

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 DESCRIPTION DU VÉHICULE	3
1.1 Principales caractéristiques	3
1.2 Configuration	3
1.3 Particularités	3
CHAPITRE 2 SÉLECTION DES CAPTEURS	5
2.1 Besoins	5
2.1.1 Santé de l'appareil	5
2.1.2 Performances de l'appareil	5
2.2 Priorisation et catégories des capteurs	6
2.2.1 Mesures de diagnostic	6
2.2.2 Mesures de performances	7
2.2.3 Mesures de performances avancées	7
2.2.4 Mesures de validation et développement	7
2.3 Sélection des accéléromètres	8
2.4 Sélection des encodeurs	12
2.5 Sélection des capteurs de température	14
2.6 Sélection des capteurs de couple et portance	15
2.6.1 Particularités de la transmission sans fil	17
2.6.2 Système Microstrain®	17
2.6.2.1 Alimentation	17
2.6.2.2 Conversion analogique numérique	18
2.7 Définition de l'interface nécessaire au diagnostic	19
CHAPITRE 3 SÉLECTION DU SYSTÈME D'ACQUISITION	21
3.1 Les besoins en entrées et interfaces de communications	21
3.2 Programmation du système d'acquisition	22
3.3 Portabilité du système d'acquisition	23
3.4 Coût du système d'acquisition	24
3.5 Versatilité du système d'acquisition	24
3.6 Robustesse du système d'acquisition	24
3.7 Choix du système d'acquisition	25
3.7.1 Détails des cartes d'acquisition du système d'acquisition sélectionné	25
CHAPITRE 4 ACQUISITION ET VISUALISATION	29
4.1 Conditionnement des capteurs	29
4.1.1 Conditionnement des capteurs analogiques	29

4.1.2	Conditionnement des capteurs numériques	34
4.1.3	Implémentation physique des protocoles de communications	34
4.2	Prétraitement des mesures et implémentation logicielle des protocoles de communication	35
4.2.1	Prétraitement par la matrice prédéfinie programmable par l'utilisateur	35
4.2.1.1	Synchronisation des données	36
4.2.1.2	Données analogiques	36
4.2.1.3	Encodeur	36
4.2.1.4	Accéléromètres	37
4.2.1.5	Thermocouples	37
4.2.1.6	Données séries	38
4.2.2	Logiciel embarqué	38
4.2.2.1	Thermocouples	39
4.2.2.2	Encodeurs	40
4.2.2.3	Données analogiques	40
4.2.2.4	Accéléromètres	41
4.2.2.5	Données séries	41
4.2.2.6	CANAerospace	41
4.2.2.7	Microstrain®	42
4.2.2.8	Téléométrie	43
4.3	Enregistrement	44
4.4	Post-traitement	46
4.4.1	Affichage	46
4.4.2	Filtres	47
4.5	Téléométrie	47
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION		49
5.1	Développement du système d'acquisition	49
5.1.1	Validation de la sélection des capteurs	49
5.1.2	Validation des accéléromètres	50
5.1.3	Validation des encodeurs	51
5.1.4	Validation des capteurs de température	52
5.2	Intégration du système d'acquisition	52
5.2.1	Validation de l'intégration des mesures de diagnostics	53
5.2.2	Validation de l'intégration des mesures de performances	54
5.2.3	Validation de l'intégration des mesures de performances avancées	55
5.2.4	Intégration des interfaces de communications	56
5.2.5	Enregistrement	57
5.2.6	Affichage	58
5.2.7	Téléométrie	58
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		59

ANNEXE I	LISTE DES PARAMÈTRES DIFFUSÉS PAR LE MOTEUR	61
ANNEXE II	LOGICIEL D’AFFICHAGE DES DONNÉES	65
ANNEXE III	PÉRIPHÉRIQUES DE LECTURE DE COURANT	67
	LISTE DE RÉFÉRENCES	68

