'ANALYSE

#### 4.1 Gestion de l'enregistreur de données

##### 4.1.1 Réception des données

Tel que décrit précédemment, l'enregistreur de données, le data logger, dispose de deux interfaces série conventionnelles, dont la vitesse maximale de communication est 38 400 bauds, ce qui rend leurs utilisations pour la lecture des données du SmartWheel impossible, car l'émetteur est pré-réglé par le constructeur à une vitesse de 115 200 bauds (bits / secondes). Les premières étapes sont résumées dans l'organigramme de la figure 30.

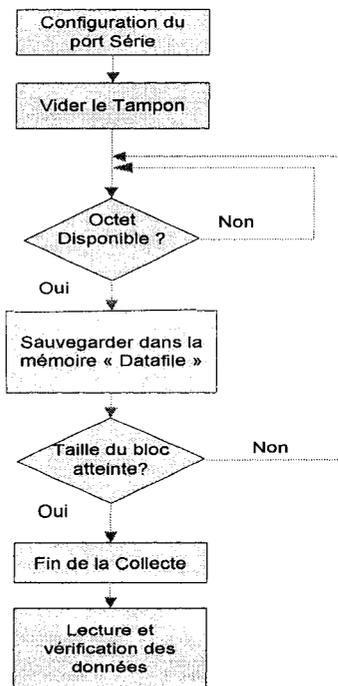


Figure 30 Organigramme de la routine de collecte de données par l'enregistreur de données

#### **4.1.1.1 Création du port série**

L'utilisation d'une entrée numérique dont dispose l'enregistreur de données pour simuler le port série. Elle offre le réglage de la vitesse de transmission à 115 200 bauds. L'enregistreur de données utilise les fonctionnalités du module TPU du microcontrôleur MC68332 pour émuler cette interface série.

À partir de l'instant où le signal série est envoyé en mode asynchrone, aucune horloge n'est disponible entre l'émetteur (la roue SmartWheel) et le récepteur (L'enregistreur de données Tattletale M8v2-1M). Cela signifie que le format programmé dans l'interface série doit être identique au format des données en émission.

#### **4.1.1.2 Mécanismes de gestion des entrées**

Dans la programmation du microcontrôleur la gestions des entrées et sorties se fait par la méthode de scrutation. Cette méthode consiste à ce que le microcontrôleur fasse en continue des demandes à ses périphériques sur l'apparition d'événements. Ces événements peuvent se résumer en un changement d'état sur une ligne Entrée/Sortie, ou la disponibilité d'un octet reçu par le port série ou la fin de l'émission d'un octet par la SCI (l'interface de communication série).

Ces événements sont signalés par le changement d'états de drapeaux (des bits de contrôle dans des registres internes spécifiques). De cette manière, le contrôleur demeure constamment occupé à la vérification des drapeaux correspondants à ces événements. Ce qui handicape la programmation et la mise en œuvre d'événements de haute priorité.

Le TxBasic, le langage de programmation du Tattletale Modèle 8 n'autorise pas la programmation en assembleur de l'enregistreur de données ni le mécanisme des interruptions, ce qui ne laisse au programmeur que l'utilisation de la méthode par scrutation.

#### **4.1.1.3 Lecture des entrées**

Les données sont lues octet par octet à partir du tampon du port série ainsi créé, et sont sauvegardées dans la mémoire RAM de l'enregistreur de données, il est destinée à recevoir les données dans un emplacement appelé "Datafile".

On utilise deux commandes TxBasic pour la vérification de la disponibilité de donnée et pour la sauvegarde. Ces fonctions utilisent les fonctionnalités du module TPU du microcontrôleur. Un résumé des fonctions TxBasic utilisées est donné en annexe 6.

#### **4.1.1.4 La vérification de la qualité des données**

Comme indiqué dans le paragraphe 2.3, une fois la procédure de mise en marche de la roue effectuée, la roue envoie en continue des paquets de données. La première tâche consiste à localiser le début des paquets, vérifier leurs continuités et leurs répétitivité.

Les premières essais se sont fait en immobilisant la roue et en exerçant un effort variable sur le cerceau. Ceci pour avoir un angle mesuré fixe durant la durée de l'acquisition cet angle est donné par l'encodeur optique de la SmartWheel. La vérification de la qualité des données reçus est faite en analysant deux paramètres inclus dans les données transmises :

- Analyse de l'octet 1;
- Analyse de l'angle de rotation de la roue;
- Analyse de l'index.

Chaque paquet envoyé se compose de 12 octets dont le premier est toujours nul. L'analyse de ce dernier en association avec l'analyse des octets représentant l'angle de rotation devront faciliter la localisation du début et de la fin du paquet. De ce fait il faut isoler les octets contenant l'information utile de l'effort et ceux contenant les octets des données correspondant à l'angle et l'index.

L'angle de rotation fixe pour un essai avec la roue immobilisée, sera donné par les octets 10 et 11. Il doit se répéter tous les 12 octets. L'analyse de l'index représenté par l'octet 12 contenu dans le paquet de données, doit s'incrémenter de 0 à 255 à chaque paquet. L'index est l'élément révélateur de la succession des données reçus. Un programme Matlab a été élaboré pour effectuer cette vérification de qualité des données.

D'après les premières essais et analyses des données stockées dans la mémoire vive de l'enregistreur de données, on a remarqué que le flux de données enregistrées présente un décalage d'index, donc une perte de données qui se produit après une certaine durée, supérieure à dix secondes d'enregistrement.

#### **4.1.1.5 Causes et remèdes**

Pour identifier si la perte de données s'est produite à l'émission ou à la réception, on a procédé de deux manières :

- La roue SmartWheel est connectée directement à l'ordinateur. Une routine de test sous Matlab, fait l'acquisition directe des données provenant de la roue sans interfacer le collecteur de données.
- Faire l'acquisition directe en utilisant le logiciel SWI (fournit avec la roue) pour la collecte des canaux.

L'analyse des données reçues montre que les paquets ont une taille constante de 12 octets, et l'analyse de l'angle et l'index révèle qu'aucun paquet n'est perdu. Il est à noter que les deux méthodes utilisent une interface série câblée. L'enregistreur de données utilise un port série émulé. La séparation, l'identification sont faite par programme. Le problème est donc du côté de l'enregistreur de données.

La taille de la mémoire tampon (buffer) de réception étant fixe, la roue SmartWheel dépose les octets dans ce tampon par une entrée, et l'enregistreur de données extrait les

données octet par octet par la sortie. La vitesse de lecture et de sauvegarde d'un octet de l'enregistreur de données dans le datafile est faible. Ceci est essentiellement dû au fait que le port série employé est un port émulé et non câblé, et aux temps d'exécution des commandes, utilisées pour l'émulation, qui sont écrites en microcode. Ceci provoque un retard entre l'écriture et la lecture des données dans le buffer.

Le remplissage successif du buffer aura lieu malgré l'opération de lecture (sortie des données). Un débordement du buffer apparaît causant un écrasement de donnée. (voir figure 31).

La roue SmartWheel envoie en permanence des paquets de données, si l'enregistreur de données n'arrive pas à lire et à vider le tampon de réception en un temps adéquat une perte d'information aura lieu. Une différence existe entre la disponibilité des données à l'entrée du tampon de réception et la vitesse de lecture de ces données par l'enregistreur à la sortie du tampon. Deux solutions ont été envisagées pour éviter ce problème :

- L'augmentation de l'horloge de l'enregistreur de données de 4 MHz à 40MHz;
- La diminution de la vitesse de transmission de la roue, cette option était impossible à réaliser (une note du constructeur de la SmartWheel Three Rivers inc).

Une fois la fréquence de l'horloge augmentée, le temps maximum de collecte obtenu, sans perte de données, est de 55 s ce qui correspond à 158 400 octets ( $12 \text{ octets} \times 240 \text{ Hz} \times 55\text{s}$ ) reçus sans perte d'index. Ceci conditionne l'utilisation de l'enregistreur de données avec des mesures maximales de 55s pour chaque essaie. La performance du système est dictée par les limitations du matériel.

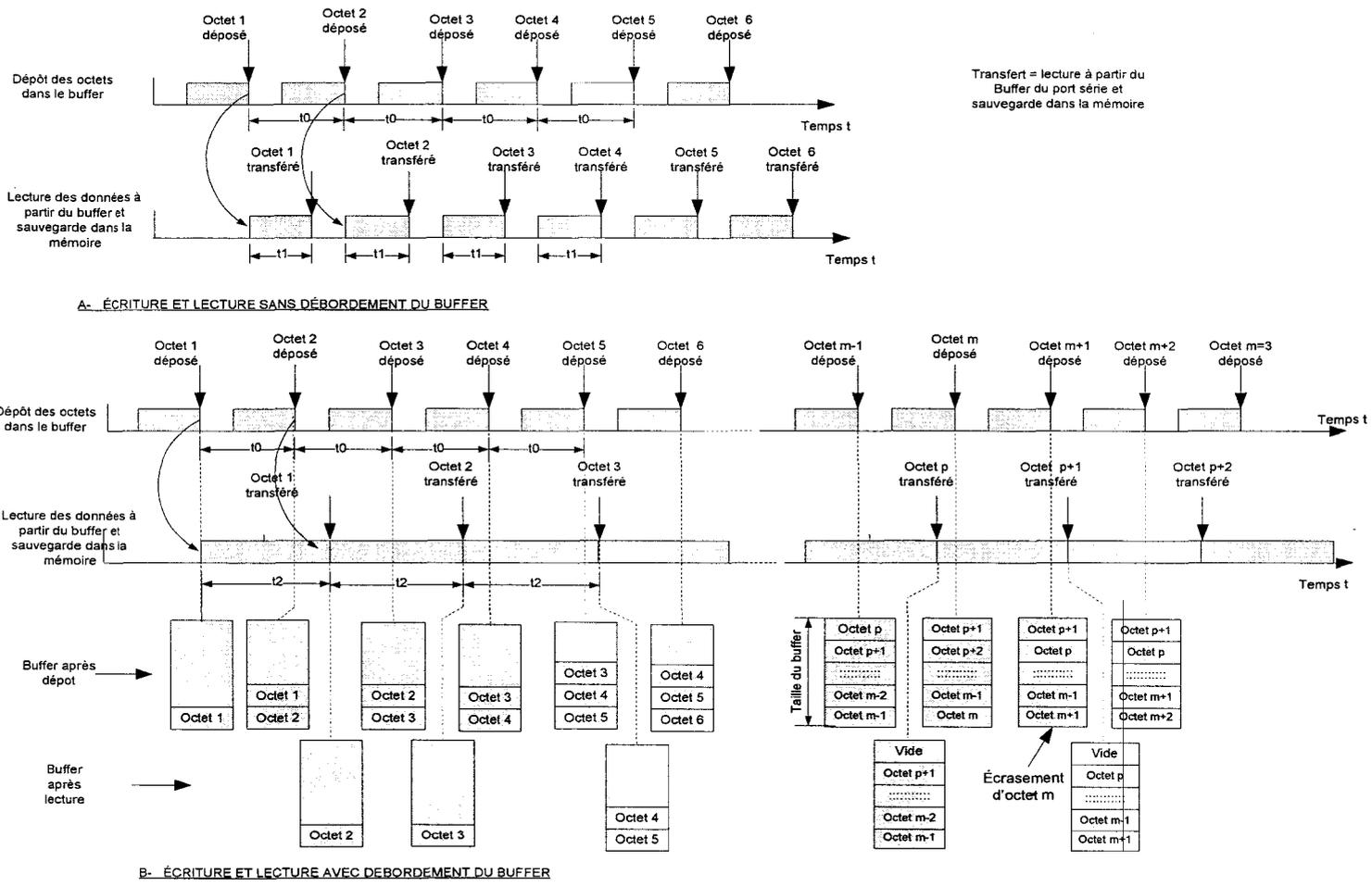


Figure 31 Diagrammes d'écriture et de lecture des données du buffer du port série du data logger

L'ensemble de la gestion de la réception de l'enregistreur de données est donné dans la figure 32.

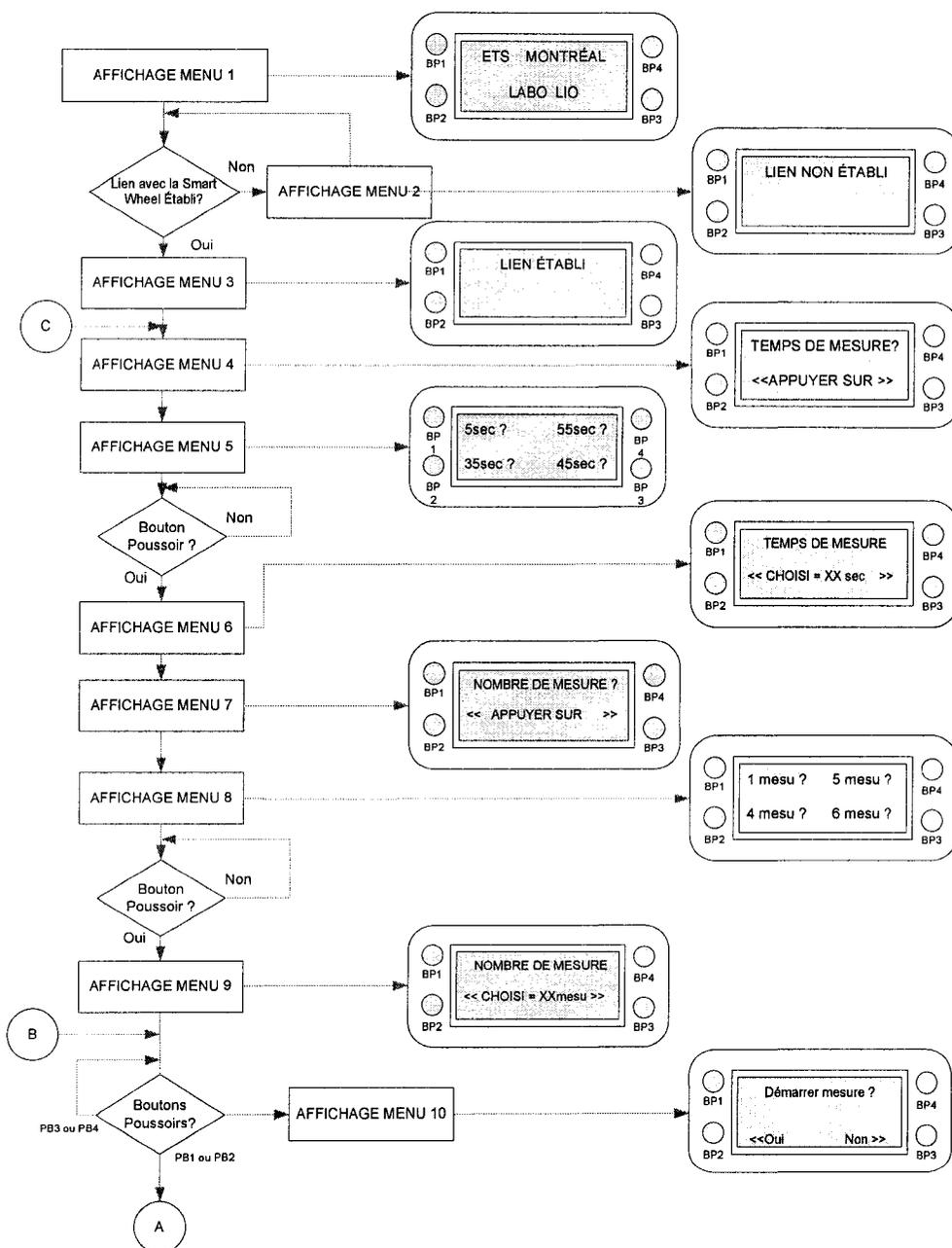


Figure 32 Organigramme de la gestion de la réception par le dispositif de collecte de données

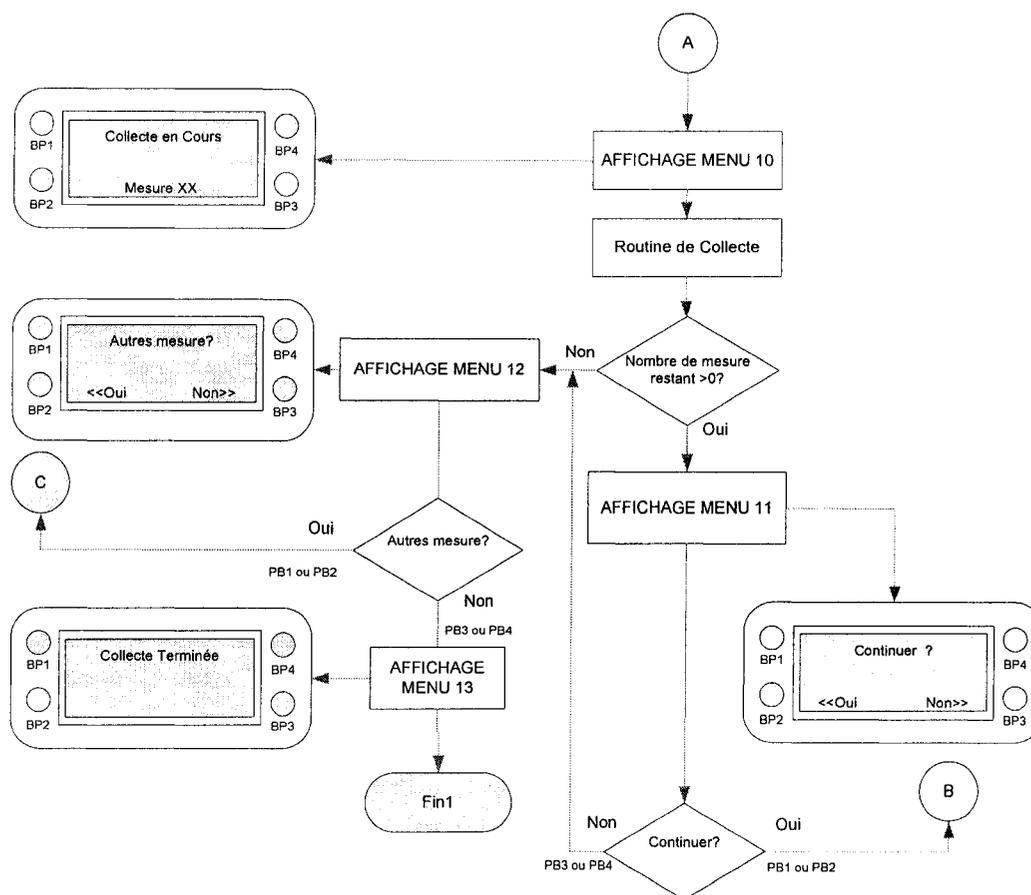


Figure 32 (Suite)

#### 4.1.2 Émission des données vers l'ordinateur

Une fois les données stockées dans l'enregistreur de données, à la fin de l'acquisition des essais de la propulsion, elles seront envoyées à l'ordinateur pour fin d'analyse par des programmes Matlab. On utilise le port série 2 de l'enregistreur de données. Les données sont envoyées par paquet de taille qui varie en fonction du temps de mesure et du nombre d'essai choisis lors de l'acquisition.

Pour éviter la perte des données lors de l'envoi entre l'enregistreur de données et l'ordinateur, un mécanisme de contrôle de la connexion du récepteur est élaboré. Il se

résume en un envoi de caractères spécifiques dans les deux sens. L'émission ne commence que si un accusé de réception est reçu par l'enregistreur de données.

## **4.2    Routines d'analyse**

### **4.2.1    Détection de début du paquet de données**

L'évaluation des efforts se fait à partir des données envoyées à l'enregistreur de données. L'analyse de ces données est réalisée par des routines écrites sous Matlab. Ces données sont envoyées par paquet. Chaque paquet a une taille fixe de 12 octets, dont le début est repéré par un octet qui est toujours nul. Les premiers octets enregistrés peuvent faire partie d'un paquet incomplet (qui contient moins de 12 octets). La répétitivité des séquences nous renseigne sur l'inaltération des données.

Ces routines s'assureront qu'aucun décalage de données n'existe. On procède alors par la détection du début du premier paquet en analysant l'octet 1 qui est nul. L'analyse de l'octet 12 représentant l'index, qui est un octet dont la valeur s'incrémente par pas de 1, d'un paquet à un autre. Cet index qui varie de 0 à 255 nous renseigne sur la répétitivité des séquences. Ces deux octets contenus dans chaque paquet nous permettent de décider sur l'existence d'une perte de données et sur leurs enchaînements. La figure 33 donne une représentation des données enregistrées, à gauche, et à droite des données ayant subi une analyse pour la détection du début et fin de trame.

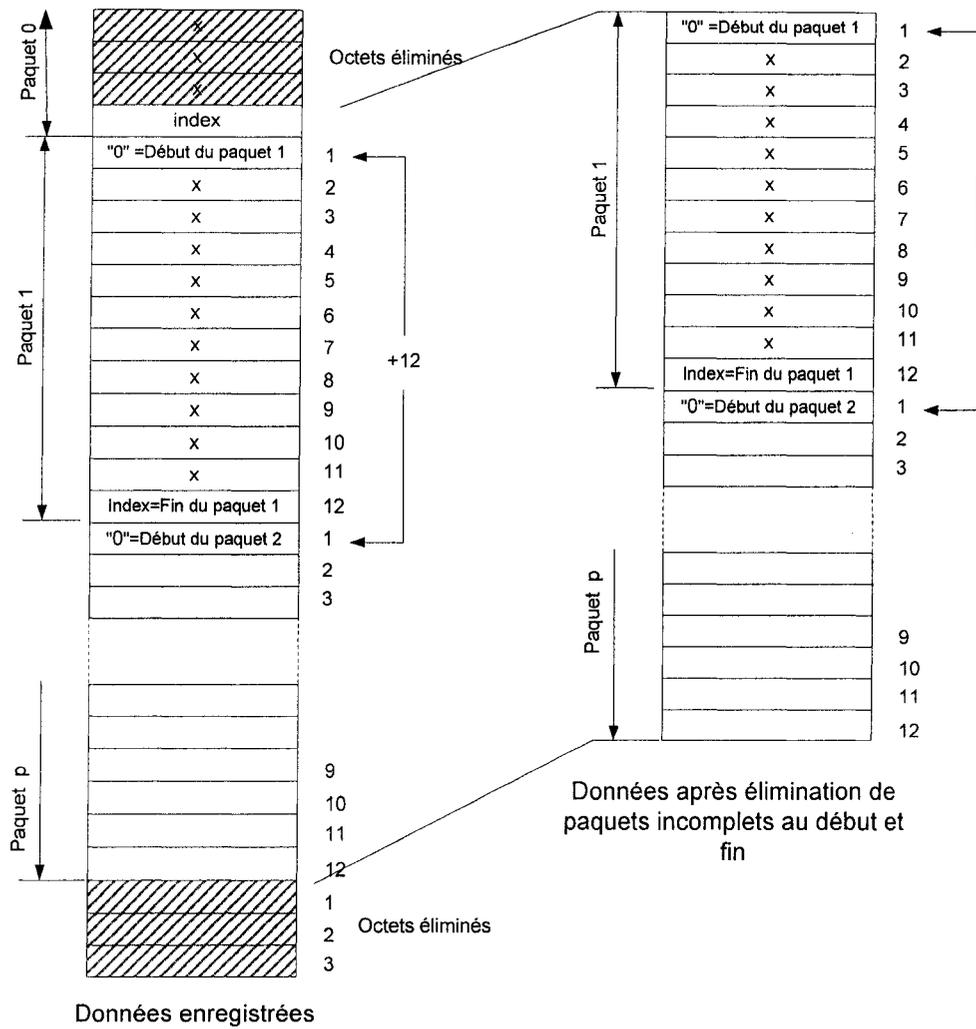


Figure 33 Détection de début de la trame des données

#### 4.2.2 Reconstitution des tension de sorties des ponts de mesure

Les tensions de sorties des six ponts de mesure  $v_1$  à  $v_6$ , appelées aussi les canaux, sont codées sur 10 bits, sont contenus dans 8 octets : de l'octet 2 à l'octet 9 dans la trame. Pour les reconstituer, les six premiers octets représentent les 8 bits fort des canaux, les

octets 7 et 8 contiennent les 2 bits additionnels pour chaque canal respectivement voir figure 34.