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Groupes de priorité des mesures 6
Tableau 2.2	Critères de mesures d'accélération 11
Tableau 2.3	Caractéristiques de l'accéléromètre 356A16..... 11
Tableau 3.1	Entrées requises des différentes interfaces du système d'acquisition 21
Tableau 3.2	Cartes d'entrées et sorties sélectionnées pour le système d'acquisition 26
Tableau 4.1	Table de vérité 37
Tableau 4.2	Format de message selon la norme CANAerospace V1.7 41
Tableau 4.3	Bande passante requise pour chacun des groupes de mesures 45
Tableau 5.1	Comparaison des valeurs théoriques et mesurées des fréquences fondamentales des transmissions 51
Tableau I-1	Liste des paramètres diffusés par le moteur 61

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Dimensions de l'hélicoptère tandem LX300 [®] Adaptée de Laflamme Aero 4
Figure 2.1	Représentation d'un boîtier de transmission de l'hélicoptère..... 9
Figure 2.2	Configuration des jauges pour la mesure des déformations axiales 15
Figure 2.3	Configuration jauges de déformation pour la mesure du couple..... 16
Figure 4.1	Diviseur de tension 30
Figure 4.2	Pont de Wheatstone 31
Figure 4.3	Conditionnement de capteurs résistif avec une source de courant..... 33
Figure 4.4	Structure d'un bus CAN 35
Figure 4.5	Fonctionnement du logiciel embarqué 35
Figure 4.6	Tableau de bord 48
Figure 5.1	Banc d'essais de l'hélicoptère LX300 Tirée de Laflamme Aero Inc. 50
Figure 5.2	Transformation rapide de Fourier des valeurs d'accéléromètres 52
Figure 5.3	Comparaison entre le signal brut et filtré d'un capteur DTR installé sur le drone pour mesurer la température d'une transmission 55
Figure 5.4	Évolution de la température du compartiment moteur dans le temps 56
Figure 5.5	Trace des valeurs de températures des gaz d'échappement reçues par le bus CAN 57

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

DTR	détecteur de température à résistance
IEPE	integrated electronics piezo-electric
CAN	controller area network
RII	réponse infinie à une impulsion
RPM	rotation par minute
CRC	calcul de redondance cyclique

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

f_{rg}	fréquence de roue
f_{rp}	fréquence de pignon
f_m	fréquence d'engrènement
f_{tr}	fréquence de répétition de dent
f_a	fréquence de phase d'assemblage
R_g	vitesse de rotation de la roue
R_p	vitesse de rotation du pignon
N_g	nombre de dents de la roue
N_p	nombre de dents de la pignon
N_a	nombre de phases d'assemblage
f_N	fréquence de Nyquist
Θ	angle de déformation
T_{min}	couple minimum
J	moment quadratique polaire
G	module de cisaillement
L	longueur
N_{cycles}	nombre de cycles
N_{bit}	nombre de bits de résolution
ω_{arbre}	vitesse angulaire de l'arbre
T_{monte}	temps de montée
N_{fronts}	nombre de fronts
F_A	force axiale
ε	déformation

V_r	ratio de tension
N_p	nombre de dents de la roue
E	module d'élasticité
ν	coefficient de Poisson
GF_A	facteur de jauge (axiale)
GF_T	facteur de jauge (couple)
A	aire de la section
r	rayon de la section
N_{obs}	nombre d'observation
δV_{min}	différence minimale de tension
ΔV	plage de tension du convertisseur
GF_A	facteur de jauge (axiale)
V_{in}	tension à l'entrée
V_{out}	tension à la sortie

INTRODUCTION

Les véhicules aériens sans pilote ont connu un essor important depuis le début des années 2000. D'abord destinées au domaine militaire, les applications récréatives et commerciales se sont développées. On peut distinguer trois grandes classes de drones. Les petits sont occupés par la plupart des appareils récréatifs et des appareils de photographie aérienne. Les intermédiaires comprennent une grande partie des drones militaires et quelques appareils commerciaux de plus grande taille. La dernière classe, les plus gros, comprend les véhicules plus imposants, souvent des appareils avec pilote convertis en drones. Le marché commercial des drones intermédiaires est en expansion et de plus en plus de compagnies développent des produits pour y répondre. C'est dans cette optique que le projet de recherche CARIC AUT-703, mené par Laflamme Aéro en collaboration avec NGC Aérospatiale, Roy Aéronef & Avionique Simulation, Sintors America, l'École de technologie supérieure et l'École Polytechnique de Montréal, a été mis sur pied. Ce projet a pour but de développer plusieurs technologies dans le domaine des drones.