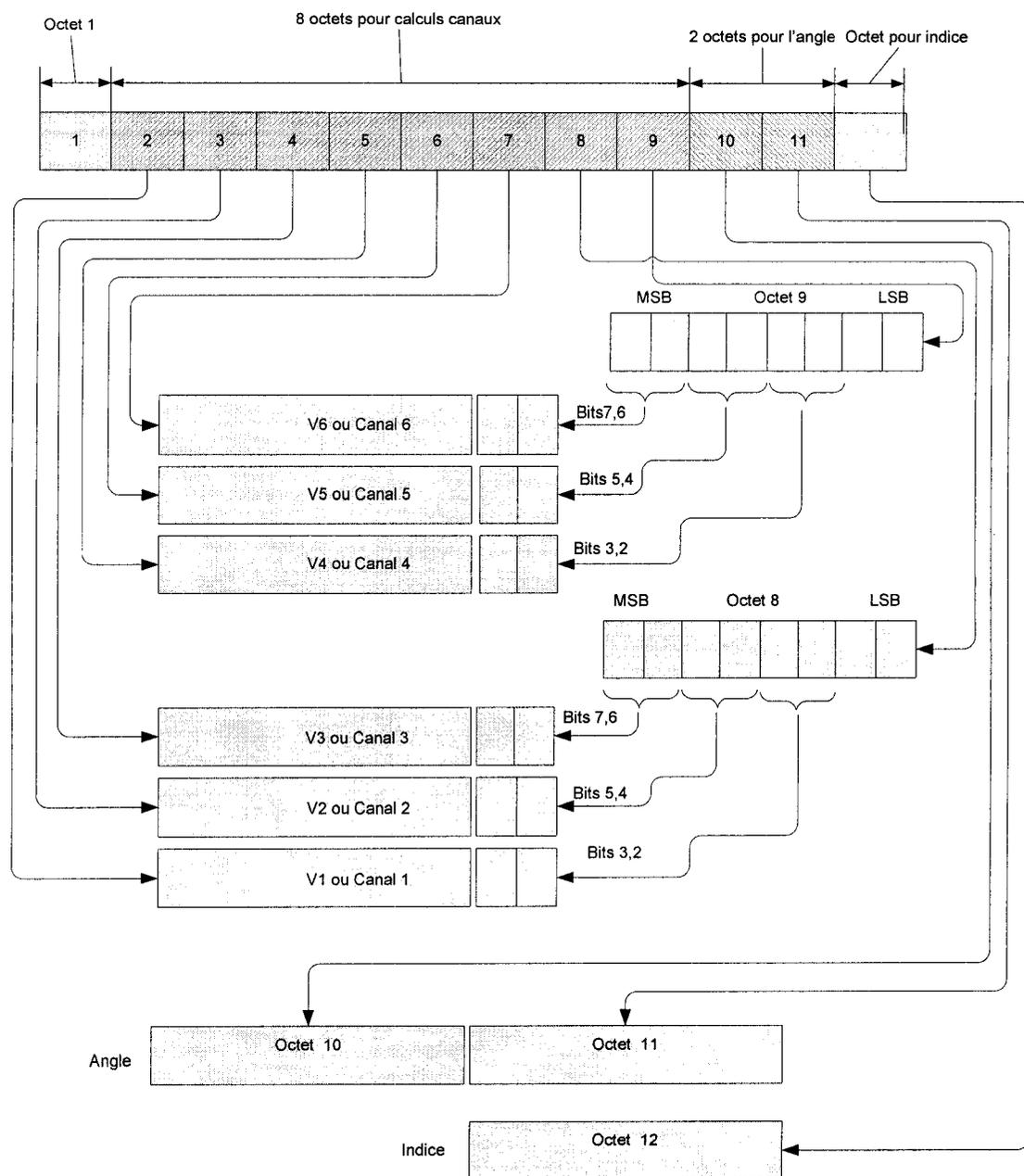


Figure 34 Reconstitution des canaux, angle et index à partir de la trame

### 4.2.3 Calcul des forces et moments

#### 4.2.3.1 Définition du repère

Le repère utilisé dans la représentation des forces et des moments [O X Y Z] (voir figure 35) est défini par :

- O : centre de la roue;
- X : axe de progression de la propulsion selon le déplacement;
- Y : axe vertical inférieur – supérieur;
- Z : axe médial latéral sortant de la roue.

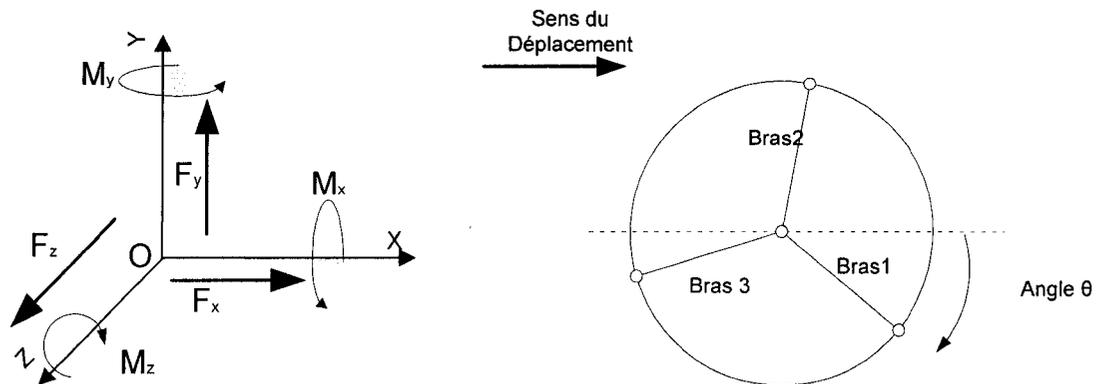


Figure 35 Définition du repère associé à la SmartWheel

Les forces sont définies dans l'espace 3-D [x y z] par :

- $F_x$  : le long de la ligne de progression de la propulsion selon l'axe x;
- $F_y$  : inférieur -supérieur selon l'axe y;
- $F_z$  : médial latéral sortant de la roue selon l'axe z.

Les moments sont définies dans les repère [x y z]

- $M_x$  : Moment produit au niveau du cerceau autour de l'axe x;
- $M_y$  : Moment produit au niveau du cerceau autour de l'axe y;
- $M_z$  : Moment produit au niveau du cerceau autour de l'axe z.

Les équations, données par le constructeur de la SmartWheel, reliant les tensions de sortie des ponts de mesure ( $v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6$ ) aux forces et aux moments sont :

$$\begin{aligned}
 F_x &= k_{11} \left( v_1 \sin(\theta) + v_3 \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + v_5 \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + k_{12} \\
 F_y &= k_{21} \left( v_1 \cos(\theta) + v_3 \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + v_5 \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + k_{22} \\
 F_z &= k_{31} (v_2 + v_4 + v_6) + k_{32}
 \end{aligned} \tag{2.15}$$

Les moments  $M_x, M_y, M_z$  sont données par :

$$\begin{aligned}
 M_x &= k_{41} \left( v_2 \sin(\theta) + v_4 \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + v_6 \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + k_{42} \\
 M_y &= k_{51} \left( v_2 \cos(\theta) + v_4 \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + v_6 \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + k_{52} \\
 M_z &= k_{61} (v_1 + v_2 + v_3) + k_{62}
 \end{aligned} \tag{2.16}$$

Où la matrice de calibration  $K =$

$$\begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \\ k_{31} & k_{32} \\ k_{41} & k_{42} \\ k_{51} & k_{52} \\ k_{61} & k_{62} \end{bmatrix} \tag{2.17}$$

La matrice  $K$  est obtenue par l'entremise de la procédure de calibrage. On définit  $\theta$  comme étant l'angle entre le bras 1 (le bras de référence) et le plan horizontal voir figure 35.

## CHAPITRE 5

### BIOMÉCANIQUE DE LA PROPULSION EN FAUTEUIL ROULANT MANUEL

#### 5.1 Introduction

La propulsion manuelle en fauteuil roulant constitue un effort important et exigeant pour la musculature des membres supérieurs. Ainsi, l'évaluation des forces musculaires générées et transférées au niveau des surfaces articulaires constitue en elle-même un thème de recherche futur à explorer dans le domaine de la réadaptation et de la prévention. La modélisation biomécanique tridimensionnelle de la propulsion manuelle en fauteuil roulant permettra à terme d'identifier quels muscles jouent un rôle important dans la génération de la force autour du complexe de l'épaule et ceux qui sont responsable de sa stabilisation. Il est bien admis aujourd'hui que la déstabilisation des muscles rotateurs au niveau de l'épaule peut être responsable de la dégénérescence de la structure acromio-claviculaire (l'articulation acromio-claviculaire est définie par l'extrémité externe de la clavicule avec une expansion de l'omoplate appelée acromion).

L'analyse de la propulsion est subdivisée en trois catégories : le design du fauteuil roulant, les capacités intrinsèques de l'utilisateur, et enfin l'interaction entre l'utilisateur et le fauteuil roulant. Dans cette dernière catégorie, l'évaluation des forces et des moments de réactions au niveau de la main courante devient primordiale. L'analyse de ces forces représente le premier jalon d'une analyse plus importante : celle musculosquelettique. Le corps humain, et spécialement les parties entrant dans le processus de propulsion seront modélisés comme un mécanisme multiélément, dans lequel les segments corporels sont les éléments de la chaîne. Les articulations entre les segments sont les jointures du mécanisme, et les muscles seront considérés comme des actionneurs qui en se contractant accélèrent les segments du mécanisme.

Les études biomécaniques se concentrent principalement autour des mécanismes de blessures au niveau des trois articulations (poignet, coudes et épaule). Au cours des dernières décennies, les recherches ont contribué considérablement à la compréhension du travail du membre supérieur durant la propulsion (R.A. Cooper, 1990). Les recherches ont démarré initialement plus d'un point de vue mécanique en se concentrant sur les matériaux, la durabilité, la sécurité (Peizer ED, Wright D, & H, 1964). Aussi, les intérêts de la modélisation biomécanique en fauteuil étaient orientés vers l'utilisateur et les conséquences sur sa santé (R.L. Brauer & B.A. Hertig, 1981; Roger L. Brauer & Bruce A. Hertig, 1981; R.A. Cooper et al., 1997; Rory A. Cooper, Robertson, VanSickle, Boninger, & Shimada, 1996; Rodgers et al., 1994; Ruggles et al., 1994; Sanderson & Sommer, 1985). Les douleurs au poignet et à l'épaule sont très courantes chez les utilisateurs de fauteuil roulant. La prévalence de ces douleurs peut atteindre la valeur élevée de 50% au niveau de l'épaule (Sie, Waters, Adkins, & Gellman, 1992). L'étude récente de Boninger et al. (M. L. Boninger et al., 2002) montre des résultats similaires sur la prévalence de la douleur à l'épaule qui se situe entre 31% et 73%.

## **5.2 L'analyse par dynamique inverse**

L'approche la plus souvent utilisée pour estimer les efforts à l'épaule est la modélisation par un modèle de dynamique inverse. Cette méthode prend comme point de départ la connaissance du mouvement résultant, ainsi que les efforts externes. À partir de là, les forces et les moments générateurs du mouvement qui sont appliqués par les structures internes des segments (poignet, coude et épaule) seront estimées. L'analyse est en général récursive c'est-à-dire que les efforts estimés à l'articulation proximale d'un segment corporel sont totalement transmis à la partie distale du segment adjacent.

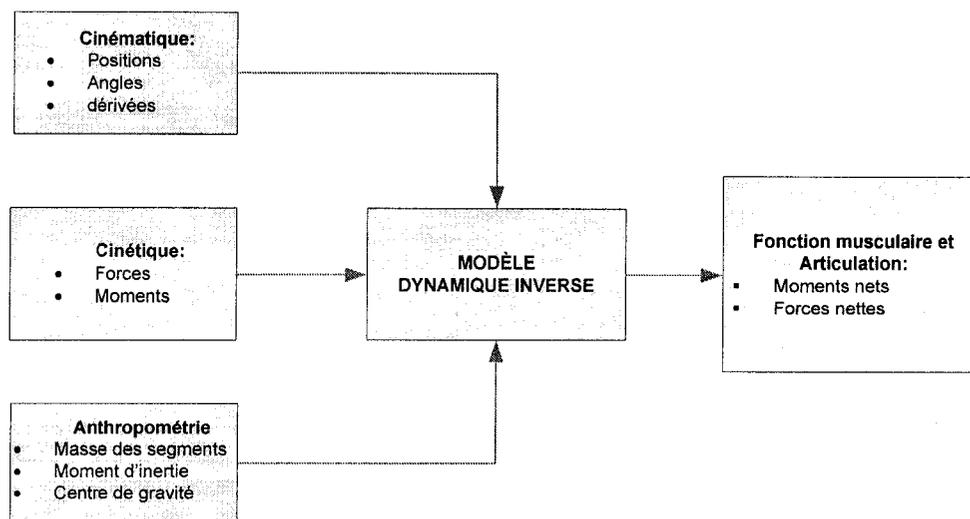


Figure 36 Schéma du modèle de dynamique inverse

Les entrées d'un modèle de dynamique inverse (fig. 36) comprennent :

- Les mouvements segmentaires qui se résument par les données cinématiques du sujet à savoir les positions de points particuliers sur les segments. Les déplacements angulaires inter segmentaires ainsi que leurs dérivées (i.e. les vitesses et accélérations linéaires et angulaires). La cinématique est souvent mesurée grâce à des systèmes optoélectroniques à marqueur actif (système Optotrack, NDI inc.) ou passif (VICON, Vicon Oxford Metrics).
- Les forces et les moments de réactions qui s'exercent sur la main courante. Ces données dynamiques sont mesurées par des dispositifs dynamométriques spécialisés (voir chapitre 1);
- Les données anthropométriques qui représentent les caractéristiques inertielles des segments corporels : à savoir la masse segmentaire, la position du centre de gravité du segment par rapport au point proximal, ainsi que le moment d'inertie du segment par rapport à ses axes principaux dans l'espace 3D. Ces données sont souvent estimées grâce à des tables anthropométriques obtenues par des modèles de régressions statistiques.

La sortie du modèle de la dynamique inverse sont les moments et les forces de réaction articulaires des segments proximaux (Rory A. Cooper et al., 1996; Rodgers et al., 2000) : à savoir le poignet, le coude et l'épaule. Ces moments représentent les actions combinées des différentes structures musculaires autour de chaque articulation (L. H. V. van der Woude, Veeger, Dallmeijer, Janssen, & Rozendaal, 2001).

Les résultats obtenus par plusieurs chercheurs sur la modélisation par la dynamique inverse, indiquent que le moment le plus élevé au niveau des articulations du membre supérieur est généralement produit autour de l'épaule. Elle constitue, en mode de propulsion manuelle, l'élément générateur de la puissance et du mouvement. Les moments maximaux au niveau de l'épaule sont regroupés dans le tableau IV (Desroches, Aissaoui, & Bourbonnais, 2006)

Tableau IV

Effort enregistré à l'épaule dans différentes études.

Tiré de (Desroches et al., 2006)

Auteurs	Nb de sujets	Population	Vitesse (m/s)	Terrain	Dispositif de mesure	Posture	Friction/ Puissance	rotation Interne / Externe (Nm)	Adduction / Abduction (Nm)	Flexion / Extension dans le plan sagittal (Nm)	Flexion / Extension dans le plan horizontal (Nm)
Veeger et al. (1991)	5	PV	1.11	Indis	E.E	Indis	0.25 & 0.5 W/kg	Indis	12.6 / Indis	21.5 / Indis	Indis
Robertson et al. (1996)	4	SCI (T4-T10)	0.67-	Indis	DyFRM (Quickie)	Indis	Indis	Indis	Indis	19.6 / Indis	Indis
	4	PV	0.89		SMART <sup>wheel</sup>					34.9 / Indis	
Kulig et al. (1998)	17	SCI (T10/L3)	SS	sol	E.E (Quickie) CJ	SP	Indis	5.8 / Indis	15.6 / Indis	Indis / 13.8	Indis
Kulig et al. (1998)	17	SCI (T10/L3)	SS	8% incliné	E.E (Quickie) CJ	SP	Indis	15.5 / Indis	21.3 / Indis	Indis / 30.7	Indis
Cooper et al. (1999)	6	SCI (T4+)	1.80	Indis	DyFRM (FRM propre), SMART <sup>wheel</sup>	FRM Personnel	Similar to floor	23.4 / 8.6	23.7 / 2.3	42.9 / 13.1	25.3 / 16.0
Veeger et al. (2002)	3	SCI (T11)*	0.83	Indis	E.E	SP	10 to 20 W	8.0 / Indis	Indis / 7.4	15.6 / Indis	Indis
Koontz et al. (2002)	10 F	SCI (T1-)	0.90	Indis	E.E (FRM propre) SMART <sup>wheel</sup>	FRM Personnel	Indis	21.6 / 2.3	21.3 / 2.2	28.6 / 3.9	10.9 / 6.7
Koontz et al. (2002)	10 F	SCI (T1-)	1.80	Indis	E.E (FRM propre) SMART <sup>wheel</sup>	FRM Personnel	Indis	31.9 / 4.6	31.1 / 5.1	36.5 / 7.1	21.0 / 10.5
Lin et al. (2004)	5 M	PV	Indis	Indis	Walkway (FRM standard) Roue type Wu	Indis	Indis	0.4 / 2.2	7.0 / 9.5	16.0 / 9.8	Indis
Desroches, Aissaoui, & Bourbonnais, 2006)	7 F 7 M	UFRM âgés	0.96- 1.01	0 %	E.E (FRM propre) SMART <sup>wheel</sup>	AIS: 0, 5, 10 deg. SBA: 95, 100, 110 deg.	14 ± 4 N 22.4 ± 1.1 W	7.5/1.7	4.6/3.9	15.9/2.1	4.9/1.5

(\*) : Lesion incomplete et joueurs de basketball

P.V. : Personne Valide

E.E. : Ergomètre Experimental

F, M : Femelle, Male

FRM: Fauteuil Roulant Manuel

UFRM: Utilisateur de Fauteuil Roulant Manuel

Indisp: Indisponible

SBA: Seat to Back Angle

SCI : Spinal Cord Injury

(Blessure du cordon spinal)

SP: Sélectin Propre

AIS: Angle d'inclinaison du siège

W: Watt

DyFRM.: Dynamomètre Fauteuil Roulant

Manuel

CJ : Capteur de force à jauges de contraintes

### 5.3 Cycles de propulsion

La propulsion en fauteuil roulant est un mouvement cyclique, comme la locomotion humaine. Le cycle de propulsion est divisé en deux phases voir figure 37 (Sanderson & Sommer, 1985):

- Phase de poussée : ou phase d'appui (PP) est la partie propulsive du cycle. Elle est définie comme étant la phase de génération de la force, le transfert de l'énergie du propulseur vers la roue quand la main est en contact avec la main courante de la roue. C'est la phase active, elle représente environ 35% de la durée du cycle contre 60% du cycle dans la marche (R. A. Cooper, 1990; Sanderson & Sommer, 1985; L. H. V. van der Woude, Veeger, Rozendaal, & Sargeant, 1989);
- Phase de relâche, de récupération ou aérienne : elle est définie comme étant la phase de non propulsion (passive) lorsque la main quitte le cerceau de la roue pour se repositionner en arrière pour effectuer à nouveau une phase de poussée. L'articulation du coude est généralement en extension (R.A. Cooper et al., 1995).

#### 5.3.1 Paramètres temporelles

D'un point de vue temporel, on définit le temps de cycle comme le temps que dure un mouvement de propulsion et il est composé de :

- PT (Push time) : temps de poussée. Les études utilisant l'approche cinématique (où l'enregistrement du mouvement se fait par voie vidéo), définissent le temps de poussée comme étant le temps durant lequel la main est en contact avec la main courante. Alors que pour l'approche cinétique, le temps de poussée est défini par la durée pendant laquelle une force est appliquée sur la main courante ;

- RT : temps de récupération ou de relâche durant laquelle la main après avoir lâché la main courante de la roue est amenée en arrière à la position de départ.

La durée du cycle CT est défini par la somme de PT et RT.

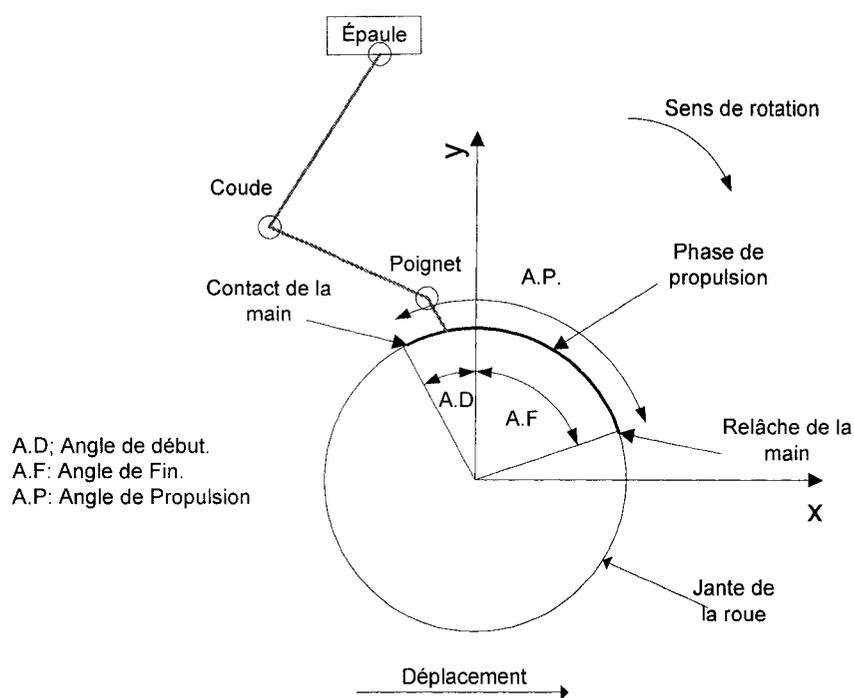


Figure 37 Cycle de propulsion durant la phase de poussée

### 5.3.2 Les patrons de la propulsion

Durant la phase de poussée la main se déplace selon une trajectoire définie par un arc du cerceau de la roue. Cependant les styles de propulsion se différencient essentiellement dans la phase de relâche. Les patrons de propulsion sont généralement étudiés en suivant la trajectoire d'un marqueur fixé sur la main. Sanderson et al. (Sanderson & Sommer, 1985) ont été les premiers à s'intéresser aux patrons cinématiques de la propulsion manuelle. Dans leur étude portant sur 3 sujets paraplégiques, ils ont définis deux patrons de propulsion : à savoir la technique du pompage et celle circulaire. La technique est dite

circulaire si la trajectoire formée par la main dans le plan sagittal ressemble à un contour elliptique arrondi. La technique de pompage se résume en un style court et brusque, obtenu en général lorsque la main demeure sur le cerceau pendant la phase de relâche. Veegeer et al. (Veegeer, Vanderwoude, & Rozendal, 1989) ont analysés la cinématique de cinq sujets valides en suivant la trajectoire d'un marqueur situé sur le troisième métacarpe (Os du squelette de la paume de la main lié d'une part avec le doigt, le majeur et avec les os du carpe d'autre part : MCIII). Ils ont trouvés les même patrons que ceux décrits antérieurement et de manière très qualitative par Sanderson et al. (Sanderson & Sommer, 1985).

Shimada et al. (Shimada, Robertson, Boninger, & Cooper, 1998) ont définis trois type de patrons de propulsion, dans une étude sur sept sujets expérimentés :

- Semi-circulaire : reconnu par un retour de la main en dessous du cerceau de la roue suivant approximativement un demi cercle;
- Simple boucle le long de la propulsion (Simple looping Over propulsion SLOP) identifié par les mains surélevées dans la phase de rappel;
- Double boucle le long de la propulsion (Double looping Over propulsion DLOP) identifié par un patron décrivant la forme d'un huit couché, le retour de main croise la trajectoire du cerceau de la roue.

Boninger et al.. (M. L. Boninger et al., 2002) ont identifié un quatrième patron portant le nom de " arcing ". Au fait ce dernier ressemble beaucoup à la technique de pompage décrite par Sandersson et al.. (1985). Le patron de type " arcing " est définit par une forme d'un arc que décrit le marqueur analysé dans la phase de rappel. La main ne quitte presque pas le cerceau de la roue durant tout le cycle de propulsion.

#### 5.4 Forces de réaction sur la main courante

Les caractéristiques des forces appliquées au cerceau de la roue du fauteuil roulant varient d'un sujet à l'autre, mais présentent des particularités constantes indépendantes des autres variables de propulsion. Les forces de réaction sont collectées ici par la roue SmartWheel, et un exemple de forces enregistrées par le système d'acquisition développé et décrit dans ce mémoire est montré à la figure 38.

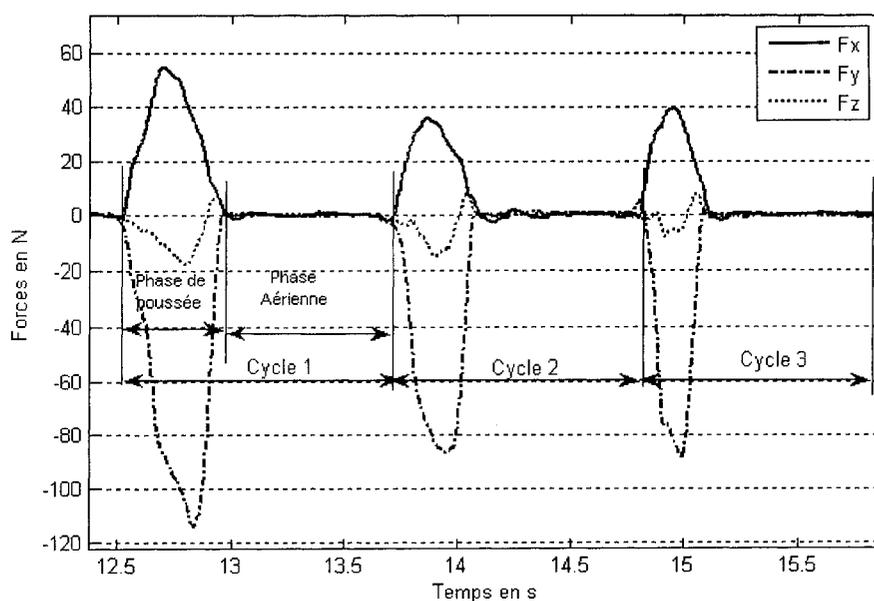


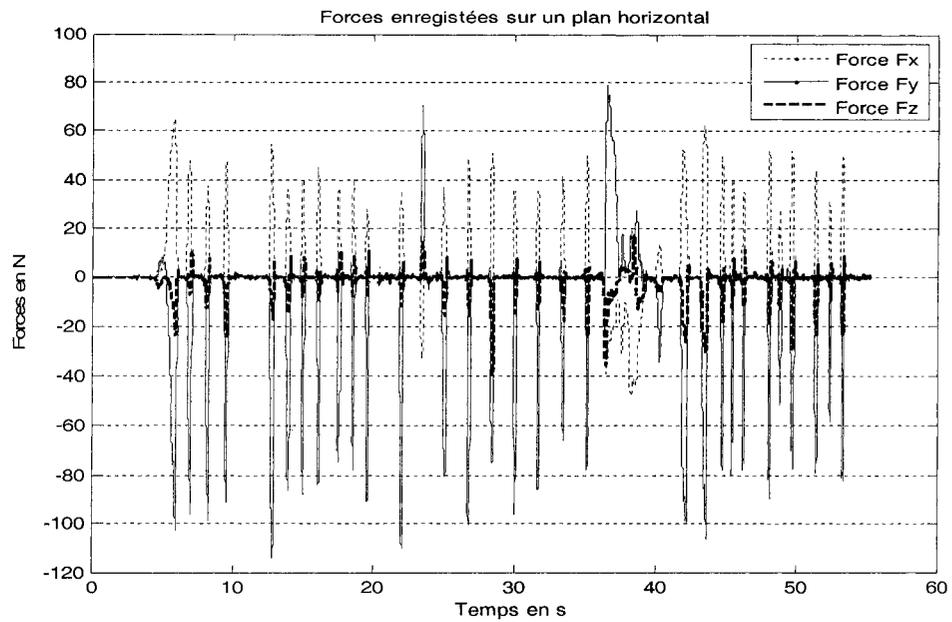
Figure 38 Forces ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) de réaction sur la main courante

Les forces mesurées dans les trois dimensions, dans le système de coordonnées de la roue sont représentées dans la figure 39 sur un plan horizontal (A) et sur une pente de 1/10 (B),  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$  sont combinées pour donner  $F_{tot}$ .

$$\vec{F}_{tot} = \vec{F}_x + \vec{F}_y + \vec{F}_z \quad (5.1)$$

$$F_{tot} = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (5.2)$$

A



B

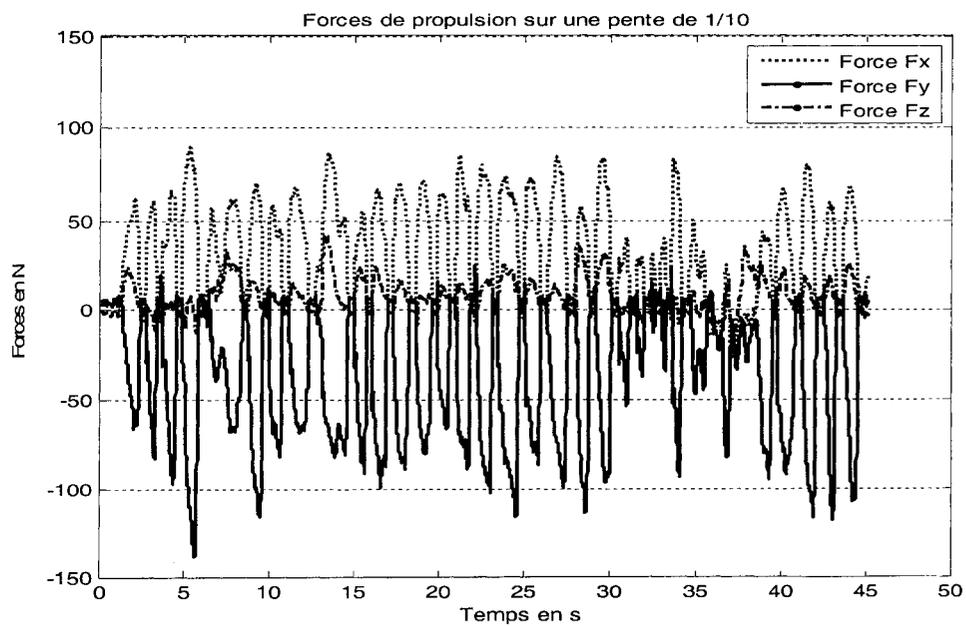


Figure 39 Forces appliquées par la main sur le cerceau de la roue (A : sur un plan horizontal, B sur une pente 1/10).

### 5.4.1 Efficacité de la propulsion

Les forces de propulsion peuvent être obtenues dans un repère radial, tangentiel et axial. La force tangentielle  $F_t$  est la composante de force qui contribue directement dans le mouvement tandis que la composante radiale  $F_r$  crée la friction nécessaire à la prise du cerceau.

Veeger et al. ont vu l'importance d'isoler les composantes non tangentielles des composante tangentielles et ont introduit le terme de "fraction de force effective" ( $FEF$ ) comme un paramètre d'évaluation de l'efficacité, défini par le rapport de la composante tangentielle  $F_t$  de la force totale  $F_{tot}$  et cette dernière, l'efficacité est donné en pourcentage :

$$FEF = F_t |F_{tot}|^{-1} .100(\%) \quad (5.3)$$

Une force appelée effective, introduite par Veeger et al. , est calculée selon:

$$F_{eff} = F_x \cos(\alpha) + F_y \sin(\alpha) \sin(\beta) + F_z \sin(\alpha) \cos(\beta) . \quad (5.4)$$

- Où  $\alpha$  est déterminé par enregistrement vidéo. Il représente l'angle que fait le marqueur situé sur le deuxième métacarpe MCII par rapport la verticale;
- Où  $\beta$  est l'angle de cambrage (angle que fait le plan de la roue par rapport à la verticale, voir figure 40).

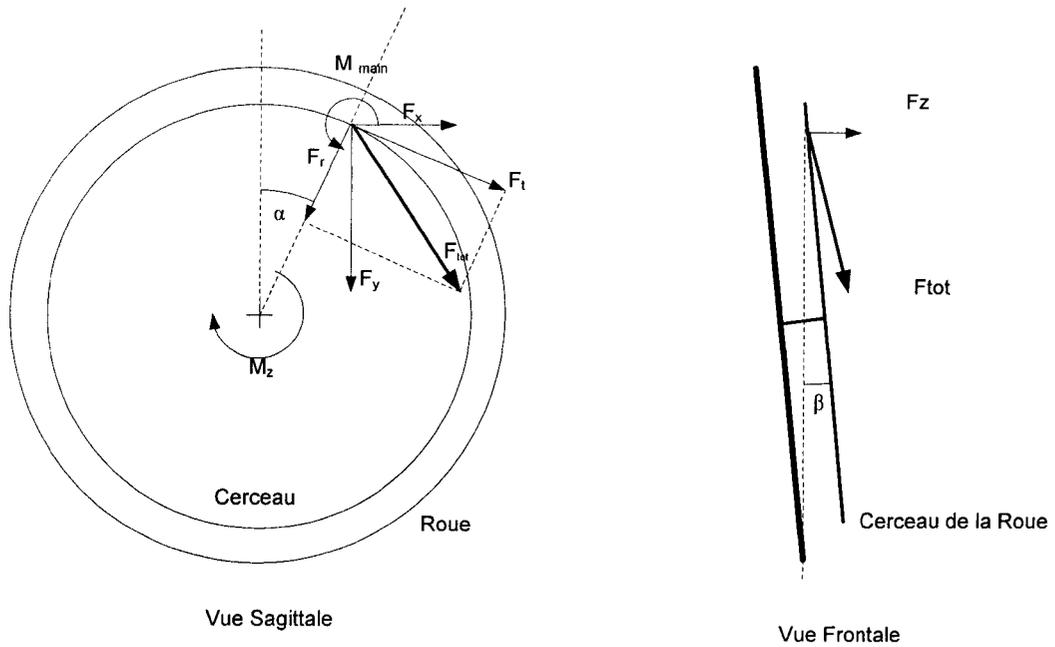


Figure 40 Illustration des forces et des moments sur le cerceau de la roue.

Un autre paramètre pour la mesure de l'efficacité de l'application de la force, comparable au  $FEF$ , a été introduit par Boninger et al. (M. L. Boninger, Cooper, Robertson, & Shimada, 1997). Le "Mechanical effective force ( $MEF$ )" donnant l'efficacité mécanique :

$$MEF = \frac{F_t^2}{F_{tot}^2} 100(\%) \quad (5.7)$$

Le tableau V donne les différentes valeurs des coefficients  $FEF$  et  $MEF$  dans la littérature.

Tableau V

Valeurs FEF et MEF dans différentes études

Auteurs	Sujets	Nombre de sujets	Dispositif	FEF en % (Écart Type)	MEF en % (Écart Type)
(Veeger, Lute, Roeleveld, & Vanderwoude, 1992)	Utilisateur de FRM	9	Ergomètre	61(16)	--
	Personne Valide (P.V.)	10	Expérimental	57(4)	
(L.H.V. van der Woude, Bakker, Elkhuisen, Veeger, & Gwinn, 1998)	Personne Valide Male	50		52(9)	--
	Personne Valide Femelle	17		53(10)	
(Dallmeijer, van der Woude, Veeger, & Hollander, 1998)	Non Utilisateur de FRM	24		53-77	--
(De Groot, Veeger, Hollander, & van der Woude, 2002)	P. V. Male avec contrôle	10	Ergomètre	90 (17)	--
	P. V. Male sans contrôle	10	Expérimental	79(12)	
(Rick N. Robertson, Michael L. Boninger, Rory A. Cooper, & Sean D. Shimada, 1996)	Personne Valide(P.V.)	4	Smart <sup>Wheel</sup>	--	79(13)
	Utilisateur de FRM	4			73(9)
(Michael L. Boninger, Cooper, Baldwin, Shimada, & Koontz, 1999)	Utilisateur de FRM	34	Smart <sup>Wheel</sup> (Dynamomètre)	--	26(14) vitesse 0.9 m/s 21(12) vitesse 1.8 m/s
(Aissaoui, Arabi, Lacoste, Zalzal, & Dansereau, 2002)	Personnes âgées	13	Smart <sup>Wheel</sup> Ergo. Expérimental	--	42(17) vitesse 1 m/s 53(14) vitesse 0.9 m/s
(Marietta van der Linden, Valent, Veeger, & van der Woude, 1996)	Personne Valide	6	Ergomètre Expérimental		73(11)

Dans l'interprétation des différences entre les valeurs trouvées, on doit prendre en compte des conditions externes entourant les expérimentations tel que la vitesse, la résistance et le potentiel physique des sujets. En général le *FEF* varie entre 50 et 80% de la force totale appliquée sur le cerceau.

Pour avoir une efficacité maximale le sujet doit adopter une technique de propulsion avec une force tangentielle la plus élevée possible. La direction optimale de la force est un compromis entre l'efficacité mécanique et les contraintes sur le système musculo-squelettique.

### 5.5 Moments de propulsion

Lors de la propulsion, le moment résultant mesuré par la roue dynamométrique  $\vec{M}_O (M_x, M_y, M_z)$  est la somme de deux moments (Dabonneville et al., 2005), un moment  $\vec{M}_{O(\vec{F}_{tot})}$  produit par la force totale  $F_{tot} (F_x, F_y, F_z)$  et un moment libre  $\vec{M}_{main}$  de la main. Ce moment libre appelé le moment local qu'applique le sujet sur le cerceau ne peut être mesuré directement. Voir figure 41.

$$\vec{M}_O = \vec{M}_x + \vec{M}_y + \vec{M}_z = \vec{M}_{O(\vec{F}_{tot})} + \vec{M}_{main} \quad (5.6)$$

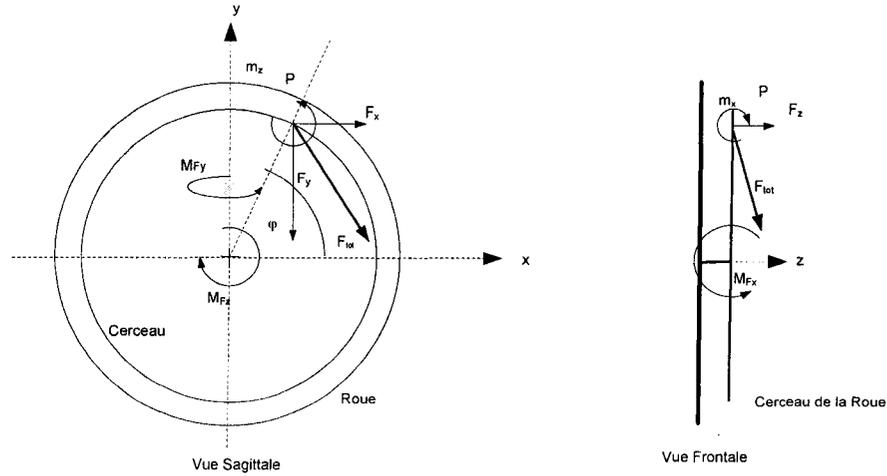


Figure 41 Vecteurs Forces et moments appliqués au cerceau de la roue

### 5.5.1 Moments de la force de réaction

La force totale  $\vec{F}_{tot}$  peut être appliquée à n'importe quel point P du cerceau de la roue ayant pour coordonnées  $(R_x, R_y, R_z)$ , créant ainsi un moment  $\vec{M}_{O(\vec{F}_{tot})}$  autour de l'origine du repère de référence

$$\vec{M}_{O(\vec{F}_{tot})} = \vec{OP} \times \vec{F}_{tot} = \vec{M}_{F_x} + \vec{M}_{F_y} + \vec{M}_{F_z} \quad (5.7)$$

Le produit vectoriel donne :

$$\vec{M}_{O(\vec{F}_{tot})} = \vec{OP} \times \vec{F}_{tot} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ R_x & R_y & R_z \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} \quad (5.8)$$

Avec :

$$R_x = r \cos(\varphi)$$

$$R_y = r \sin(\varphi)$$

$$R_z = 0 \text{ (la main reste dans le plan de la roue)}$$

$r$  : rayon du cerceau.

$\varphi$  : Angle que forme le point P avec le plan horizontal ( 0 degrés)

$$\vec{M}_{O(\vec{F}_{tot})} = (F_y R_z - F_z R_y) \vec{i} - (F_x R_z - F_z R_x) \vec{j} + (F_x R_y - F_y R_x) \vec{k} \quad (5.9)$$

Sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} M_{Fx} \\ M_{Fy} \\ M_{Fz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_x \\ R_y \\ R_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -F_z & F_y \\ F_z & 0 & -F_x \\ -F_y & F_x & 0 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

### 5.5.2 Moment de la main

Quand le sujet propulse il peut appliquer un moment libre de la main. Ce moment ne peut être mesuré par la plate-forme dynamométrique:

$$\vec{M}_{main} = \vec{M}_{main\_x} + \vec{M}_{main\_y} + \vec{M}_{main\_z} = \vec{m}_x + \vec{m}_y + \vec{m}_z \quad (5.11)$$

Veeger et al. (L. H. V. van der Woude et al., 2001) décrit ce moment local comme étant un couple de forces, l'une produite au niveau du poignet et qui est appliquée dans un sens et l'autre force au niveau de l'index appliquée dans le sens contraire de la première force. Les trois composantes ( $m_x, m_y, m_z$ ) du moment local  $M_{main}$  généré par la main ne sont pas nulles (Rory A. Cooper et al., 1996; M. van der Linden, Valent, Veeger, & van der Woude, 1996; L. H. V. van der Woude et al., 2001).

D'après les équations (5.6), (5.9) et (5.11), on est en présence de résolution de système de trois équations et quatre inconnues à savoir ( $m_x, m_y, m_z$  et l'angle  $\varphi$ ). Deux approches ont été utilisées dans l'estimation du moment de la main  $M_{main}$  :

1. Van Der Woude et al. (L. H. V. van der Woude et al., 2001) et Van der Linden et al. (M. van der Linden et al., 1996) combinent les données cinétique ( $F_x, F_y, F_z$  et

$M_z$ ) et cinématique (l'angle  $\alpha$  définit dans l'équation 5.4 ) pour le calcul du moment de la main autour de l'axe z sur la surface du cerceau de la roue selon :

$$M_{main\_z} = m_z = M_z - F_t r \quad (5.12)$$

- $r$  est le rayon du cerceau de la roue;
- $F_t$  définit dans le paragraphe 5.4.1.
- La force tangentielle est remplacée par la force effective définit dans l'équation 5.4

2. Cooper et al. (R. Cooper, 1997) calculent l'angle  $\varphi$  selon l'équation

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{M_x - m_x}{M_y - m_y} \right) \quad (5.13)$$

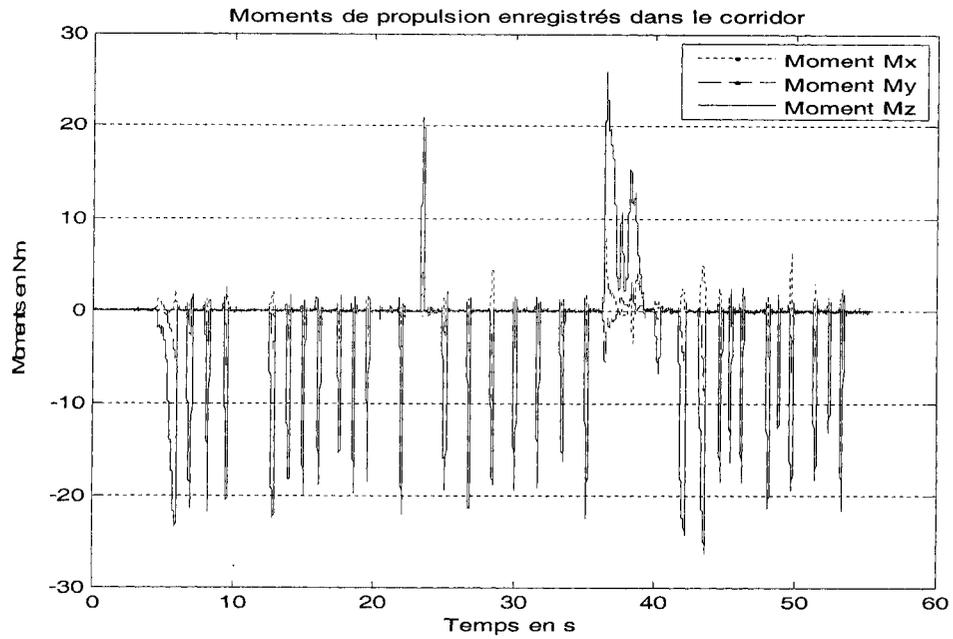
mais en supposant les moments  $m_x$  et  $m_y$  négligeables devant  $M_x$  et  $M_y$  respectivement. Puis ils utilisent l'équation (voir annexe 8) pour évaluer  $F_t$

$$\cos \varphi = - \frac{F_x F_r + F_y F_t}{F_{tot}^2} \quad (5.14)$$

Le moment libre  $M_{z\_main}$  est déterminé par l'équation 5.12

Van der Linden et al. (M. van der Linden et al., 1996) ont évalué le pourcentage  $M_{z\_main}$  de  $M_z$  à 40 %, il est dans la direction opposée au moment de propulsion  $M_z$  durant la phase de poussée. Cooper et al. (Rory A. Cooper et al., 1996) donne un rapport de moins de un dixième. Les deux méthodes utilisent soit des données cinématiques ou des suppositions dans l'évaluation des moments libres de la main. Les moments mesurés et enregistrés par le collecteur de données sont représentés en figure 42 sur un plan horizontal (A) et sur une pente de 1/10 (B).

A



B

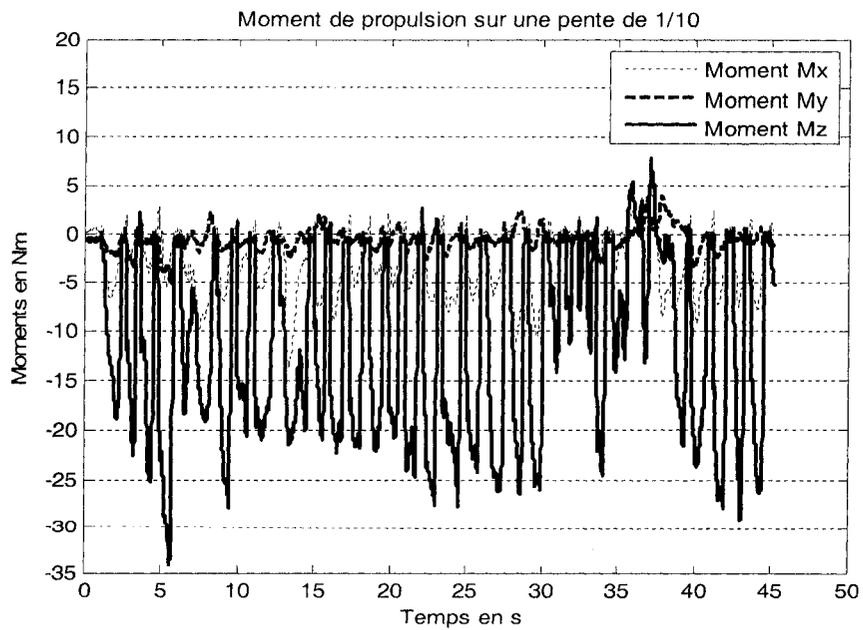


Figure 42 Moments mesurés et appliqués sur le cerceau de la roue (A : sur un plan horizontal, B : sur une pente 1/10)

## 5.6 Le point d'application des forces (PFA)

Les forces appliquées sur le cerceau de la roue sont généralement enregistrées dans le système de coordonnées gravitationnel du centre de la roue  $[O, x, y, z]$ , pour calculer les composantes dans le repère radial-tangentiel-axial  $(r, t, a)$  et le paramètre  $FEF$ , le point d'application de la force doit être identifié.