L'objectif de ce mémoire est de développer, intégrer et valider un système d'instrumentation et de télémétrie destiné à l'usage des drones hélicoptères de classe intermédiaire. Le système devra répondre aux exigences spécifiques des tests en vol et fournir des informations guidant les utilisateurs sur les performances du véhicule. L'intention est de synthétiser les différentes méthodes de récoltes de données pour les appliquer aux tests des véhicules aériens sans pilote en proposant une approche modulaire et un traitement des données explicite pour l'utilisateur. Cette croissance nécessite une gamme d'instrumentation adaptée à ces appareils. Cette approche a été développée en se basant sur les besoins du prototype de drone LX300[®] de la compagnie Laflamme Aero Inc dans le cadre du projet AUT-703.

Le mémoire est structuré en cinq chapitres découlant de la méthode utilisée. Le premier chapitre porte sur la description du véhicule utilisé pour le développement du système de collecte

de données. Le deuxième chapitre décrit le processus utilisé pour choisir les capteurs installés. Le troisième chapitre définit la méthode utilisée pour la sélection du système d'acquisition de données. Le quatrième chapitre discute du traitement des signaux ; de l'acquisition jusqu'à l'affichage. Le dernier chapitre présente les résultats obtenus suite à l'intégration des capteurs, du système d'acquisition et de l'affichage ensemble.

CHAPITRE 1

DESCRIPTION DU VÉHICULE

Dans ce chapitre, il sera question du véhicule utilisé pour le développement du système d'acquisition de données. Tout d'abord, sa configuration, ensuite ses principales caractéristiques et finalement les particularités touchant directement le système d'acquisition.

1.1 Principales caractéristiques

Le véhicule fait partie de la classe intermédiaire, c'est-à-dire qu'il a une masse maximale au décollage de plus de 25kg et moins de 600kg. Il s'adresse à une clientèle commerciale. Étant équipé d'un moteur à combustion, il présente une autonomie pouvant aller jusqu'à huit heures. Cette autonomie permet un rayon d'opération de plus de 150 km. De plus, plusieurs technologies et une utilisation attentive des matériaux composites limitent les vibrations sur les charges utiles et les équipements embarqués.

1.2 Configuration

Le véhicule à l'étude est un hélicoptère autonome. Il présente une configuration à rotors tandems. La configuration tandem et la puissance disponible permettent de transporter une charge utile allant jusqu'à 90kg. L'enveloppe du châssis est de 2.9m x 1.2m x 1.5m, l'envergure totale incluant les pales est de 5.7m x 2.8m. La configuration à rotors tandems permet une grande flexibilité de positionnement de la charge utile. Les dimensions sont présentées à la Figure 1.1.

1.3 Particularités

Plusieurs particularités spécifiques du LX300[®] vont simplifier et dicter certains aspects de la mesure des performances et de la santé de l'appareil. Tout d'abord, le système de propulsion de l'hélicoptère diffuse de l'information sur son état. La plupart des informations diffusées par l'ordinateur du moteur sont des informations de diagnostic, par exemple : la température

du liquide de refroidissement, les températures d'échappement et les erreurs de lecture des différents capteurs du moteur. De plus, des informations sur les capteurs contrôlant le comportement du moteur sont disponibles : ouverture du papillon et vitesse de rotation du moteur. Une autre des particularités de l'appareil ayant une influence sur le système d'acquisition est la taille de l'appareil et l'espace disponible. Bien que l'hélicoptère est plus imposant que plusieurs autres véhicules autonomes du même type, l'espace disponible pour les capteurs et le système d'acquisition est limité.