L'identification de l'emplacement de ce point est réalisée par une des deux approches ou leurs combinaisons :

- L'approche cinématique : par enregistrement vidéo, en supposant que ce point coïncide avec une des articulations métacarpiennes (R. Cooper, 1997; Rory A. Cooper et al., 1996; R.A. Cooper et al., 1995; Rodgers et al., 1994; Veeger et al., 1991);
- L'approche cinétique : en utilisant les données cinétiques en supposant que un ou plusieurs moments de la main sont négligeables (R. Cooper, 1997; R.N. Robertson, M.L. Boninger, R.A. Cooper, & S.D. Shimada, 1996; Sabick, Zhao, & An, 1999) .

Cooper et al. (R. Cooper, 1997) ont comparé deux méthodes pour déterminer le PFA, la première méthode utilise les données cinétiques et la seconde méthode utilise les données cinématiques du deuxième métacarpe (MCII). Les auteurs présentent une technique analytique pour le calcul des composantes tangentielles et radiales de la force totale en supposant que les moments libres  $m_x$  et  $m_y$  autour des axes  $x$  et  $y$  sont négligeables devant les moments  $M_x$  et  $M_y$  par la SmartWheel.

La comparaison entre les positions du PFA évaluées par les deux méthodes donne une différence de 11.5 degrés en moyenne pendant une phase de poussée. Ceci est dû au fait que le PFA peut varier à l'intérieur de la main et analytiquement il risque même de sortir de la main.

### 5.6.1 Analyse technique du PFA par la cinétique

L'analyse de l'identification de la position du PFA se fera par l'approche cinétique en utilisant deux méthodes :

- Méthode 1 utilisant l'équation 5.15 qu'on appellera la méthode du cosinus;
- Méthode 2 utilisant l'équation 5.18 qu'on appellera la méthode de la tangente.

#### 5.6.1.1 Analyse du PFA par la méthode du cosinus

Pour voir l'effet de la présence du moment local de la main dans la détermination du point d'application de force (PFA) par les données cinétiques. Comme l'angle est en fonction de paramètres mesurables par la SmartWheel ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  et  $M_z$ ) et le rayon du cerceau  $r$ , et de paramètres non mesurable  $M_{main\_z}$ , l'approche est de faire varier la valeur du moment de la main de 0% à 90 de la valeur du moment mesuré  $M_z$ . L'angle  $\varphi$  du PFA est donné par l'équation (5.14) (voir annexe 8) :

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & -\cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_r \\ F_t \\ F_z \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

La solution donnant l'angle  $\varphi$  du PFA est donnée par

$$\cos \varphi = -\frac{F_x F_r + F_y F_t}{F_{tot}^2} \quad (5.14)$$

Avec  $F_t$  tiré de :  $M_{main\_z} = M_z - F_t r$  (5.16)

Et  $F_{tot}$  tiré de  $F_{tot} = \sqrt{F_t^2 + F_r^2 + F_z^2}$  (5.17)

Comme l'angle  $\varphi$  est en fonction des paramètres mesurables par la SmartWheel ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  et  $M_z$ ) et le rayon du cerceau  $r$ , et du paramètres inconnu  $M_{main\_z}$ , pour voir l'influence de la présence du moment libre  $M_{main\_z}$  sur l'identification de la position du PFA, on fait varier, par simulation, le moment  $M_{main\_z}$  de 0 à 90% de la valeur de  $M_z$ .

Les données utilisées dans les calculs de la position du PFA ont été enregistrées par le dispositif développé dans le cadre de ce mémoire. La figure 43 donne l'allure de l'angle du PFA pendant la phase de poussée d'une propulsion en fonction des valeurs du moment  $M_{main\_z}$  :

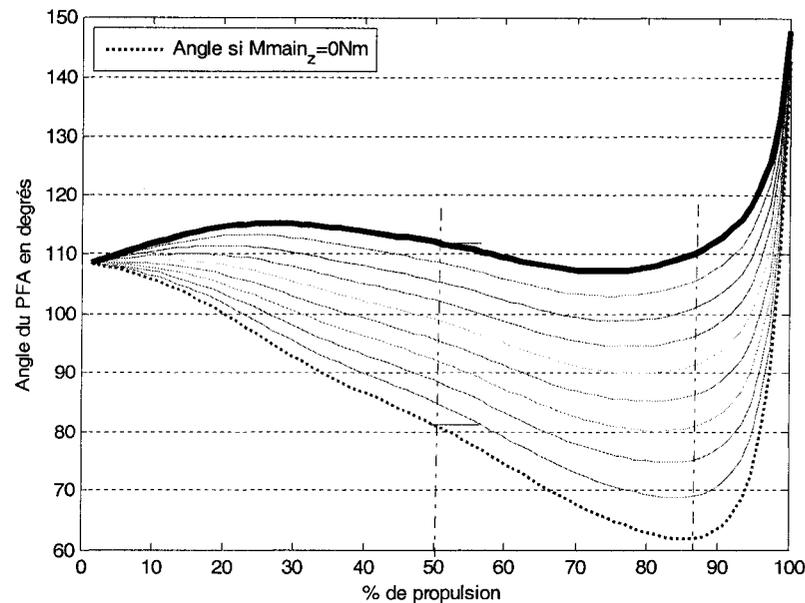


Figure 43 Angle du PFA avec moment local de la main variant de 0 à 90%

Ceci montre que :

- L'angle est grandement affecté par la valeur du moment de la main  $M_{main\_z}$  qui, dans la littérature, est généralement supposé nul (R. Cooper, 1997; R.N. Robertson et al., 1996; Sabick et al., 1999). Une lecture, dans cet exemple à 50 % de la propulsion donne une différence de 38% (112 degrés contre 81 degrés) d'augmentation entre l'angle correspondant à un moment de la main nul et l'angle correspondant à un moment de la main égal à 90% du moment mesuré;
- Comme l'angle du PFA, dans la propulsion tend à décroître (Voir Annexe 8), entre 85 et 100% du cycle de la propulsion le PFA croit, indépendamment de

la valeur du moment local de la main. Ceci peut être expliqué par le fait que ce point durant la phase de poussée n'est pas solidaire au cerceau. En d'autres termes sa position vis à vis la main n'est pas fixe, il peut glisser à l'intérieur de la main. Ceci reste en conformité dans l'explication de Cooper et al. (Rory A. Cooper et al., 1996) dans l'appendice que le PFA peut s'étendre à l'extérieur de la main.

De la même façon l'efficacité décrite dans le paragraphe 5.4.1 dépend du moment libre  $M_{main\_z}$ . Les données utilisées dans l'évaluation de l'efficacité ont été enregistrées par le dispositif développé dans le cadre de ce mémoire. La figure 44 donne la variation de l'efficacité de la propulsion avec le moment libre. En trait interrompu correspond à un moment libre nul et en trait fort correspond un moment  $M_{main\_z}$  égal à 90 % de  $M_z$ . Entre les deux courbes le moment croit par palier de 10% de  $M_z$ .

Le fait de prendre en compte la présence du moment libre a tendance à réduire les valeurs de l'efficacité, au milieu de la propulsion. L'efficacité est de 58% pour un moment  $M_{main\_z}$  nul et elle est de 18 % pour un moment  $M_{main\_z}$  qui vaut 80% de  $M_z$ .

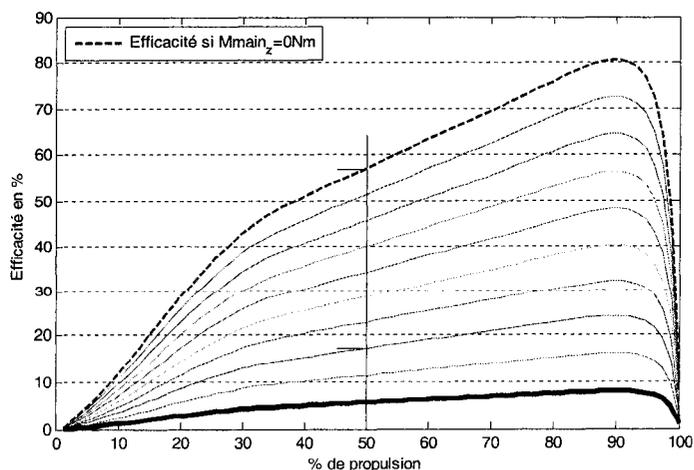


Figure 44 Efficacité avec moment de la main variant de 0 à 90%

### 5.6.1.2 Analyse du PFA par la méthode de la tangente

À partir des équations (5.10) et (5.11) et en prenant  $R_z$  nul (ne quitte pas le plan de la roue) on a :

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{M_x - m_x}{M_y - m_y} \right) \quad (5.18)$$

Cette équation montre que le PFA dépend des moment mesurés et les moments purs de la main autour des axes x et y respectivement  $m_x$  et  $m_y$ . Comme précédemment pour voir l'effet de la présence des deux moments  $m_x$  et  $m_y$  sur l'évaluation de l'angle PFA. Nous allons varier leurs valeurs, par simulation, de -100% à 90 % du moment mesuré correspondant  $M_x$  et  $M_y$ . L'angle  $\varphi$  sera en fonction donc de trois variables (le temps t,  $m_x$ ,  $m_y$ ). On présente l'allure de cet angle durant la phase de poussée 4 en prenant  $m_y$  nul et  $m_x$  variable en la figure 45 :

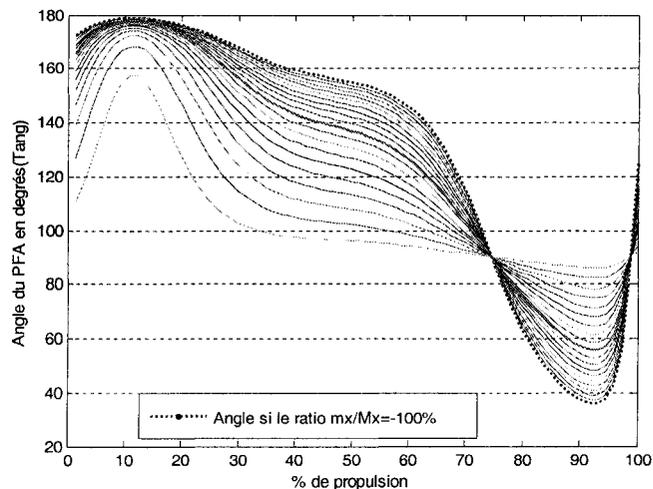


Figure 45 Angle du PFA par la méthode de la tangente avec  $m_x=0$ ,  $m_y$  variable

On remarque le durant le début de la propulsion (moins de 10 % du temps de propulsion) et à la fin de la propulsion (supérieur à 90 % du temps de propulsion) l'angle

du FPA trouvé par cette méthode, croit au lieu de décroître. Ceci pourrait être expliqué par le fait que, les moments au début de la phase de poussée et sa fin, sont très faibles, leur rapport est donc instable.

La figure 46 montre l'évolution de l'angle du PFA au début de la propulsion, évaluée à un temps inférieur à 5% du temps de la phase de poussée. Dans les figures 46, 47 et 48, l'axe x représente le rapport entre le moment libre  $m_x$  et le moment  $M_x$  et l'axe y représente le rapport entre  $m_y$  et  $M_y$ .

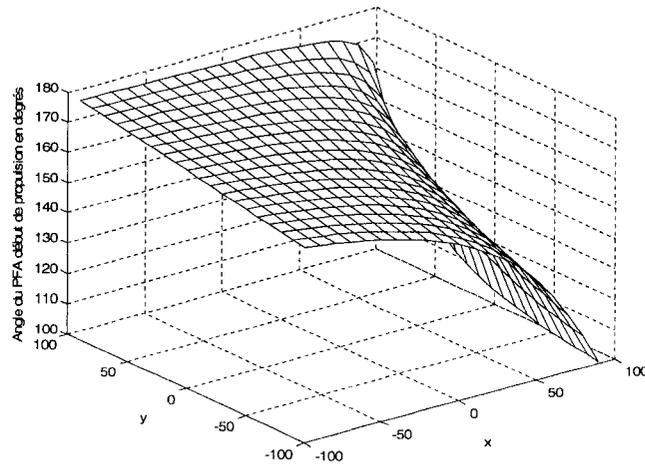


Figure 46 L'angle du PFA, tiré de la tangente, au début de la propulsion, en fonction des rapport des moments  $m_x$   $m_y$  et les moments  $M_x$  et  $M_y$

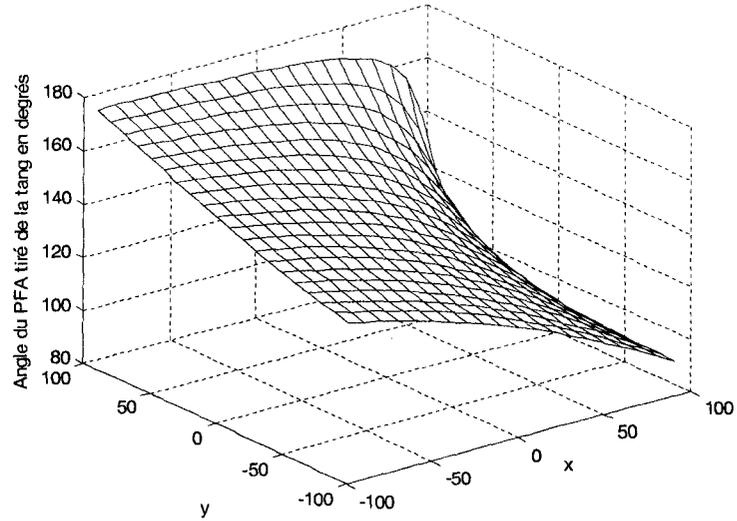


Figure 47 L'angle du PFA, tiré de la tangente, au milieu de la propulsion, en fonction des rapport des moments  $m_x$   $m_y$  et les moments  $M_x$  et  $M_y$

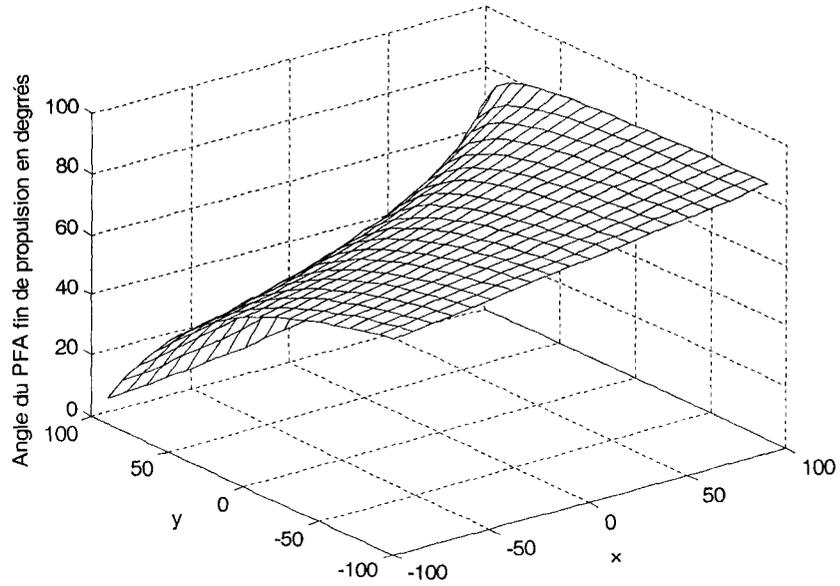


Figure 48 L'angle du PFA, tiré de la tangente, à la fin de la propulsion, en fonction des rapport des moments  $m_x$   $m_y$  et les moments  $M_x$  et  $M_y$

D'après les trois figures 46, 47 et 48, au début, au milieu et à la fin le la propulsion respectivement l'angle du PFA varie énormément selon qu'on considère la présence des moments libres ou non dans le calcul du PFA.

## 5.7 Incertitude de la mesure

L'incertitude des mesures des variables biomécaniques dans la propulsion en fauteuil roulant dépend de la configuration du dispositif de mesure en occurrence la roue incluant les propriétés des capteurs de forces et moments et les grandeurs des forces et moments générées lors du test de propulsion. L'interaction de ces variables reflète la complexité de l'investigation de la propulsion biomécanique.

### 5.7.1 Généralités

L'évaluation de la qualité des données expérimentales et la comparaison des résultats d'un modèle mathématique qui utilise ces données est d'une importance majeure. Soit dans un cas général, un résultat d'expérience *res*, qui est fonction d'un nombre *j* de variables *X<sub>i</sub>* :

$$res = f(X_1, X_2, \dots, X_j) \quad (5.19)$$

L'équation (5.19), de réduction de données, donne l'évaluation du résultat d'expérience *res* à partir de valeurs mesurées de variables *X<sub>i</sub>*, alors l'incertitude absolue dans le résultat, définie dans (Coleman & Steele, 1999), est donnée par :

$$U_{res}^2 = \left( \frac{\partial res}{\partial X_1} \right)^2 U_{X_1}^2 + \left( \frac{\partial res}{\partial X_2} \right)^2 U_{X_2}^2 + \dots + \left( \frac{\partial res}{\partial X_j} \right)^2 U_{X_j}^2 \quad (5.20)$$

Où les  $U_{X_i}$  sont les incertitudes des variables mesurées.

Ceci suppose que les variables mesurées sont indépendantes l'une par rapport à l'autre et que les incertitudes des variables mesurées le sont aussi. Les termes  $\lambda_i = \left( \frac{\partial res}{\partial X_i} \right)$  sont les coefficients de sensibilité absolue qui donnent la contribution de l'incertitude de chaque paramètre dans l'incertitude de la variable résultat *res*.

### 5.7.2 Incertitudes sur les paramètres mesurables : forces et moments

Les équations suivantes nécessaires pour le calcul des forces  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  (citées dans le chapitre 2) sont données par :

$$\begin{aligned} F_x &= k_{11} \left( v_1 \sin(\theta) + v_3 \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + v_5 \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + k_{12} \\ F_y &= k_{21} \left( v_1 \cos(\theta) + v_3 \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + v_5 \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + k_{22} \\ F_z &= k_{31} (v_2 + v_4 + v_6) + k_{32} \end{aligned} \quad (5.21)$$

Et les moments  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  sont données par :

$$\begin{aligned} M_x &= k_{41} \left( v_2 \sin(\theta) + v_4 \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + v_6 \sin\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + k_{42} \\ M_y &= k_{51} \left( v_2 \cos(\theta) + v_4 \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + v_6 \cos\left(\theta + \frac{4\pi}{3}\right) \right) + k_{52} \\ M_z &= k_{61} (v_1 + v_2 + v_3) + k_{62} \end{aligned} \quad (5.22)$$

Où :

- $k_{ij}$  sont des constantes de calibration pour les 6 canaux données par le constructeur,  $v_1$ ,  $v_3$ ,  $v_5$  sont les trois canaux qui donnent les flexions des bras 1,2 et 3 dans le plan de la roue,  $v_2$ ,  $v_4$ ,  $v_6$  sont les trois canaux qui donnent les flexions des bras 1,2 et 3 dans l'axe de la roue;

- téta ( $\theta$ ) est l'angle qui définit la position du bras de référence (bras 1) par rapport à l'horizontal et qui varie entre 0 et 360 degrés cet angle est donné en tous temps par l'encodeur optique.

### 5.7.2.1 Les variables de base

Les incertitudes absolues des forces et des moments, selon l'équation (5.21 et 5.22), sont en fonction des incertitudes absolues des :

- tensions de sortie des canaux qui sont codés sur 10 bits d'où 1024 états possibles  $U_{v_i} = \frac{5}{1024} v = 0.0048v$
- l'angle de rotation de bras de référence  $\theta$  qui est obtenu par un encodeur optique de pas 1/2000, l'incertitude sur cet angle  $U_\theta$  est de  $360^\circ/2000 = 0.18^\circ$ ;
- les constantes de calibration  $k_{ij}$  qui sont données avec une précision de 5% (par le constructeur de la roue) d'où  $U_{k_{ij}} = 0.05 \times k_{ij}$ .

### 5.7.3 Incertitudes des forces

Les forces enregistrées par le système développé et utilisées dans l'évaluation de l'incertitude absolue sont représentées aux figures 49 et 50. Les incertitudes absolues des forces, calculées selon l'équation (5.20), sont en fonction de six tensions générées par des ponts de jauges ( $v_i$ ) et six constantes de calibration ( $k_{ij}$ ) et l'angle de rotation  $\theta$  du bras de référence.