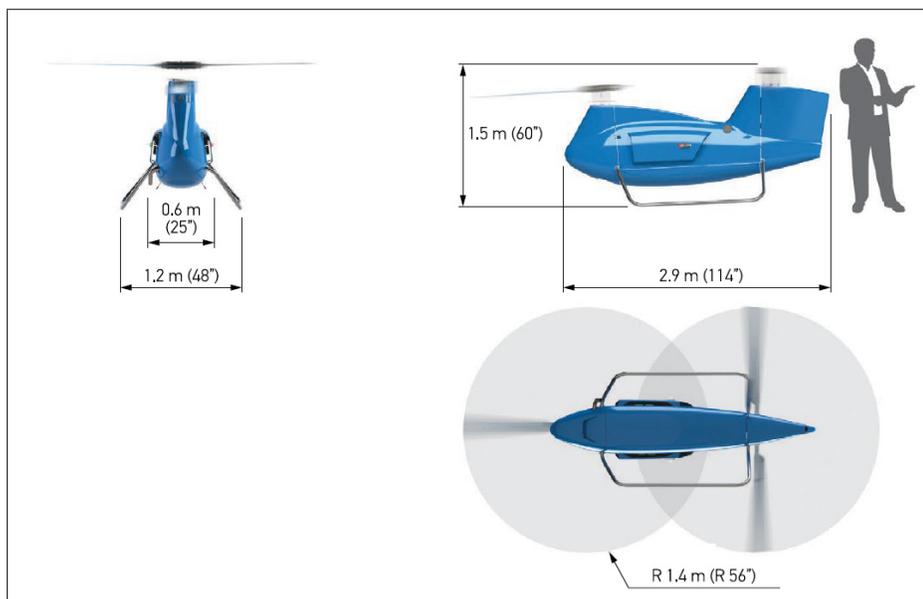


Figure 1.1 Dimensions de l'hélicoptère tandem LX300®
Adaptée de Laflamme Aero

CHAPITRE 2

SÉLECTION DES CAPTEURS

2.1 Besoins

Dans cette section, il sera question des différents besoins qui ont guidé le choix des mesures prises et des capteurs utilisés. Pour arriver à avoir une image globale des performances de l'appareil, plusieurs mesures doivent être prises. Deux catégories de mesures se distinguent, les mesures de performance et celles reflétant la santé du véhicule.

2.1.1 Santé de l'appareil

Pour assurer que les tests se déroulent en sécurité et avec un minimum de risques pour l'appareil, un ensemble de capteurs a été sélectionné pour suivre la santé du véhicule. Certains éléments clés doivent rester dans leur plage d'opération. Le moteur doit respecter une vitesse et une température maximale. Les rotors doivent respecter une vitesse de rotation maximale. De plus, pour assurer le contrôle et la fonctionnalité de l'appareil, tout le système doit être alimenté en électricité.

2.1.2 Performances de l'appareil

Pour valider que l'appareil opère selon les performances attendues, plusieurs mesures doivent être prises. Tout d'abord, la base des performances découle de la portance des hélices. Ensuite, différents éléments découlant de la portance sont importants au bon fonctionnement. Les accélérations longitudinales, latérales et verticales, de plus que les vitesses de roulis, tangage et lacet permettent de valider le lien entre les mesures de portance et le comportement dynamique du véhicule. Finalement, il est important de respecter un niveau acceptable de vibrations ressenti par les systèmes embarqués et la charge utile et d'identifier la source de ces vibrations.

2.2 Priorisation et catégories des capteurs

Afin de mitiger les risques liés à la maintenance des capteurs, un système de priorisation a été mis en place. Tous les capteurs prévus sont classés en quatre catégories : diagnostic, performances, performances avancées et validation et développement. Il est impératif que les capteurs des catégories inférieures soient installés et fonctionnels avant de procéder à l'intégration des capteurs des catégories supérieures. Plus les capteurs sont de bas niveau, plus leurs informations sont liées à la santé et la sécurité de l'appareil. Plus les capteurs sont de haut niveau, plus ils sont liés à la performance et au développement. Le tableau 2.1 présente un résumé de capteurs et de leur priorité.

Tableau 2.1 Groupes de priorité des mesures

Catégories	Groupe de priorité	Mesures
Diagnostics	1	Couple du rotor
		Température du liquide de refroidissement
		Tension des batteries
		Vitesse de rotation du moteur
Performances	2	Portance
		Accélération (3 axes)
		Position des actionneurs
		Position verticale
		Température des boîtiers de transmission
Performances avancées	3	Vibration transmission (3 axes)
		Température du compartiment moteur
		Données météorologiques
Développement et validation	4	Température d'échappement
		Vitesse angulaire (3 axes)

2.2.1 Mesures de diagnostic

Les capteurs et mesures de la catégorie diagnostic sont utilisés pour s'assurer du bon fonctionnement de l'appareil. Il est impératif que ces capteurs fonctionnent en tout temps. Pour établir les capteurs à inclure dans cette catégorie, une liste restreinte des informations nécessaires au

bon fonctionnement de l'hélicoptère a été élaborée. Les éléments identifiés comme critiques sont l'état du moteur et l'état du système électrique. L'état du moteur est caractérisé par la vitesse de rotation et la température du liquide de refroidissement. L'état du système électrique est caractérisé par la tension de batteries.