L'incertitude de la force horizontale ( $UF_x$ ) est donc:

$$\begin{aligned}
 UF_x = & \left[ k_{11}^2 (v_1 \cos(\theta) - v_3 \sin(\theta + 1/6 \pi) - v_5 \cos(\theta + 1/3 \pi))^2 U_{\text{teta}}^2 \right. \\
 & + (v_1 \sin(\theta) + v_3 \cos(\theta + 1/6 \pi) - v_5 \sin(\theta + 1/3 \pi))^2 U_{k_{11}}^2 \\
 & + U_{k_{12}}^2 + k_{11}^2 \sin^2(\theta) U_{v_1}^2 + k_{11}^2 \cos^2(\theta + 1/6 \pi) U_{v_3}^2 \\
 & \left. + k_{11}^2 \sin^2(\theta + 1/3 \pi) U_{v_5}^2 \right]^{1/2}
 \end{aligned} \tag{5.23}$$

L'incertitude de la force verticale ( $UF_y$ ) est :

$$\begin{aligned}
 UF_y = & \left[ k_{21}^2 (-v_1 \sin(\theta) - v_3 \cos(\theta + 1/6 \pi) + v_5 \sin(\theta + 1/3 \pi))^2 U_{\text{teta}}^2 \right. \\
 & + (v_1 \cos(\theta) - v_3 \sin(\theta + 1/6 \pi) - v_5 \cos(\theta + 1/3 \pi))^2 U_{k_{21}}^2 \\
 & + Uk_{22}^2 + k_{21}^2 \cos^2(\theta) U_{v_1}^2 + k_{21}^2 \sin^2(\theta + 1/6 \pi) U_{v_3}^2 \\
 & \left. + k_{21}^2 \cos^2(\theta + 1/3 \pi) U_{v_5}^2 \right]^{1/2}
 \end{aligned}
 \quad (5.24)$$

L'incertitude de la force axiale ( $UF_z$ ) est :

$$\begin{aligned}
 UF_z = & \left[ Uk_{31}^2 v_2^2 + 2Uk_{31}^2 v_2 v_4 + 2Uk_{31}^2 v_2 v_6 + Uk_{31}^2 v_4^2 + \right. \\
 & \left. + 2Uk_{31}^2 v_4 v_6 + Uk_{31}^2 v_6^2 + Uk_{32}^2 U_{v_2}^2 + k_{31}^2 U_{v_4}^2 + k_{31}^2 U_{v_6}^2 \right]^{1/2}
 \end{aligned}
 \quad (5.25)$$

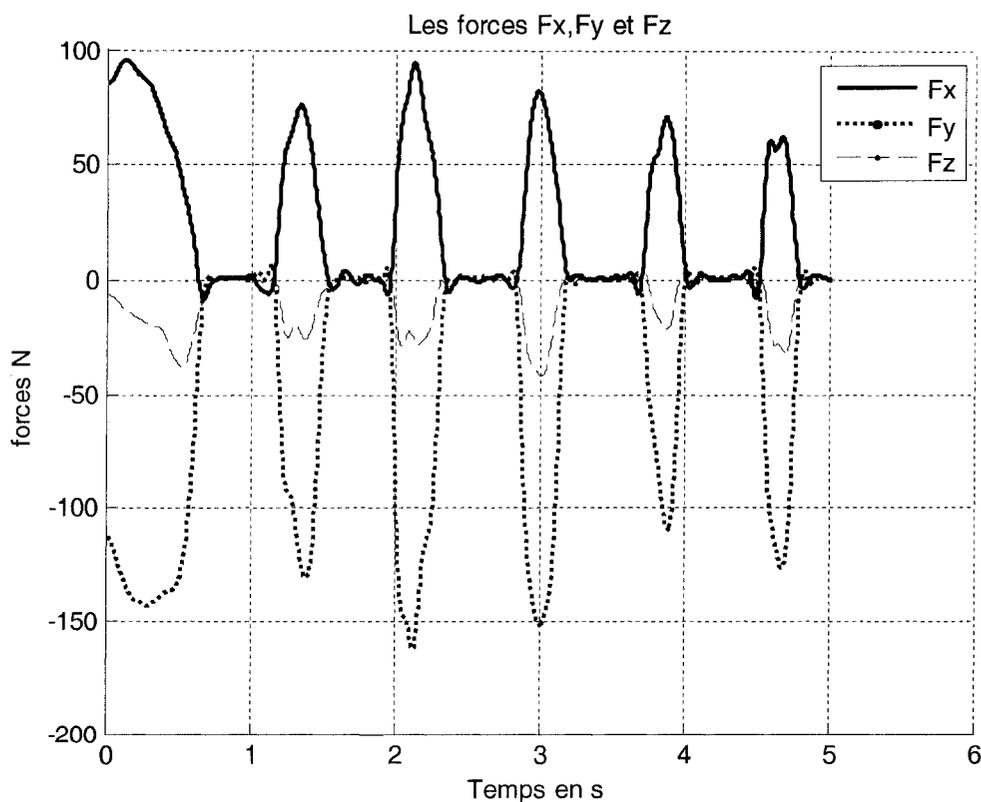


Figure 49 Les forces tridimensionnelles utilisées dans l'incertitude

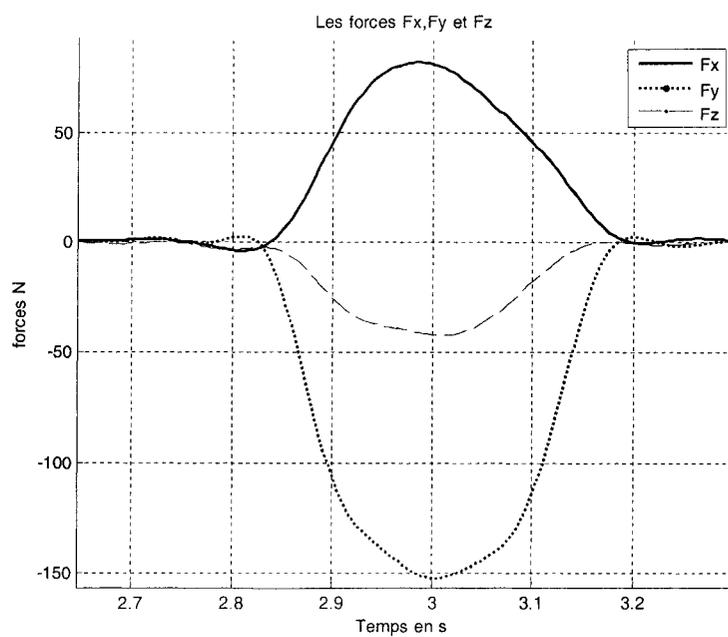


Figure 50 Les forces du la phase de poussée 4

### 5.7.3.1 Incertitudes absolues des forces

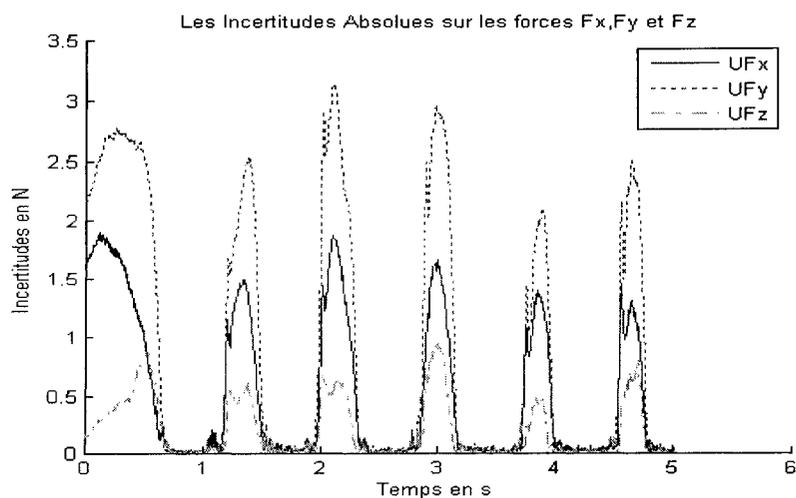


Figure 51 Incertitudes absolues de forces de l'essai.

Pour les calculs des incertitudes, on a considéré les forces de la 4<sup>ème</sup> phase de poussée, donnés en figure 50. Les résultats trouvés, voir figure 51. La moyenne des valeurs est donnée dans le tableau VI. Elle montre un maximum d'incertitude pour la force  $F_y$ , ceci est du au fait qu'elle est la plus imposante en grandeur.

Tableau VI

Incertitudes absolues moyennes des forces  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$

	$UF_x (N)$	$UF_y (N)$	$UF_z (N)$
Moyenne	2.28	4.70	1.06

### 5.7.3.2 Incertitudes relatives des forces

Les incertitudes relatives étant définies (Coleman & Steele, 1999) par:

$$\frac{U_r^2}{r^2} = \left( \frac{X_1}{r} \frac{\partial r}{\partial X_1} \right)^2 \left( \frac{U_{X_1}}{X_1} \right)^2 + \left( \frac{X_2}{r} \frac{\partial r}{\partial X_2} \right)^2 \left( \frac{U_{X_2}}{X_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{X_J}{r} \frac{\partial r}{\partial X_J} \right)^2 \left( \frac{U_{X_J}}{X_J} \right)^2 \quad (5.26)$$

Appliquée à notre cas, ceci donne :

$$UF_{xr} = \frac{UF_x}{F_x} \quad (5.27)$$

$$UF_{yr} = \frac{UF_y}{F_y} \quad (5.28)$$

$$UF_{zr} = \frac{UF_z}{F_z} \quad (5.29)$$

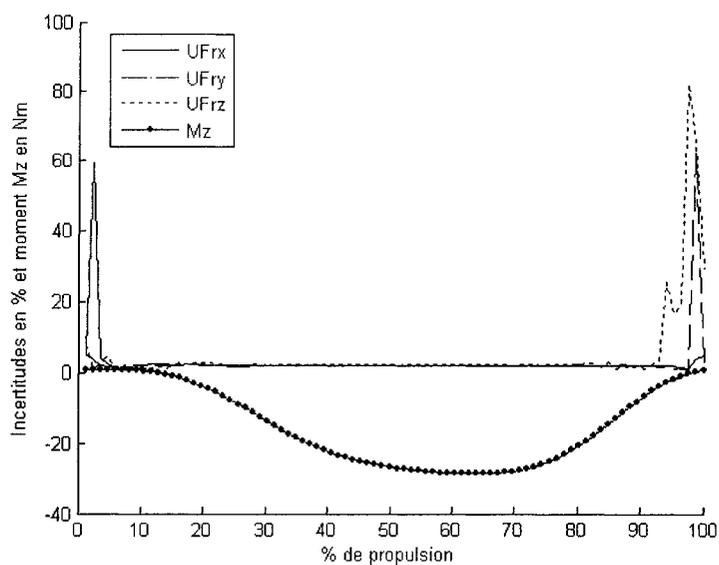


Figure 52 Incertitudes relatives des forces tridimensionnelles (phase de poussée 4) et moment  $M_z$ .

Une représentation des incertitudes relatives est donnée en figure 52, la moyenne des valeurs est donnée dans le tableau VII.

Tableau VII

Incertitudes relatives moyennes des forces  $F_x$ ,  $F_y$  et  $F_z$

	$UF_x$ (%)	$UF_y$ (%)	$UF_z$ (%)
Moyenne	5.10	5.03	5.90

Il en résulte que les incertitudes relatives des forces sont de l'ordre de 5 à 6 %.

### 5.7.4 Incertitudes des moments

Les moments sont en fonction de six tensions générées par des ponts de jauges ( $v_i$ ) et six constantes de calibration ( $k_{ij}$ ) et l'angle de rotation  $\theta$  du bras de référence. Ces données ont été enregistrées par le dispositif développé dans le cadre de ce mémoire. Ils sont représentés en figure 54, et seront utilisés dans le calcul des incertitudes absolues et relatives. Les incertitudes absolues des moments sont calculées selon l'équation (5.20).

L'incertitude absolue calculée du moment selon l'axe horizontal ( $UM_x$ ) est :

$$\begin{aligned}
 UM_x = & (k_{41}^2 (v_2 \cos(\theta) - v_4 \sin(\theta + 1/6 \pi) - v_6 \cos(\theta + 1/3 \pi))^2 U_{\text{teta}}^2 \\
 & + k_{41}^2 \sin(\theta)^2 U_{v_2}^2 + k_{41}^2 \cos(\theta + 1/6 \pi)^2 U_{v_4}^2 \\
 & + k_{41}^2 \sin(\theta + 1/3 \pi)^2 U_{v_6}^2 \\
 & + (v_2 \sin(\theta) + v_4 \cos(\theta + 1/6 \pi) - v_6 \sin(\theta + 1/3 \pi))^2 Uk_{41}^2 \\
 & + Uk_{42}^2)^{1/2}
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

L'incertitude absolue du moment selon l'axe vertical ( $UM_y$ ) est :

$$\begin{aligned}
 UM_y = & (k_{51}^2 (-v_2 \sin(\theta) - v_4 \cos(\theta + 1/6 \pi) + v_6 \sin(\theta + 1/3 \pi))^2 U_{\text{teta}}^2 \\
 & + k_{51}^2 \cos(\theta)^2 U_{v_2}^2 + k_{51}^2 \sin(\theta + 1/6 \pi)^2 U_{v_4}^2 \\
 & + k_{51}^2 \cos(\theta + 1/3 \pi)^2 U_{v_6}^2 \\
 & + (v_2 \cos(\theta) - v_4 \sin(\theta + 1/6 \pi) - v_6 \sin(\theta + 1/3 \pi))^2 Uk_{51}^2 \\
 & + Uk_{52}^2)^{1/2}
 \end{aligned} \tag{5.31}$$

L'incertitude absolue du moment selon l'axe de la roue ( $UM_z$ ) est :

$$\begin{aligned}
 UM_z = & (k_{61}^2 U_{v_1}^2 + k_{61}^2 U_{v_2}^2 + k_{61}^2 U_{v_3}^2 \\
 & + Uk_{61}^2 v_1^2 + 2 Uk_{61}^2 v_1 v_2 + 2 Uk_{61}^2 v_1 v_3 + 2 Uk_{61}^2 v_2 v_3 \\
 & + 2 Uk_{61}^2 v_3^2 + Uk_{62}^2)^{1/2}
 \end{aligned} \tag{5.32}$$

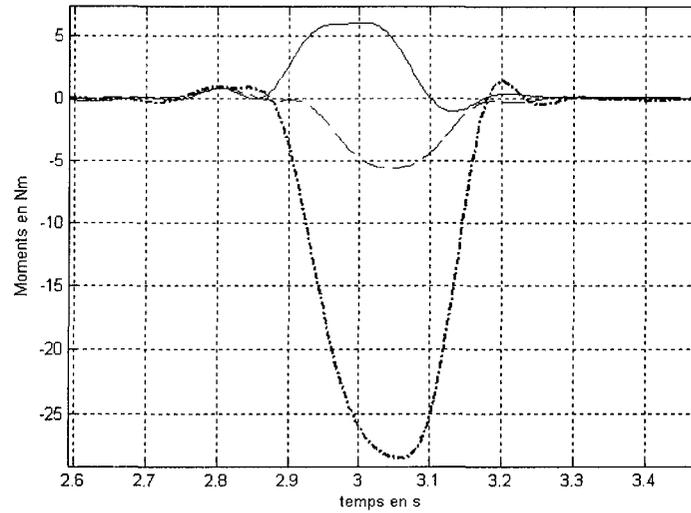


Figure 53 Moments tridimensionnelles utilisés dans l'incertitude de la phase de poussée 4

#### 5.7.4.1 Incertitudes absolues des moments

La phase de propulsion 4 est choisie pour l'étude des moyennes, les moments sont représentés en figure 53. Les incertitudes trouvées sont représentées dans la figure 54.

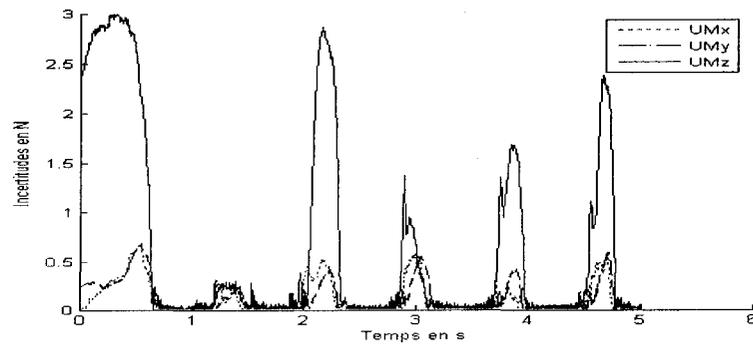


Figure 54 Incertitudes absolues des moments durant un essai

Les moyennes des valeurs sont résumées dans le tableau VIII. Les incertitudes sont moins de 1Nm pour les trois composantes  $M_x$ ,  $M_y$  et  $M_z$ .

Tableau VIII

Incertitudes absolues moyennes des moments  $M_x$ ,  $M_y$  et  $M_z$ .

	$UM_x$ (Nm)	$UM_y$ (Nm)	$UM_z$ (Nm)
Moyenne	0.17	0.16	0.77

#### 5.7.4.2 Incertitudes relatives des moments

Les incertitudes relatives étant définies par l'équation 5.26, appliquée à notre cas, ceci donne les incertitudes relatives des moments selon les trois axes sont :

$$UM_{xr} = \frac{UM_x}{M_x}; UM_{yr} = \frac{UM_y}{M_y}; UM_{zr} = \frac{UM_z}{M_z} \quad (5.33)$$

L'incertitude relative donne une appréciation plus claire que l'incertitude absolue, les valeurs trouvées (voir figure 55).

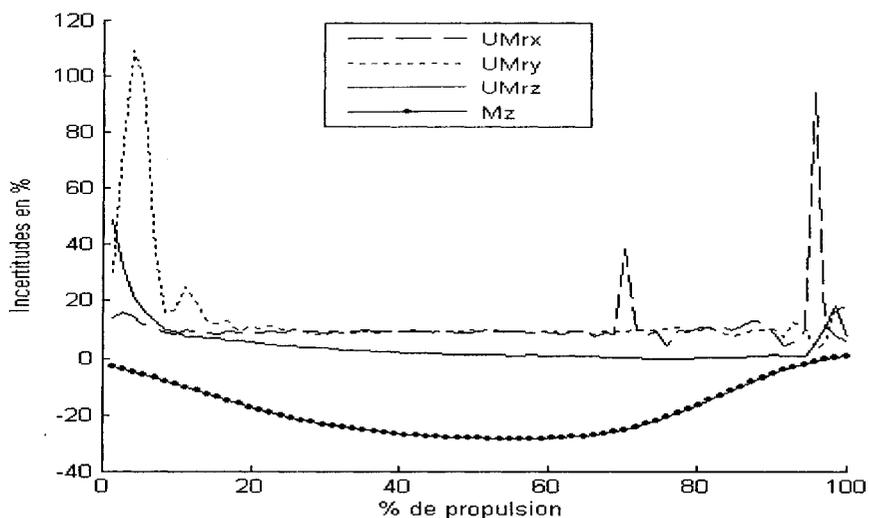


Figure 55 Incertitudes relatives des moments tridimensionnelles (phase de poussée 4).

Les moyennes des valeurs sont résumées dans le tableau IX. Ils donnent une incertitude des moments entre 3.5 à 9.8%.

Tableau IX

Incertitudes relatives moyennes des moments  $M_x$ ,  $M_y$  et  $M_z$

	$UM_x$ (%)	$UM_y$ (%)	$UM_z$ (%)
Moyenne	7.47	9.79	3.5

### 5.7.5 Incertitude sur l'angle du PFA

En utilisant seulement les données cinétiques (les forces et les moments), la position du PFA peut être trouvée soit en utilisant les forces que mesure la roue ( $F_x, F_y, F_z$ ) et le moment  $M_z$ , soit en utilisant les moments que génère la roue ( $M_x$  et  $M_y$ ).

### 5.7.5.1 Méthode 1 en utilisant le cosinus

En supposant (par simulation) que le moment local varie proportionnellement avec  $M_z$  de 0 à 90%  $M_{main\_z} = M_z \text{ gamma\_} z$  où  $0 \leq \text{ gamma\_} z < 1$ .

La position du PFA est déterminée par l'équation (5.15) :

$$\cos \varphi = -\frac{F_x F_r + F_y F_t}{F_{tot}^2} \quad (5.15)$$

Évaluons le cosinus en fonction ( $F_x, F_y, F_z, r$  et  $M_z$ ), avec  $F_t$  tirée de l'équation 5.14 et  $F_r$  tirée de l'équation (5.17).

$$\cos \varphi = -\frac{F_x \sqrt{(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2)^2 - \left(\frac{M_z}{r}(1 - \text{ gamma\_} z)\right)^2} - F_z^2 + F_y \frac{M_z}{r}(1 - \text{ gamma\_} z)}{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2} \quad (5.34)$$

$$U_\varphi = \left( \left(\frac{\partial \varphi}{\partial F_x} U F_x\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial F_y} U F_y\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial F_z} U F_z\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial M_z} U M_z\right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} U r\right)^2 \right)^{1/2} \quad (5.35)$$

L'incertitude absolue sur l'angle  $\varphi$   $U_\varphi$  est en fonction des incertitudes absolues des forces  $F_x, F_y, F_z$ , de l'incertitude absolue du rayon  $r$  de cerceau de la roue et de l'incertitude absolue du moment  $M_z$ . Le développement de l'équation 5.35 donne :

$$U_\varphi^2 = (A U F_x)^2 + (B U F_y)^2 + (C U F_z)^2 + (D U M_z)^2 + (K U r)^2 \quad (5.36)$$

$$A = \frac{\left( -\sqrt{A_1} - \frac{F_x^2}{\sqrt{A_1}} - 2(A_2) F_x \right)^2}{F_{tot}^2} \quad (5.37)$$

$$B = \frac{\left( -\frac{F_x F_y}{\sqrt{A_1}} + \frac{M_z(1 - \text{ gamma\_} z)}{r} - 2(A_2) F_y \right)^2}{F_{tot}^2} \quad (5.38)$$

$$C = 4 \frac{(A_2 F_z)^2}{F_{tot}^4 A_3} \quad (5.39)$$

$$D = \frac{\left( \frac{F_x M_z (1 - \gamma_z)^2}{\sqrt{A_1} r^2} + \frac{F_y (1 - \gamma_z)}{r} \right)^2}{F_{tot}^2 A_3} \quad (5.40)$$

$$K = \frac{\left( \frac{F_x M_z^2 (1 - \gamma_z)^2}{\sqrt{A_1} r^3} - \frac{F_y M_z (1 - \gamma_z)}{r^2} \right)^2}{F_{tot}^2 A_3} \quad (5.41)$$

Avec les paramètres  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  :

$$A_1 = F_x^2 + F_y^2 - \frac{M_z^2}{r^2} (1 - \gamma_z); \quad (5.42)$$

$$A_2 = -F_x \sqrt{A_1} - \frac{F_y M_z}{r} (1 - \gamma_z); \quad (5.43)$$

$$A_3 = 1 - \frac{A_2^2}{F_{tot}^2} \quad (5.44)$$

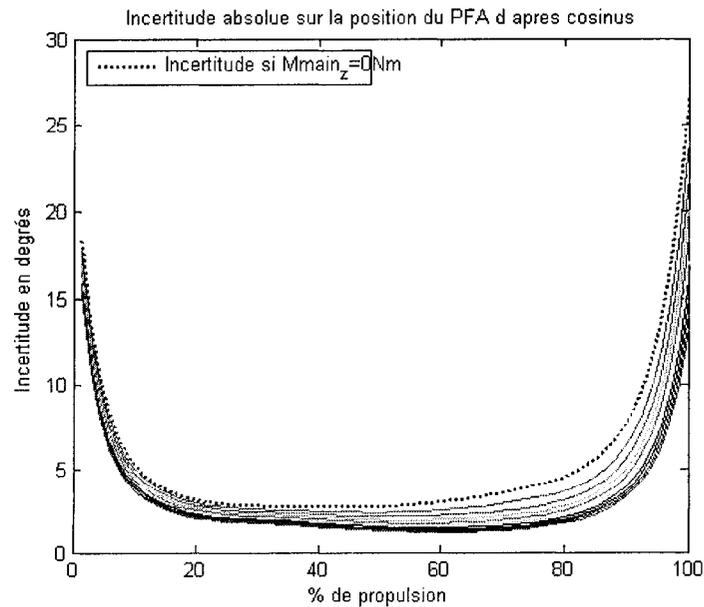


Figure 56 L'incertitude sur l'angle PFA selon le moment local de la main

L'incertitude sur l'angle du PFA représentée en la figure 56 montre que durant le début de la phase de poussée (inférieur à 5% du temps de propulsion) et vers la fin de la propulsion (supérieur à 95% du temps de propulsion), les incertitudes absolues demeurent élevées. Ceci est du au fait que les grandeurs des efforts durant ces portions de phase sont faibles. Quand ces efforts sont stables, au milieu de la propulsion, une incertitude de moins de 5% est enregistrée.

### 5.7.5.2 Méthode 2 en utilisant la tangente

L'angle peut être trouvé par l'équation (5.18)

$$\varphi = \tan^{-1} \left( -\frac{M_x - m_x}{M_y - m_y} \right)$$

En gardant la même approche que précédemment, on suppose que les moments libres de la main  $m_x$ ,  $m_y$  varient linéairement avec les moments mesurés de la main  $M_x$  et  $M_y$ :

$$\begin{aligned} m_x &= \alpha_{-x} \times M_x \\ m_y &= \beta_{-y} \times M_y \end{aligned} \quad (5.45)$$

$$-1 \leq \alpha_{-x} < 1$$

et

$$-1 \leq \beta_{-y} < 1$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( -\frac{M_x(1 - \alpha_{-x})}{M_y(1 - \beta_{-y})} \right) \quad (5.46)$$

L'incertitude absolues sur l'angle  $\varphi$  selon l'équation 5.20 se résume en:

$$U_\varphi = \left( \left( \frac{\partial \varphi}{\partial M_x} U M_x \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial M_y} U M_y \right)^2 \right)^{1/2} \quad (5.47)$$

Le développement de  $U_\varphi$  donne l'équation 5.48 et 5.49:

$$U_\varphi = \left[ \left( \frac{(1-\alpha_x)}{M_y(1-\beta_y) \left[ 1 + \frac{M_x^2(1-\alpha_x)^2}{M_y^2(1-\beta_y)^2} \right]} UM_x \right)^2 + \left( \frac{M_x(1-\alpha_x)}{M_y^2(1-\beta_y) \left[ 1 + \frac{M_x^2(1-\alpha_x)^2}{M_y^2(1-\beta_y)^2} \right]} UM_y \right)^2 \right]^{1/2} \quad (5.48)$$

$$U_\varphi = \left( \frac{(1-\alpha_x)^2(1-\beta_y)^2}{\left[ M_y^2(1-\beta_y)^2 + M_x^2(1-\alpha_x)^2 \right]^2} (M_y^2 UM_x^2 + M_x^2 UM_y^2) \right)^{1/2} \quad (5.49)$$

Du moment que l'incertitude  $U_\varphi$  dépend de trois paramètres : les rapports  $\alpha_x$  ( $\alpha_x = \frac{m_x}{M_x}$ ),  $\beta_y$  ( $\beta_y = \frac{m_y}{M_y}$ ) et le temps  $t$ . Pour distinguer l'évolution de l'incertitude en fonction des moments  $m_x$  et  $m_y$ , on fait l'étude durant trois instants: à moins de 5% du temps de propulsion, à 50% du temps de propulsion et à plus de 95% du temps de propulsion. La figure 57 donne l'évolution de l'incertitude sur le PFA en fonction des deux rapports durant l'instant correspondant à 5% de propulsion.

Dans les figures 59, 60 et 61, l'axe x représente le rapport entre le moment  $m_x$  et  $M_x$ , en % et y représente la rapport entre  $m_y$  et  $M_y$ , en %.

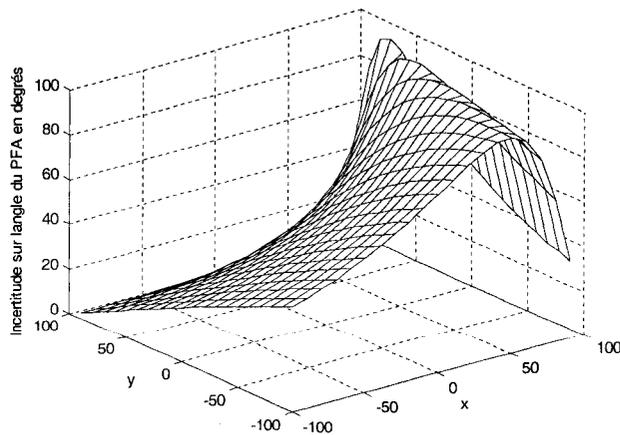


Figure 57 Incertainude sur l'angle du PFA en fonction des moments libres  $m_x, m_y$  au début de la de propulsion

On distingue bien que l'incertitude sur l'angle du PFA durant les premières 5% du temps de propulsion, est fortement affectée par la présence des moments libres  $m_x$  et  $m_y$ , un max de 97 degrés est enregistré voir (figure 57). Si les moments libres sont nuls alors l'incertitude est de 48 degrés.

Au milieu de la propulsion, à la figure 58, l'incertitude sur le PFA ne dépasse pas les 4 degrés et reste stable, ceci est du au fait que les moments de forces de réaction  $M_x$  et  $M_y$  sont au maximum de leurs valeurs.

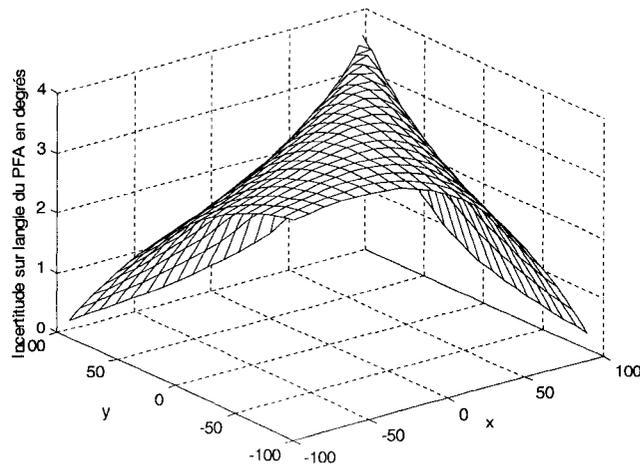


Figure 58 Incertitude sur l'angle du PFA en fonction des moments libres  $m_x, m_y$  au milieu de la propulsion

À la fin de la propulsion le phénomène semblable à celui du début de phase se produit, on note une incertitude maximale de 112 degrés, l'incertitude est de 72 degrés si les moments  $m_x$  et  $m_y$  sont nuls, voir figure 59.

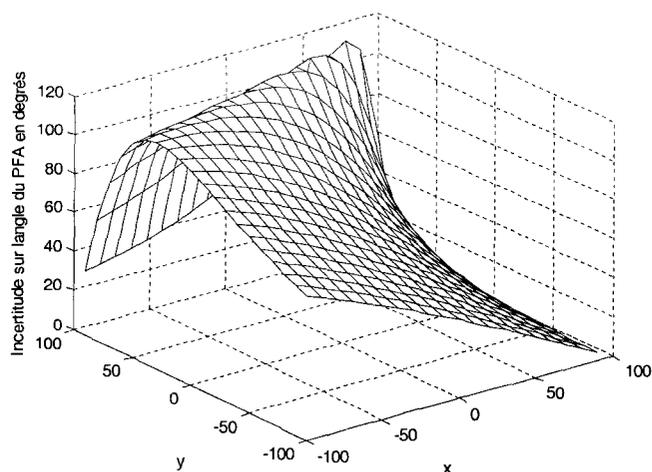


Figure 59 Incertitude sur l'angle du PFA en fonction des moments libres  $m_x$ ,  $m_y$  à la fin de propulsion

L'emploi de cette formulation (équation 5.18) pour l'obtention de l'angle du PFA perd sa précision durant le début de la propulsion qui est définie par un temps inférieur à 5% du temps de la phase de poussée. La méthode utilisant l'équation 5.18 perd aussi sa précision durant la fin de propulsion, définie par un temps supérieur à 95 % du temps de la phase de poussée.

## CONCLUSION

Le fauteuil roulant reste essentiel pour une population à mobilité restreinte de manière temporaire ou permanente. Dans cette étude on a développé un appareillage, qui se connecte à la roue dynamométrique Smart Wheel pour faire le monitoring et l'acquisition de données cinétiques des efforts (forces et moments tridimensionnelles) de réaction lors de la propulsion manuelle tout en étant embarqué au fauteuil roulant.

Cet appareillage est basé sur l'utilisation d'un enregistreur de données (data logger) Tattletale TT8 de la compagnie Onset Inc. Il offre une interface utilisateur pour la programmation des durées d'acquisition entre 5s à 55s ainsi que le choix du nombre d'essai à réaliser. Ceci est rendu possible grâce à l'exploitation maximale des capacités et performances qu'offre l'enregistreur de données.

Les données ainsi collectées reflètent d'une manière efficace et la plus proche de la réalité les efforts que développent les usagers de fauteuil roulant, étant donné qu'il permet, de faire des acquisitions en dehors de l'espace des laboratoires. L'observation des données collectées par l'appareillage lors des essais à l'intérieur de l'école, sans utilisation d'ergomètres, montre d'autres phénomènes qui se produisent lors de la propulsion tel les efforts de freinage des roues et le changement de direction par l'utilisateur.

Malgré l'exploitation maximale des capacités qu'offre l'enregistreur de données, ces limitations techniques n'ont pas permis de faire des collectes de durée de plus de 55 s.

La position du point d'application des forces, le PFA affecte l'évaluation des paramètres suivants à savoir: la composante tangentielle de la force totale, le moment de la main autour de l'axe z et l'efficacité de la propulsion. L'efficacité qui est utilisée comme paramètre essentiel dans les études de comparaison de la qualité de la propulsion.

Pour déterminer ces paramètres cités, une solution peut être envisagée. Elle consiste à instrumenter la roue par des capteurs de forces additionnels mesurant les composantes de la force dans un repère radial tangentiel axial. De cette manière la composante tangentielle de la force  $F_t$ , la position du PFA et le moment local de la main sont instantanément déterminés.

L'analyse des incertitudes montre que l'incertitude est de 5% en moyenne pour les forces et de 8% pour les moments exercés sur la main courante. La détermination de la position du PFA par les données cinétiques montre une incertitude de moins de 5%. Par contre les incertitudes sont supérieures à 90 degrés au début et à la fin de la propulsion par la méthode de la tangente contre une incertitude de moins de 20 degrés par la méthode du cosinus.

## **ANNEXE 1**

### **SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES ET BROCHAGE DE L'ENREGISTREUR DE DONNÉES TATTLETALE MODÈLE 8**

Tableau A 1

## Caractéristiques techniques de l'enregistreur de données Tattletale TT8

Caractéristiques	Spécifications
Encombrement (L x l x h) en mm	75 x 50 x 12.5
Poids (g)	28
Capacité mémoire de données RAM (Kilo Octets)	1000
Capacité mémoire EEPROM (Kilo Octets)	256
Convertisseur Analogique Numérique (CAN)	12-bit
Canaux Analogiques	8
Fréquence d'échantillonnage max (KHz)	100
Ligne Entrée/Sortie Numériques	25
Canal de Comptage	25
Vitesse de transfert des UART de TPU Kbits/s)	14 lignes TPU jusqu'à 500
Alimentation (V)	7 à 15
Langages de Programmation	C ou TXBasic (Version de l'ETS)
Température d'exploitation (° C)	-40 à +85

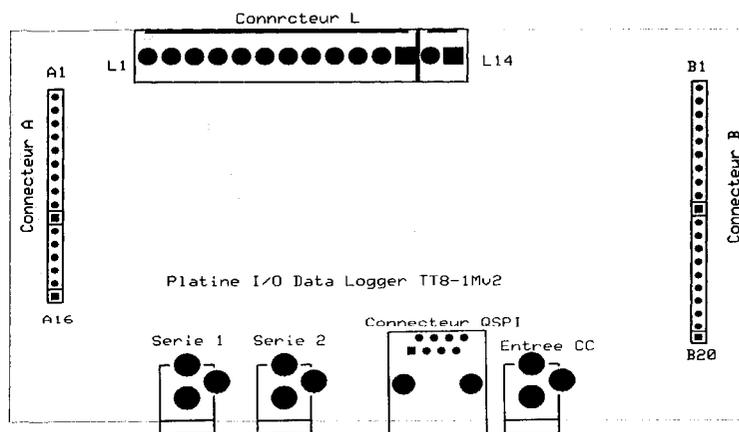


Figure 60 Platine d'entrée sortie de l'enregistreur de données

Tableau A 2

## Brochage du connecteur A1

	Numéro de Broche	Signal	Fonction
Coprocesseur	A1	DGND	Terre numérique
	A2	VREG	Alimentation
	A3	-HEY	Interruption PIC
	A4	-MCLR	Remise à zéro du TT8
	A5	-IRQ3	Demande d'interruption
QSPI	A6	PCS2	Sélection de boîtier périphérique
	A7	PSC1	Sélection de boîtier périphérique
	A8	PSC0	Sélection de boîtier périphérique
	A9	MOSI	Master-Out Slave-In
	A10	MISO	Master-InSlave-Out
	A11	SCK	Horloge du QSPI
Ports série	A12	SEL5v	Mode de sélection Horloge
	A13	RSR2	Réception port série2
	A14	RST2	Émission port série2
	A15	RSR1	Réception port série1
	A16	RST1	Émission port série1

Tableau A 3

## Brochage du connecteur B

	<b>Numéro de Broche</b>	<b>Signal</b>	<b>Fonction</b>
Entrées Sorties Numériques	B1	VBAT	Alimentation batterie
	B2	TP8	Canal TPU 8
	B3	TP7	Canal TPU 7
	B4	TP6	Canal TPU 6
	B5	TP5	Canal TPU 5
	B6	TP4	Canal TPU 4
	B7	TP3	Canal TPU 3
	B8	TP2	Canal TPU 2
	B9	TP1	Canal TPU 1
	B10	TP0	Canal TPU 0
Entrées Analogiques	B11	AGND	Terre Analogique ()
	B12	AD7	Canal Analogique Numérique 7
	B13	AD6	Canal Analogique Numérique 6
	B14	AD5	Canal Analogique Numérique 5
	B15	AD4	Canal Analogique Numérique 4
	B16	AD3	Canal Analogique Numérique 3
	B17	AD2	Canal Analogique Numérique 2
	B18	AD1	Canal Analogique Numérique 1
	B19	AD0	Canal Analogique Numérique 0
	B20	V Réf	Tension de référence (entre 2.5v et 5 v)

## **ANNEXE 2**

### **PROCÉDURE DE CHARGEMENT DU TXBASIC DANS L'EEPROM DU TATTLETALE MODÈLE 8**

Pour pouvoir utiliser l'interpréteur TxBasic comme langage de programmation, un fichier utilitaire qui permet de charger le programme TxBasic dans l'EEPROM du Tattletale Modèle 8, il est nommé TXBASIC.AHX.

La procédure se résume en :

1. Lancer l'éditeur TXTOOLS permettant la communication avec l'enregistreur de données.
2. Aller à CommPort sélectionner Port Setup : régler les paramètres suivants selon le tableau suivant :

Tableau A 4  
Paramètres de réglage du port de communication.

Paramètres	Réglage
Vitesse (bits/s)	9600
Format de donnée	8
Bit de stop	1
Control	Non
Parité	Non
Port	COM1 ou COM2

3. Connecter le câble série entre un des ports choisis précédemment COM1 ou COM2 de l'ordinateur et le connecteur série 1 de l'enregistreur de données voir figure 61.



8. En tapant "Y", le chargement commence.
9. Mettre l'enregistreur de données hors tension puis sous tension, le message de sollicitation change de TOM8> en TxB# .

**ANNEXE 3**

**LIAISON RS 232**

## La liaison RS232

L'interface RS-232 est une liaison série asynchrone dissymétrique full duplex normalisée avec une trame d'un caractère de longueur. Cette liaison met en correspondance point à point un "maître" et un "esclave" par rapport à la liaison. Ils sont respectivement nommés Data Control Equipment (DCE) et Data Terminal Equipment (DTE) dans la terminologie standard. Dans la terminologie française ils sont nommés par Équipement Terminal de Contrôle de Données (ETCD) et Équipement Terminal de Transmission de Données (ETTD). Les 9 lignes utilisées sont les suivantes

Tableau A5

Description des lignes RS232 sur un connecteur DB9.

N Broche	signal	Description	Sens
1	DCD	Data Carrier Detect	«--
2	RD	Receive Data ( RxD, Rx)	«--
3	TD	Transmit Data (TxD, Tx)	--»
4	DTR	Data Terminal Ready	--»
5	SGND	Ground	
6	DSR	Data Set Ready	«--
7	RTS	Request To Send	--»
8	CTS	Clear To Send	«--
9	RI	Ring Indicator	«--

### Signification des signaux

GND : (Ground) la masse. Référence nécessaire à toute mesure de tension.

Lignes de données :

Elles supportent les données dans l'un ou l'autre sens :

- RD : (Received Data) : Entrée pour la réception de données
- TD : (Transmitted Data) : Sortie pour l'émission de données.

Lignes de contrôle de flux :

- CTS : (Clear to Send) Indique que le récepteur est prêt à recevoir.
- RTS : (Request to Send) Indique que le PC est prêt à recevoir.

Lignes d'intérêt :

Ces lignes indiquent au correspondant que l'équipement qui les met à état haut s'intéresse à la liaison RS-232 et sont :

- DSR : (Data Set Ready) Indique que le modem s'occupe de sa liaison RS-232,
- DTR : (Data Terminal Ready) Indique que le PC s'occupe de la liaison RS-232.

D'autres lignes sont utilisées lors de la communication entre deux modems :

- DCD : (Data Carrier Detect) Indique qu'une porteuse de données valide a été détectée. RI : (Ring Indicator) Indique que la ligne téléphonique à laquelle le modem est relié est en train de sonner.

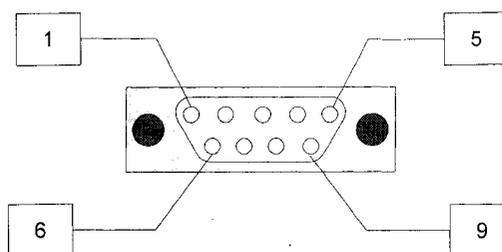


Figure 63 Représentation physique de connecteur DB9.

Note : La roue SmartWheel n'utilise les lignes de control de flux ni des lignes d'intérêt.

### Composition de la trame asynchrone

La méthode de transmission des caractères sur la ligne de données de la liaison RS-232 est représentée en la figure 66. La ligne de transfert TD est donc par défaut à la valeur 1, la trame est détectée par le dispositif de réception quand la tension de cette ligne passe à zéro annonçant le début (start), la valeur 0 est maintenue pendant la durée d'un bit. Ceci permet au récepteur de se mettre en mode prêt à recevoir, puisque la communication se fait de manière asynchrone, chaque trame (caractère) nécessite un bit de début.

Par la suite viennent les bits de données, qui sont au nombre de 5 à 8. Les bits de poids faible arrivent en premier. Ensuite, il y a une parité optionnelle. Si elle n'est pas présente (0 bits), on parle de parité None. Il en existe deux types: la parité paire (Even) ou impaire (Odd), suivant que le nombre total de bits à 1 de la donnée. La trame se termine ensuite par un délai d'attente (bits de stop) où la ligne reprend sa valeur par défaut de 1.

En prenant toutes les tailles maximales on voit que la transmission d'un caractère peut prendre un maximum de 12 bits ou un minimum de 7 bits.

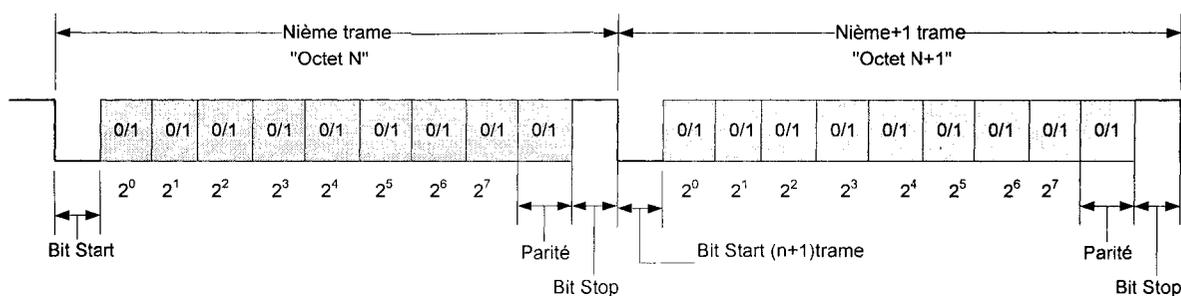


Figure 64 Format d'une trame asynchrone RS 232.

## Les niveaux de tension

Toutes les lignes de la RS-232 sont numériques. Elles transmettent donc des signaux électriques représentant symboliquement un '0' et un '1'. Ces signaux sont des tensions continues, dont la valeur est fixée par la norme RS232. Un niveau "0" est identifié par une tension de ligne entre 3 à 15v et un niveau "1" est identifié par une tension entre -3 à -12 v, c'est une représentation inversée.

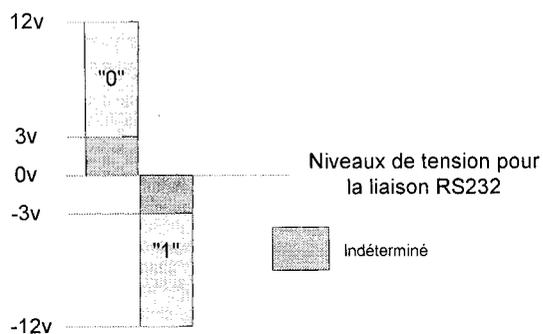


Figure 65 Les niveaux électriques de la liaison RS232

**ANNEXE 4**

**AFFICHEUR ALPHANUMÉRIQUE**

L'afficheur LCD ayant une résolution de 16 caractères par 2 lignes.

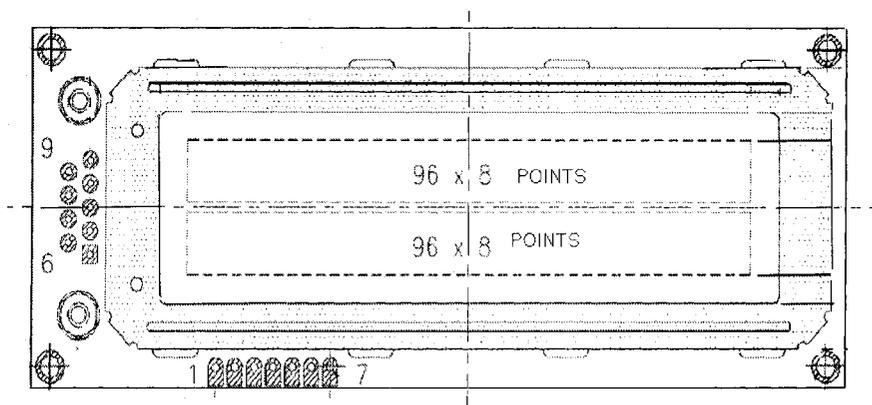


Figure 66 Afficheur alphanumérique 16X2 modèle 632

Pour connecter l'afficheur à un système embarqué les données et commandes sont transférées en format série octet par octet, soit en mode synchrone avec l'utilisation de l'interface SPI du contrôleur, soit en mode asynchrone en utilisant l'entrée Data\_In (voir tableau A 2).

Tableau A 6

Fonctionnalités du connecteur J1 de l'afficheur LCD

Connecteur JA	Nom	Fonction
1	Vss	Terre
2	Vdd	Alimentation +5v
3	LED+	Alimentation LED lumière contre-jour
4	Data_In	Entrée RS232
5	SPI_CS	Sélection de boîtier (CS)
6	SPI_CLK	Horloge SPI
7	SPI_BUSY	SPI occupé

L'afficheur permet de visualiser les caractères ASCII imprimables à la position courante du curseur. Il possède une mémoire ROM regroupant les caractères alphanumériques usuelles et une mémoire RAM donc volatile pour 16 autres caractères définis par l'utilisateur. Les principales commandes gérées par le contrôleur de l'afficheur sont données en tableau A7.

Tableau A 7

Les principales commandes gérées par le contrôleur de l'afficheur

<b>Commande "Octets"</b>	<b>Fonction</b>
00	Nulle
01	Curseur point départ
02	Affichage caché
04	Curseur Caché
05	Montre Curseur souligné
06	Montre Curseur Bloc
07	Montre Curseur bloc inversé
08	Effacement arrière (destructive)
09	Affichage lors du démarrage
10	Retour à la ligne
11	Effacement sur place
12	Effacement de l'afficheur
13	Retour de chariot
14	Control de la lumière contre-jour
15	Control de contraste
17	Positionner le curseur à (colonne et ligne)
18	Barre graphique horizontale
19	Défilement activé
20	Défilement désactivé
25	Caractères utilisateur
26	Redémarrage
30	Envoi de donnée au contrôleur du LCD

## **ANNEXE 5**

### **IMPLANTATION ET NOMENCLATURE DES COMPOSANTS ÉLECTRONIQUES**

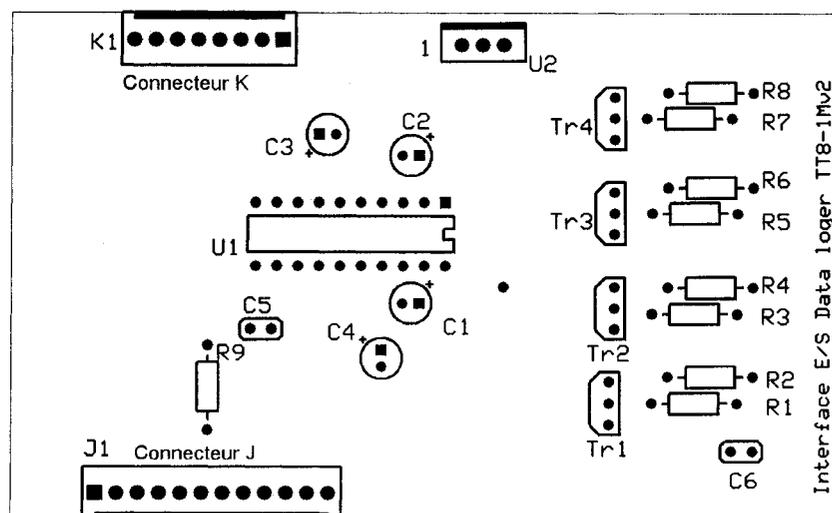


Figure 67 Schéma d'implantation des composants.

Tableau A 8

## Nomenclature des composants

Composant	Désignation
C1-C4	Condensateurs chimiques 10µF 16v
C5-C6	Condensateurs céramiques 1,1µF 16v
R1,R3 ,R 5,R7	Résistances 2,2KΩ 0,25W
R2, R4,R6, R8	Résistances 4,7KΩ 0,25W
R9	Résistance 1KΩ 0,25W
Tr1-Tr4	Transistors NPN 2N3904
U1	Convertisseur RS232 MC145407
U2	Régulateur de tension MC7805

Tableau A 9  
Brochage du connecteur J

Coté Interface		Coté enregistreur de données	
BP1	J1	L10	Bouton poussoir 1
BP2	J2	L11	Bouton poussoir 2
BP3	J3	L12	Bouton poussoir 3
BP4	J4	L13	Bouton poussoir 4
	J5		Non utilisée
	J6		Non utilisée
S3	J7	L9	Émission port série TTL afficheur
S8	J8	L14	Réception port série TTL SmartWheel
NGND	J9	DB9-5	Terre connecteur DB9
	J10	DB9-4	-10v
	J11	DB9-3	+10v
	J12	DB9-2	Réception port série RS232 SmartWheel

Tableau A 10

## Brochage du connecteur K

<b>Numéro de Broche</b>	<b>Signal</b>	<b>Fonction</b>
K1	NC	Non utilisée
K2	NC	Non utilisée
K3	NC	Non utilisée
K4	Br3 LCD	Sortie série pour afficheur
K5	Br2 LCD	5V continue alimentation afficheur
K6	NGND	Terre numérique
K7	NGND	Terre numérique
K8	VBAT	Tension d'alimentation

## **ANNEXE 6**

### **LES FONCTIONS ET LE LISTING DU PROGRAMME TXBASIC UTILISÉES POUR LA GESTION DE L'ENREGISTREUR DE DONNÉES**

Tableau A 11

Commandes TxBasic utilisées dans la gestion du port série.

Commande	Action
SerSetBaud ( )	Retourne la vitesse actuelle en bauds du port série 1.
SerShutDown ( )	Coupe l'énergie au Port Série.
SimGetFSys ( )	Retourne la fréquence de l'horloge actuelle du système en Hertz.
SimSetFSys ( )	Accorde l'horloge du système à la fréquence donnée en argument.
TPUoff ( )	Coupe l'énergie au module TPU Time Processor Unit
TPUon ( )	Applique l'énergie au module TPU Time Processor Unit
TSerByteAvail ( )	Vérifie si un octet est disponible dans le buffer du canal spécifié.
TSerClose ( )	Ferme le port TPU série du canal spécifié.
TSerGetByte ( )	Reçois l'octet suivant de la file d'entrée du canal ou attends l'octet suivant s'ils ne sont pas disponibles.
TSerInFlush ( )	Vide la file d'entrée des canaux.
TSerOpen ( )	Ouvre la canal TPU pour les Entrées / Sorties série.
TSerPutByte ( )	Écrit un octet de données dans la file de sortie du canal spécifié.
TSerResetBaud ( )	change la vitesse de communication actuelle en baud du canal sélectionné à la nouvelle vitesse spécifiée.

Listing du programme en TxBasic de la gestion de l'enregistreur de données :

Model 800

```
// ce programme permet l'acquisition de données de la SW il transmet les à Matlab
// Il fonctionne avec le fichier jan2006cell2vide.m
//avec vérification de communication
```

EXTENSION

SimGetFSys,SimSetFSys,SerSetBaud,TSerByteAvail,TSerOpen,TSerGetByte

EXTENSION StopWatchTime,

StopWatchStart,TSerClose,TSerInFlush,TSerPutByte,ADoff,SerActivate

```
str1$=" ETS MONTREAL"
```

```
str2$=" LABO LIO "
```

```
GOSUB display
```

```
sleep 0
```

```
sleep 100
```

```
First: disponibil=TSerByteAvail(8)
```

```
TSerOpen(8,3,0,256,32,115200,N,8,1)
```

```
TSerInFlush(8)
```

```
sleep 00
```

```
sleep 50
```

```
disponible=TSerByteAvail(8)
```

```
print "Octetes disponibles sont ",disponible
```

```
WHILE disponible = 0
```

```
TSerOpen(8,3,0,256,32767,115200,N,8,1)
```

```
str1$="PAS DE RECEPTION"
```

```
str2$="Verif Connexion?"
```

```
gosub display
```

```
sleep 0
```

```
sleep 50
```

```
disponible=TSerByteAvail(8)
```

```
TSerInFlush(8)
```

```
WEND
```

```
TSerClose(8)
```

```
x2=1
```

```
Continue=1
```

```
//----- collecte du fichier vide sans effort -----
```

```
str1$="Propulsion Vide"
```

```
str2$="<OUI 5sec NON>"
```

```

GOSUB display
PSET 7,6,5,4

PIN45:iff (pin(5)=0 |pin(4)=0) // pas de propulsion vide
      vide=0
      store x2,vide
      goto Avant
endif
iff (pin(6)=0 | pin(7)=0) // oui propulsion vide
      vide=1
      store x2,vide
      goto sortie10
endif
goto PIN45
sortie10:while (pin (4)=0 | pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 )
      wend

PSET 7,6,5,4
str1$="Demarrer mesure"
str2$="Appuyer >>Triger"
gosub display

refaire11:iff (pin(4)=0 ) // oui continuer
      goto sortie11
endif
goto refaire11
sortie11:while (pin (4)=0 | pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 )
      wend

str1$="Collect en cours"
str2$="Propulsion Vide "
GOSUB display
sleep 0
sleep 100

SimSetFSys(39000000)
SerSetBaud(9600)
TSerOpen(8,3,0,32768,32768,115200,N,8,1)
n=1:tail_Blocv=241* 5*12
while n<=tail_Blocv

      sw1v=TSerGetByte(8)
      store x2,sw1v
      n=n+1

```

```

wend
    TSerClose(8)//

//***** Fin collecte fichier vide *****
// ***** Collecte données propulsion *****

Avant: SimSetFSys(4000000)
    SerSetBaud(9600)
    adrcontinue=x2
    x2=x2+1// laisser une case pour stocker continue
//----- temps de mesure-----
DEBUT:
    str1$="Temps de mesure?"
    str2$="<<Appuyer sur >>"
    gosub display
    PSET 7,6,5,4
refaire1:if(pin (4)=0| pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 ) goto sortie1
    goto refaire1
sortie1:while (pin (4)=0| pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 )
    wend

//*****
    str1$="10sec   55sec"
    str2$="30sec   45sec"
    gosub display
//*****
    PSET 7,6,5,4
comm1: iff pin(7)=0
        temps_mesure=10
        goto suite2
    endif
    iff pin(6)=0
        temps_mesure=30
        goto suite2
    endif
    iff pin(5)=0
        temps_mesure=45
        goto suite2
    endif
    iff pin(4)=0
        temps_mesure=55
        goto suite2
    endif
endif

```

```

        goto comm1

suite2: while (pin (7)=0 | pin(6)=0 |pin(5)=0 | pin(4)=0)
        wend
        store x2,temps_mesure
        vv=x2-1

//*****
        str1$="<<Temps de mes>>"
        str2$="choisit =  sec"
        gosub display
        nbr!=temps_mesure
        GOSUB display_Nb1

//*****
        PSET 7,6,5,4
refaire4:if(pin (4)=0| pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 ) goto sortie4
        goto refaire4
sortie4:while (pin (4)=0| pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 )
        wend
//***** nombre de mesures *****
        PSET 7,6,5,4
        str1$="Nbre de mesure ?"
        str2$="<< Appuyer >> "
        gosub display
        PSET 7,6,5,4
refaire2:if(pin (4)=0| pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 ) goto sortie2
        goto refaire2
sortie2:while (pin (4)=0| pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 )
        wend
//*****
        str1$="1mes      6mes"
        str2$="4mes      5mes"
        gosub display
//*****
comm: iff pin(7)=0
        Nb_mesure=1
        goto suite
    endif
    iff pin(6)=0
        Nb_mesure=4
        goto suite
    endif
    iff pin(5)=0

```

```

        Nb_mesure=5
        goto suite
    endif
    iff pin(4)=0
        Nb_mesure=6
        goto suite
    endif
    goto comm
suite: while (pin (7)=0 | pin(6)=0 |pin (5)=0 | pin(4)=0)
    wend
    ptrt=x2
    store x2,Nb_mesure
    cc=x2-1
//*****

    str1$="<<Nb de mesure>>"
    str2$="choisit =  mes"
    gosub display
    nbr!=Nb_mesure
    GOSUB display_Nb1
    PSET 7,6,5,4
refaire3:if(pin (4)=0| pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 ) goto sortie3
    goto refaire3
sortie3:while (pin (4)=0| pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 )
    wend

    for t=1 to Nb_mesure
        PSET 7,6,5,4
        str1$="Demarrer mesure"
        str2$="Appuyer >>Triger"
        gosub display
refaire5:iff (pin(4)=0 ) // oui continuer
        goto sortie5
    endif
    goto refaire5
sortie5:while (pin (4)=0 | pin(5)=0 |pin (6)=0 | pin(7)=0 )
    wend

//*****

    str1$="Collect en cours"
    str2$="mesure #      "
    gosub display
    //TSerPutByte(3,12)
    nbr!=t

```

```

GOSUB display_Nb1

//*****
SimSetFSys(39000000)
SerSetBaud(9600)
n=1:tail_Bloc=241* temps_mesure*12
TSerOpen(8,3,0,32768,32768,115200,N,8,1)
TSerInFlush(8)
print "Octetes disponibles en mesure effort ",TSerByteAvail(8)
while n<=tail_Bloc

    sw1=TSerGetByte(8)
    store x2,sw1
    n=n+1
wend
TSerInFlush(8)
TSerClose(8)
print "Octetes disponibles III sont ",TSerByteAvail(8)
SimSetFSys(4000000)
SerSetBaud(9600)

//-----Continuer Y/N-----
IF (Nb_mesure=1 | t=Nb_mesure) goto FIN

//*****
PSET 4,5,6,7
str1$="Continuer? (O/N)"
str2$="Oui      Non"
gosub display
//*****
cont:  iff (pin(5)=0 | pin(4)=0) // non arreter
        goto FIN
        endif
        iff (pin(6)=0 | pin(7)=0) // oui continuer
        goto sortie
        endif
        goto cont
sortie: while (pin (4)=0 | pin(5)=0 | pin (6)=0 | pin(7)=0 )
        wend

//*****
iff(temps_mesure=45 | temps_mesure=55)
    str1$="attente de 5 mn "
    str2$="          "

```

```

        gosub display
        sleep 00
        sleep 8000
    endif
next t

t=t-1
FIN:  Nb_mesure=t
      store ptrt,t
      ptrt=ptrt-1

//*****
str1$="Modif temps mes?"
str2$="Oui   Non"
gosub display
//*****
PSET 4,5,6,7
cont22:iff (pin(4)=0 | pin(5))=0 // Pas de changements
        goto ARRET
endif

iff (pin(6)=0 | pin(7)=0)// oui Changement

        Continue=Continue+1
        iff(temps_mesure=45 | temps_mesure=55)
        str1$="attente de 5 mn "
        str2$="          "
        gosub display
        sleep 00
        sleep 5000
        endif
        GOTO DEBUT
endif
goto cont22
while (pin (5)=0 | pin(6)=0 )
wend

ARRET: //stop
x3=adrcontinue
store x3,Continue // Continue =le nombre de fois on a change le temps de mesure

//*****
str1$="Collect terminee"
str2$="          "

```

```

        gosub display
        sleep 150
        x3=adrcontinue
deb_verif:str1$="Envoie >> MatLab"
        str2$="Oui      Non"
        gosub display
        PSET 5,6
matwait:iff pin(6)=0 // oui envoyer
        goto wait
        endif
        iff pin(5)=0 // Non attendre
            str1$="Envoie >> MatLab"
            str2$="  Annulle      "
            gosub display
            sleep 100
            goto arret_prog
        endif
        goto matwait
wait:  while (pin (5)=0 | pin(6)=0 )
        wend

//***** verification de communication

comm_verif: ptr1=0
        store ptr1,00:ptr1=0
        Tcom = get(ptr1):ptr1=0
        while Tcom<> 22
            UGET 38400,1,ptr1,1 :ptr1=0
            Tcom=GET(ptr1):ptr1=0

            str1$="PAS DE COMMUNICA"
            str2$="Verif Conexion? "
            gosub display
            sleep 0
            sleep 10
            Wend
            tai=2 // on envoie 22 et vide
            Usend 38400,tai,ptr1 :ptr1=0 // verif
            str1$="COMMUNIC ÉTABLIE"
            str2$=" AVEC MatLab  "
            gosub display
            sleep 0
            sleep 75
            ptr1=0

```

```

Tcomx=1
while Tcomx <> 69
  UGET 38400,1,ptr1,1 :ptr1=0
  Tcomx=GET(ptr1):ptr1=0
Wend
sleep 0
sleep 400
//-----Envoie de donnees a matlab -----

Envoyer:str1$="Envoie >> MatLab"
str2$=" EN Cours "
gosub display
SimSetFSys(4000000)
SerSetBaud(9600)
iff vide =1
  tail_Bloc1=241*12*5
  x3=2
  USEND 38400,tail_Bloc1,x3
endif
x3=adrcontinue
print "Continue mem = ",get(x3)
tem_mes=get(x3) //recuperation de temps de mesure
nb_mes=get(x3) //recuperation du nombre de mesure
x3=adrcontinue:z=3

For Envoie= 1 to Continue
  iff Envoie =1
    z=3
  else
    z=2
  endif
  Usend 38400,z,x3 //USEND vitesse,count,pointeur variable
  tail_Bloc=241*12*nb_mes*tem_mes
  X=(tail_Bloc)/241

For k= 1 to 241
  USEND 38400,X,x3
next k
  tem_mes=get(x3)
  x3=x3-2
  z=2
Next Envoie
str1$="Envoie >> MatLab"
str2$=" TERMINE "

```

```

    gosub display
    str1$="Reenvoyer      "
    str2$=" >> Matlab O/N "
    gosub display
    sleep 200
    goto deb_verif
arret_prog: str1$="DEBUT PROGRAMME"
            str2$="      "
            gosub display
            sleep 0
            sleep 400
            goto First
Trouble: str1$="ERREUR  FATALE"
        str2$="      "
        gosub display
halte: stop
//-----Routines d'affichage-----

```

```

display:TSerOpen(3,2,1,0,2,9600,N,8,1)
        //TSerPutByte(3,26)
        //TSerPutByte(3,26)
        sleep 0
        TSerPutByte(3,12)
        TSerPutByte(3,1)
        TSerPutByte(3,20)
        TSerPutByte(3,23)
        TSerPutByte(3,3)
        x=900000
        for jj=1 to 2
        store x,str1
        x= 900000
        for j=x to x+16
        TSerPutByte (3,get(j))
        //sleep 0
        //sleep 2
        j=j-1
        next j
        store x,str2
        TSerPutByte(3,17)
        TSerPutByte(3,0)
        TSerPutByte(3,1)
        next jj
        TSerPutByte(3,4)
        sleep 0

```

```
    sleep 50
    TSerClose(3)
    return
display_Nb1:TSerOpen(3,2,1,0,64,9600,N,8,1)
    sleep 0
    TSerPutByte(3,20)//
    diz=FIX(nbr/10)
    gosub test
    TSerPutByte(3,17) //deplacer le curseur a
    TSerPutByte(3,10) //colonne 11
    TSerPutByte(3,01) // ligne 2
    TSerPutByte(3,af)
    TSerPutByte(3,4) // cacher le curseur
    TSerPutByte(3,20) // scroll off
    uni=nbr-(FIX(nbr/10))*10
    diz=uni
    gosub test
    TSerPutByte(3,17)
    TSerPutByte(3,11)
    TSerPutByte(3,01)
    TSerPutByte(3,af)
    TSerPutByte(3,4)
    TSerClose(3)

    return

test: if diz=0 af=48
    if diz=1 af=49
    if diz=2 af=50
    if diz=3 af=51
    if diz=4 af=52
    if diz=5 af=53
    if diz=6 af=54
    if diz=7 af=55
    if diz=8 af=56
    if diz=9 af=57
    return
```

## **ANNEXE 7**

### **DÉTAILS DE LA MÉTHODE 1 DE CALCUL DU POINT D'APPLICATION DES FORCES ( PFA )**

L'évaluation du Point d'application des forces lors de la propulsion par fauteuil roulant en utilisant uniquement les forces étant décrite par la méthode du cosinus, le but de cette annexe est de démontrer que la formulation ainsi trouvée ne dépend pas du cadran dans lequel la main y est ni de du type de la roue soit gauche ou droite, elle devra rester valable durant la durée de propulsion. La SmartWheel est utilisée pour la collecte des forces ainsi appliquées à la jante de la roue.

Les forces sont définies dans l'espace 3-D [x y z] par :

$F_x$  : le long de la ligne de progression de la propulsion selon l'axe x,

$F_y$  : inférieur -supérieur selon l'axe y,

$F_z$  : médio-latérale sortant de la roue selon l'axe z.

Dans le l'espace 3-D [r t z] la force totale peut être décomposée en :

$F_r$  : radiale dans la direction du centre de la roue,

$F_t$  : tangente à la circonférence du cerceau de la roue,

$F_z$  : médio-latérale sortant de la roue.

Le PFA en deux dimensions peut être défini comme l'angle de rotation entre deux systèmes de coordonnées de deux plans sagittales, le plan [x y] et le plan [r t] selon les forces radiales et tangentielles.

Le PFA est déterminé par  $(\varphi, R)$  où  $\varphi$  est l'angle que fait le PFA par rapport à l'horizontale, R est la rayon du cerceau de la roue en coordonnées cylindrique ayant comme origine le centre de la roue.

Pour évaluer l'angle  $\varphi$  on doit considérer quatre cas, les deux cadrans supérieurs de la roue pour les deux roues, la roue gauche et droite :

### Cas 1 : Roue droite, cadran 1 (supérieur gauche)

Dans ce cadran la prise de la roue commence, analysons les forces qui s'appliquent pour en déterminer le PFA :

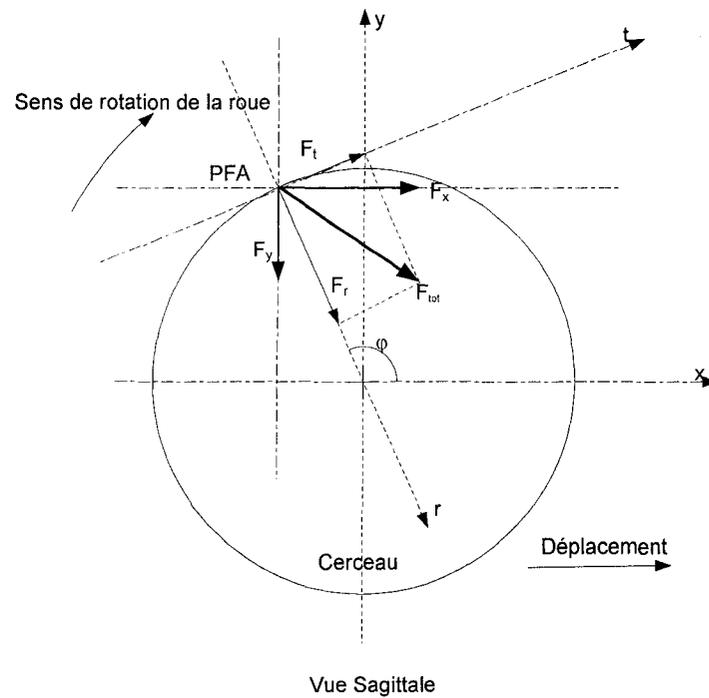


Figure 68 Force totale dans les 2 repères, roue droite cadran supérieur gauche

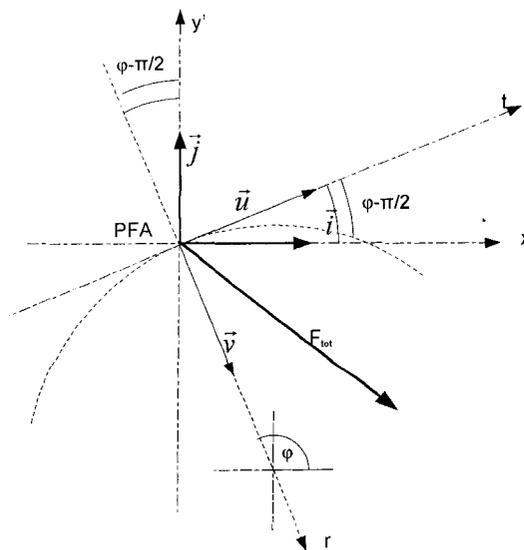


Figure 69 Détails de la force totale, roue droite cadran supérieur gauche

Déterminons les vecteurs forces dans les deux repères

$$\begin{aligned}\vec{F}_{tot} &= F_x \vec{i} + F_y \vec{j} \\ \vec{F}_{tot} &= F_t \vec{u} + F_r \vec{v}\end{aligned}\tag{A7.1}$$

Les vecteurs unitaires sont :

$$\begin{aligned}\vec{i} &= \vec{u} \cos(\varphi - \pi/2) + \vec{v} \sin(\varphi - \pi/2) \\ \vec{j} &= \vec{u} \sin(\varphi - \pi/2) - \vec{v} \cos(\varphi - \pi/2)\end{aligned}\tag{A7.2}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned}\vec{i} &= \vec{u} \sin(\varphi) - \vec{v} \cos(\varphi) \\ \vec{j} &= -\vec{u} \cos(\varphi) - \vec{v} \sin(\varphi)\end{aligned}\tag{A7.3}$$

Les équations (A7.1) et (A7.3) donnent :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{tot} &= F_x (\vec{u} \sin(\varphi) - \vec{v} \cos(\varphi)) + F_y (-\vec{u} \cos(\varphi) - \vec{v} \sin(\varphi)) \\ \vec{F}_{tot} &= (F_x \sin(\varphi) - F_y \cos(\varphi)) \vec{u} - (F_x \cos(\varphi) + F_y \sin(\varphi)) \vec{v}\end{aligned}$$

En considérant l'équation (A7.1) : Les forces tangentielle et radiales sont exprimées par :

$$\begin{aligned}F_t &= F_x \sin(\varphi) - F_y \cos(\varphi) \\ F_r &= -(F_x \cos(\varphi) + F_y \sin(\varphi))\end{aligned}\tag{A7.4}$$

La solution de l'équation (A7.4) est :

$$\cos \varphi = -\frac{F_x F_r + F_y F_t}{F_{tot}^2}\tag{A7.5}$$

### Cas 2 : Roue droite, cadran 2 (supérieur droit)

Dans ce cadran la prise de la roue commence, analysons les forces qui s'appliquent pour en déterminer le PFA :

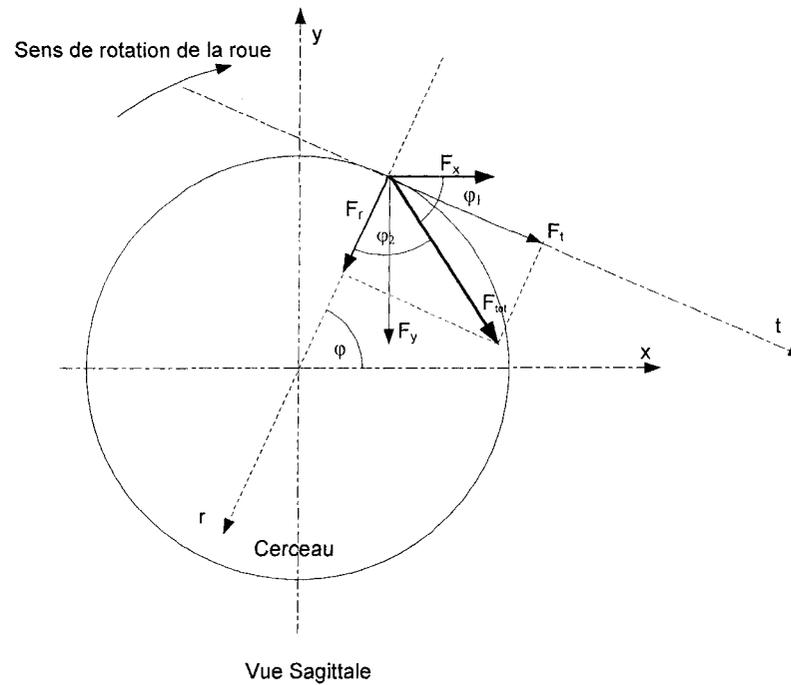


Figure 70 Force totale dans les 2 repères, roue droite cadran supérieur droit

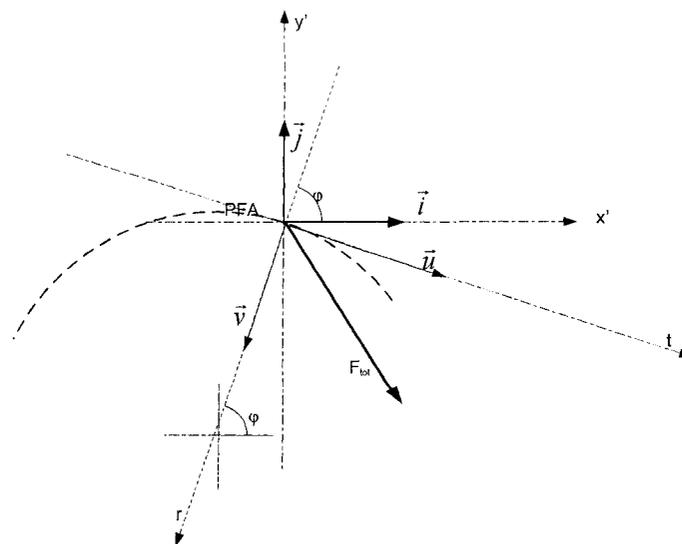


Figure 71 Détails de la force totale, roue droite cadran supérieur droit

Dans les deux repères la force totale est donnée par :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{tot} &= F_x \vec{i} + F_y \vec{j} \\ \vec{F}_{tot} &= F_t \vec{u} + F_r \vec{v}\end{aligned}\tag{A7.6}$$

Les vecteurs unitaires selon la figure 73 sont :

$$\begin{aligned}\vec{i} &= \vec{u} \sin \varphi - \vec{v} \cos \varphi \\ \vec{j} &= -\vec{u} \cos \varphi - \vec{v} \sin \varphi\end{aligned}\tag{A7.7}$$

En remplaçant dans l'équation (A7.6)  $F_{tot}$  sera :

$$\begin{aligned}F_{tot} &= F_x (\vec{u} \sin \varphi - \vec{v} \cos \varphi) + F_y (-\vec{u} \cos \varphi - \vec{v} \sin \varphi) \\ F_{tot} &= (F_x \sin \varphi - F_y \cos \varphi) \vec{u} + (-F_x \cos \varphi - F_y \sin \varphi) \vec{v}\end{aligned}\tag{A7.8}$$

Les équations (A7.6) et (A7.8) donnent :

$$\begin{aligned}F_r &= -F_x \cos \varphi - F_y \sin \varphi \\ F_t &= F_x \sin \varphi - F_y \cos \varphi\end{aligned}\tag{A7.9}$$

L'équation (A7.9) est identique à l'équation (A7.4), la solution est donc donnée par (A7.5):

$$\cos \varphi = -\frac{F_x F_r + F_y F_t}{F_{tot}^2}\tag{A7.10}$$

### Cas 3 : Roue Gauche, cadran 1 (supérieur droit)

Dans ce cadran la prise de la roue commence, analysons les forces qui s'appliquent pour en déterminer le PFA :

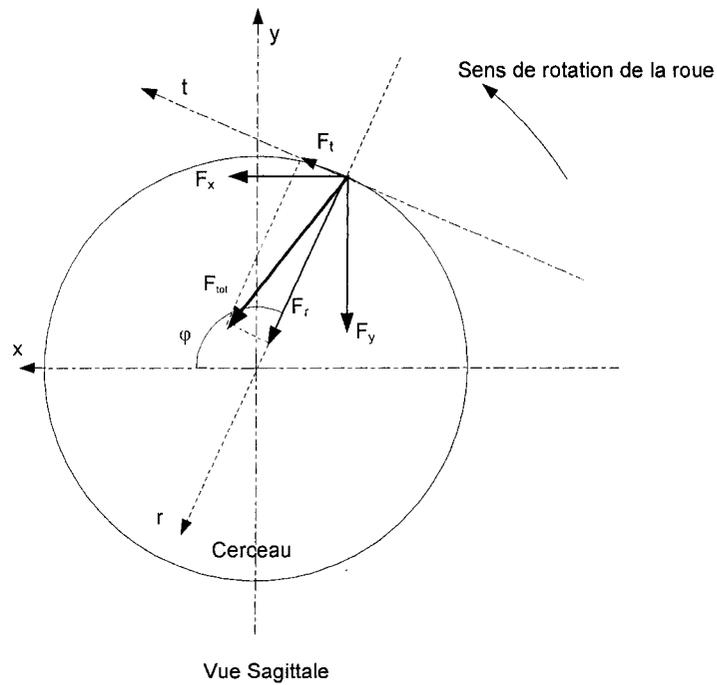


Figure 72 Force totale dans les 2 repères, roue gauche cadran supérieur droit

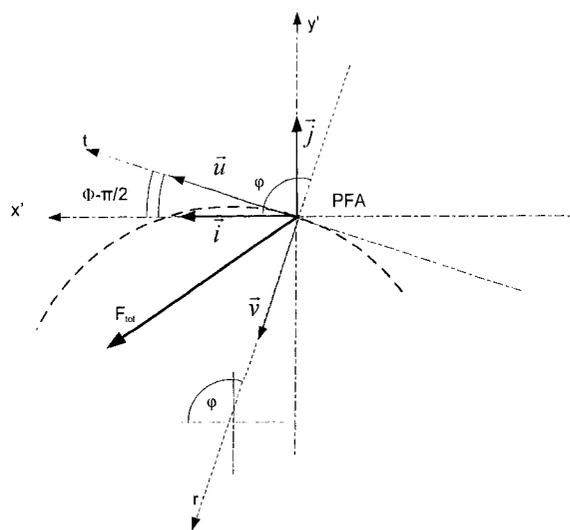


Figure 73 Détails de la force totale, roue gauche cadran supérieur droit

Déterminons les vecteurs forces dans les deux repères :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{tot} &= F_x \vec{i} + F_y \vec{j} \\ \vec{F}_{tot} &= F_t \vec{u} + F_r \vec{v}\end{aligned}\tag{A7.11}$$

Les vecteurs unitaires sont :

$$\begin{aligned}\vec{i} &= \vec{u} \cos(\varphi - \pi/2) + \vec{v} \sin(\varphi - \pi/2) \\ \vec{j} &= \vec{u} \sin(\varphi - \pi/2) - \vec{v} \cos(\varphi - \pi/2)\end{aligned}\tag{A7.12}$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned}\vec{i} &= \vec{u} \sin(\varphi) - \vec{v} \cos(\varphi) \\ \vec{j} &= -\vec{u} \cos(\varphi) - \vec{v} \sin(\varphi)\end{aligned}\tag{A7.13}$$

Les vecteurs unitaires sont les mêmes que trouvés dans le cas 1 :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{tot} &= F_x (\vec{u} \sin(\varphi) - \vec{v} \cos(\varphi)) + F_y (-\vec{u} \cos(\varphi) - \vec{v} \sin(\varphi)) \\ \vec{F}_{tot} &= (F_x \sin(\varphi) - F_y \cos(\varphi)) \vec{u} - (F_x \cos(\varphi) + F_y \sin(\varphi)) \vec{v}\end{aligned}\tag{A7.14}$$

Les équations (A7.11) et (A7.14) donnent :

$$\begin{aligned}F_t &= F_x \sin(\varphi) - F_y \cos(\varphi) \\ F_r &= -(F_x \cos(\varphi) + F_y \sin(\varphi))\end{aligned}\tag{A7.15}$$

L'équation (A7.15) est identique à l'équation (A7.4), la solution de cette équation est donc:

$$\cos \varphi = -\frac{F_x F_r + F_y F_t}{F_{tot}^2}\tag{A7.16}$$

#### Cas 4 : Roue Gauche, cadran 2 (supérieur gauche)

Dans ce cadran la prise de la roue commence, analysons les forces qui s'appliquent pour en déterminer le PFA :

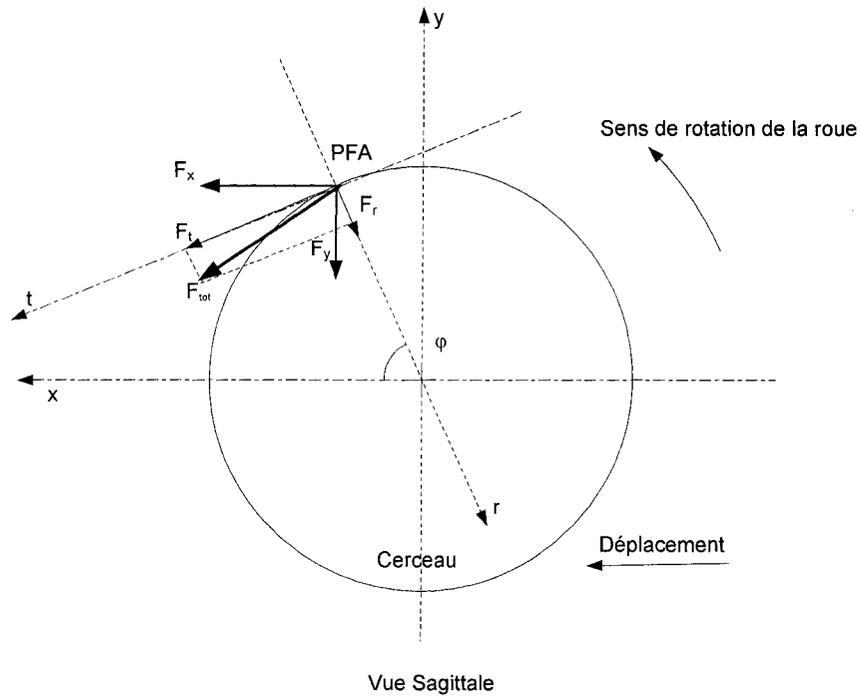


Figure 74 Force totale dans les 2 repères, roue gauche cadran supérieur gauche

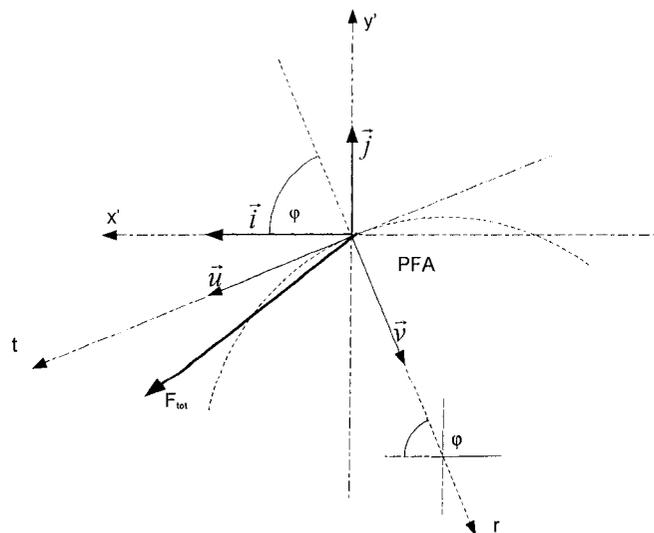


Figure 75 Détails de la force totale, roue gauche cadran supérieur gauche

Déterminons les vecteurs forces dans les deux repères :

$$\begin{aligned}\vec{F}_{tot} &= F_x \vec{i} + F_y \vec{j} \\ \vec{F}_{tot} &= F_t \vec{u} + F_r \vec{v}\end{aligned}\tag{A7.17}$$

Les vecteurs unitaires sont :

$$\begin{aligned}\vec{i} &= \vec{u} \sin(\varphi) - \vec{v} \cos(\varphi) \\ \vec{j} &= -\vec{u} \cos(\varphi) - \vec{v} \sin(\varphi)\end{aligned}\tag{A7.18}$$

En remplaçant dans l'équation (A7.17)  $F_{tot}$  sera :

$$\begin{aligned}F_{tot} &= F_x (\vec{u} \sin \varphi - \vec{v} \cos \varphi) + F_y (-\vec{u} \cos \varphi - \vec{v} \sin \varphi) \\ F_{tot} &= (F_x \sin \varphi - F_y \cos \varphi) \vec{u} + (-F_x \cos \varphi - F_y \sin \varphi) \vec{v}\end{aligned}\tag{A7.19}$$

Les équations (A7.17) et (A7.19) donnent :

$$\begin{aligned}F_r &= -F_x \cos \varphi - F_y \sin \varphi \\ F_t &= F_x \sin \varphi - F_y \cos \varphi\end{aligned}\tag{A7.20}$$

L'équation (A7.20) est identique à l'équation (A7.4), la solution de cette équation est :

$$\cos \varphi = -\frac{F_x F_r + F_y F_t}{F_{tot}^2}\tag{A7.21}$$

Les équations (A7.5), (A7.11), (A7.16) et (A7.21) qui donnent le cosinus de l'angle du PFA sont identiques. Le principe de calcul du PFA par le rapport de forces mesurées dans le repère [x y]  $F_x$  et  $F_y$  et les forces calculées dans le repère [r t]  $F_t$  et  $F_r$  est identique selon qu'on travaille avec la roue droite ou gauche et encore si on est en début de propulsion donc dans le 1 cadran ou vers le milieu ou la fin de propulsion donc dans le cadran 2. L'emploi de cette formulation durant toute la durée du cycle de propulsion reste valable.

## BIBLIOGRAPHIE

- Aissaoui, R., Arabi, H., Lacoste, M., Zalzal, V., & Dansereau, J. (2002). Biomechanics of manual wheelchair propulsion in elderly. System tilt and back recline angles. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, 81*(2), 94-100.<
- Asato, K. T., Cooper, R. A., Robertson, R. N., & Ster, J. F. (1993). SMARTWheels: development and testing of a system for measuring manual wheelchair propulsion dynamics. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on, 40*(12), 1320-1324.
- Boninger, M. L., Cooper, R. A., Baldwin, M. A., Shimada, S. D., & Koontz, A. (1999). Wheelchair pushrim kinetics: Body weight and median nerve function. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 80*(8), 910-915.
- Boninger, M. L., Cooper, R. A., Robertson, R. N., & Shimada, S. D. (1997). Three-dimensional pushrim forces during two speeds of wheelchair propulsion. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation, 76*(5), 420-426.
- Boninger, M. L., Souza, A. L., Cooper, R. A., Fitzgerald, S. G., Koontz, A. M., & Fay, B. T. (2002). Propulsion patterns and pushrim biomechanics in manual wheelchair propulsion. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 83*(5), 718-723.
- Brauer, R. L., & Hertig, B. A. (1981). Torque generation on wheelchair handrims. *Biomech Symp, Presented at the Jt ASME/ASCE Mech Conf, Jun 22-24 1981, 43*, 113-116.
- Brubaker, C. E., S.Ross, & McLaurin, C. A. (1982). *Effect of seat position on handrim force*. Paper presented at the 5th Annual Conf rehabilitation Engineering, 11.
- Coleman, H. W., & Steele, W. G. (1999). *Experimentation and uncertainty analysis for engineers* (2nd ed.). New York, N.Y.: J. Wiley and Sons.
- Cooper, R. (1997). Methods for determining three-dimensional wheelchair pushrim forces and moments: A technical note. *Journal of rehabilitation research and development, 34*(2), 162-170.
- Cooper, R. A. (1990). An exploratory study of racing wheelchair propulsion dynamics. *Adapted physical Activity Quarterly, 7*, 74-85.

- Cooper, R. A. (1990). Wheelchair racing sport science: a review. *Rehabilitation Res Dev*, 27, 295-312.
- Cooper, R. A., Boninger, M. L., VanSickle, D. P., Robertson, R. N., & Shimada, S. D. (1997). Uncertainty analysis for wheelchair propulsion dynamics. *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on [see also IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation]*, 5(2), 130-139.
- Cooper, R. A., & Cheda, A. (1989). *Measurement of racing wheelchair propulsion torque*. Paper presented at the Engineering in Medicine and Biology Society, 1989. Images of the Twenty-First Century. Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering, 1530-1531
- Cooper, R. A., Robertson, R. N., VanSickle, D. P., Boninger, M. L., & Shimada, S. D. (1996). Projection of the point of force application onto a palmar plane of the hand during wheelchair propulsion. *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 4(3), 133-142.
- Cooper, R. A., VanSickle, D. P., Robertson, R. N., Boninger, M. L., & Ensminger, G. J. (1995). A method for analyzing center of pressure during manual wheelchair propulsion. *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on [see also IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation]*, 3(4), 289-298.
- Dabonneville, M., Vasein, P., Kauffmann, P., Saint Rémy, N. d., Couétard, Y., & Cid, M. (2005). A self-contained Wireless wheelchair ergometer designed for biomechanical measure in real life conditions. *Technology and disability*, 17, 63-76.
- Dallmeijer, A. J., van der Woude, L. H. V., Veeger, H. E. J., & Hollander, A. P. (1998). Effectiveness of force application in manual wheelchair propulsion in persons with spinal cord injuries. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 77(3), 213-221.
- Dally, J. W., & Riley, W. F. (1991). *Experimental stress analysis*
- De Groot, S., Veeger, H. E. J., Hollander, A. P., & van der Woude, L. H. V. (2002). Consequence of feedback-based learning of an effective hand rim wheelchair force production on mechanical efficiency. *Clinical Biomechanics*, 17(3), 219-226.
- Desroches, G., Aissaoui, R., & Bourbonnais, D. (2006). Manual wheelchair propulsion: the effect of system tilt and seat to backrest angle on the load sustained by the shoulder. (*In presse*) *Journal of Rehabilitation Research and Development*.

- Harman, T. L. (1991). *The Motorola MC68332 microcontroller product design, assembly language programming, and interfacing*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- Liu, D., Cooper, R., Tai, C., VanSickle, D., Tassick, M., & Boninger, M. (1997). Wireless infrared data communication for a SMARTWheel. *Proceedings of the 1997 19th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, Oct 30-Nov 2 1997 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology - Proceedings*, 4, 1868-1870.
- Martin, X., Tordi, N., Bougeneot, M. P., & Rouillon, J. D. (2002). Analyse critiques des matériels et des méthodes d'évaluation de l'aptitude physique chez le blessé médullaire en fauteuil roulant. *Science & Sports*, 17, 209-217.
- Niesing, R., Eijskoot, F., Kranse, R., den Ouden, A. H., Storm, J., Veeger, H. E. J., et al. (1990). Computer-controlled wheelchair ergometer. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 28(4), 329-338.
- Robertson, R. N., Boninger, M. L., Cooper, R. A., & Shimada, S. D. (1996). Pushrim forces and joint kinematics during wheelchair propulsion. *Archives of Physical and Medical Rehabilitation*, 77, 856-864.
- Robertson, R. N., Boninger, M. L., Cooper, R. A., & Shimada, S. D. (1996). Pushrim forces and joint kinetics during wheelchair propulsion. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 77(9), 856-864.
- Rodgers, M. M., Gayle, G. W., Figoni, S. F., Kobayashi, M., Lieh, J. H., & Glaser, R. M. (1994). Biomechanics of Wheelchair Propulsion During Fatigue. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 75(1), 85-93.
- Rodgers, M. M., Keyser, R. E., Gardner, E. R., Russell, P. J., & Gorman, P. H. (2000). Influence of trunk flexion on biomechanics of wheelchair propulsion. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 37(3), 283-295.
- Ruggles, D. L., Calahan, T., & An, K.-N. (1994). Biomechanics of Wheelchair Propulsion by Able-Bodies Subjects. *Archives of Physical and Medical Rehabilitation*, 75, 540-544.
- Sabick, M. B., Zhao, K. D., & An, K.-N. (1999). Comparison of methods to compute the point of force application in handrim wheelchair propulsion. *1999 Bioengineering Conference, Jun 16-Jun 20 1999 American Society of*

- Mechanical Engineers, Bioengineering Division (Publication) BED*, 42, 641-642  
BN - 640-7918-1611-7917.
- Sanderson, D. J., & Sommer, H. J., III. (1985). Kinematic features of wheelchair propulsion. *Journal of Biomechanics*, 18(6), 423-429.
- Schantz, P. (1999). Movement and muscle activity pattern in wheelchair ambulation by persons with para- and tetraplegia. *Scandinavian journal of rehabilitation medicine*, 31(2), 67-76.
- Shimada, S. D., Robertson, R. N., Boninger, M. L., & Cooper, R. A. (1998). Kinematic characterization of wheelchair propulsion. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 35, 210-218.
- Sie, I. H., Waters, R. L., Adkins, R. H., & Gellman, H. (1992). Upper Extremity Pain in the Postrehabilitation Spinal-Cord Injured Patient. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 73(1), 44-48.
- Strauss, M. G., Maloney, J., Ngo, F., and Phillips, M. (1991). Measurement of the dynamic forces during manual wheelchair propulsion. *American Society of Biomechanics, Proceedings*, 210-211.
- Strauss, M. G., Moeinzadeh, M. H., Schneller, M., and Thimble, J. (1989). *The development of an instrumented wheel to determine the handrim forces during wheelchair propulsion*. Paper presented at the ASME Winter Annual Meeting, 53-54.
- Tupling, S. J., Davis, G. M., Pierrynowski, M. R., & Shephard, R. J. (1986). Arm strength and impulse generation: Initiation of wheelchair movement by the physically disabled. *Ergonomics*, 29(2), 303-311.
- van der Linden, M., Valent, L., Veeger, H. E. J., & van der Woude, L. H. V. (1996). The effect of wheelchair handrim tube diameter on propulsion efficiency and force application (tube diameter and efficiency in wheelchairs). *Rehabilitation Engineering, IEEE Transactions on [see also IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation]*, 4(3), 123-132.
- van der Linden, M., Valent, L., Veeger, H. E. J., & van der Woude, L. H. V. (1996). Effect of wheelchair handrim tube diameter on propulsion efficiency and force application (tube diameter and efficiency in wheelchairs). *IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering*, 4(3), 125-132.
- van der Woude, L. H. V., Bakker, W. H., Elkhuizen, J. W., Veeger, H. E. J., & Gwinn, T. (1998). Propulsion technique and anaerobic work capacity in elite wheelchair

- athletes: cross-sectional analysis. *American Journal of Physical Medicine & Rehabilitation*, 77(3), 222-234.
- van der Woude, L. H. V., Veeger, D. H., Rozendaal, L. A., & Sargeant, A. J. (1989). Optimum cycle frequencies in handrim wheelchair propulsion. *European appl Physio*, 58, 625-632.
- van der Woude, L. H. V., Veeger, H. E. J., Dallmeijer, A. J., Janssen, T. W. J., & Rozendaal, L. A. (2001). Biomechanics and physiology in active manual wheelchair propulsion. *Medical Engineering & Physics*, 23(10), 713-733.
- van Drongelen, S., Veeger, D. H., van der Woude, L. H., Angenot, E. L., & Thomas, J. (2002, 17-18 june 2002). *Mechanical Strain in the Upper Extremities During Wheelchair Related Activities*. Paper presented at the 4th Meeting of the International Shoulder Group,, Cleveland, Ohio.
- Veeger, H. E. J., Lute, E. M. C., Roeleveld, K., & Vanderwoude, L. H. V. (1992). Differences in Performance between Trained and Untrained Subjects During a 30-S Sprint Test in a Wheelchair Ergometer. *European Journal of Applied Physiology and Occupational Physiology*, 64(2), 158-164.
- Veeger, H. E. J., van der Woude, L. H. V., & Rozendal, R. H. (1991). Load on the upper extremity in manual wheelchair propulsion. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 1(4), 270-280.
- Veeger, H. E. J., Vanderwoude, L. H. V., & Rozendal, R. H. (1989). Wheelchair propulsion technique at different speeds. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 21, 197-203.
- Veeger, H. E. J., Vanderwoude, L. H. V., & Rozendal, R. H. (1992). A Computerized Wheelchair Ergometer - Results of a Comparison Study. *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 24(1), 17-23.
- Wu, H.-W., Berglund, L. J., Su, F.-C., Yu, B., Westreich, A., Kim, K.-J., et al. (1998). Instrumented wheel for kinetic analysis of wheelchair propulsion. *Journal of Biomechanical Engineering, Transactions of the ASME*, 120(4), 533-535.