2.2.2 Mesures de performances

Les capteurs inclus dans la catégorie performances fournissent un aperçu des performances de base de l'appareil. Ces informations servent principalement à mesurer le comportement dynamique du drone. Ce groupe comprend : la portance des rotors, les mesures d'accélération et vitesses de rotation, la position des actionneurs des plateaux oscillants, l'altitude de l'appareil et la température des boîtiers de transmission.

2.2.3 Mesures de performances avancées

Les différentes mesures associées au groupe des performances avancées contiennent principalement des mesures associées aux conditions de la charge utile et aux conditions de vol. Ce groupe comprend : les accélérations (3 axes) de la charge utile, la température du compartiment de la charge utile et les données météo courantes. Puisque les données météo ne sont pas directement liées à l'appareil, il n'en sera pas question dans ce texte.

2.2.4 Mesures de validation et développement

La catégorie validation et développement contient des capteurs qui sont en redondance avec certaines des mesures prises dans les groupes de plus bas niveau. Dans ce contexte, ces capteurs peuvent changer selon les tests requis. On pourrait y retrouver une deuxième mesure de couple ou de portance par exemple. On y retrouve aussi tous les capteurs qui ne relèvent pas des catégories précédentes. Par exemple, les capteurs liés à une expérimentation spécifique.

2.3 Sélection des accéléromètres

Les accéléromètres sont fabriqués selon différentes technologies. Les principales sont les suivantes : piézoélectrique, piézorésistif et à capacité variable (Wilson (2005)). Les accéléromètres piézoélectriques sont fréquemment utilisés pour la mesure de chocs et vibrations. Ils mesurent généralement une large plage de fréquences et se fabriquent sous plusieurs formats et sensibilités. Cette versatilité vient avec le coût d'un conditionnement de signal plus complexe et dispendieux. Les capteurs piézorésistifs présentent des caractéristiques communes avec les piézoélectriques, tout en offrant une plus faible sensibilité, c'est pourquoi ils sont généralement utilisés pour des mesures de chocs. Une autre caractéristique qui les distingue est la possibilité de mesurer des phénomènes en régime permanent. De plus, le conditionnement de leur signal est très simple. Les capteurs à capacité variable présentent une grande sensibilité, un très bon comportement en régime permanent et une bonne stabilité thermique. Par contre, la plage de fréquence est réduite comparée aux deux autres types de capteurs. Ils sont utilisés pour des mesures à basse fréquence et sont les plus simples d'utilisation.

Certains accéléromètres piézoélectriques sont vendus avec une interface IEPE (Integrated Electronics Piezo-Electric). Ces capteurs contiennent un amplificateur directement au capteur pour limiter l'effet du bruit sur le signal.

Le véhicule pouvant transporter des charges sensibles aux vibrations, des accéléromètres ont été sélectionnés pour mesurer les vibrations dans le compartiment de charge utile. Plusieurs critères ont été pris en compte afin de mesurer adéquatement les vibrations : la plage de fréquence captée, la sensibilité de l'accéléromètre, la fréquence naturelle de l'accéléromètre, la transmissibilité admise par le montage, le poids et les dimensions et la plage de température d'opération.

Tout d'abord, la composante la plus sujette à causer des vibrations sur l'hélicoptère étant les boîtiers d'engrenage des rotors, la fréquence d'engrènement des engrenages a été prise en compte pour déterminer la fréquence de coupure minimale requise pour les accéléromètres. Les équations (2.1) à (2.5), représentent les cinq fréquences fondamentales principalement res-

ponsables des vibrations dans un boîtier d'engrenages : la fréquence de roue, de pignon, d'engrènement, de répétition de dent et de phase d'assemblage sont présentées (Lang (1999)). La Figure 2.1 présente une représentation d'un des deux boîtiers de transmission de l'hélicoptère.

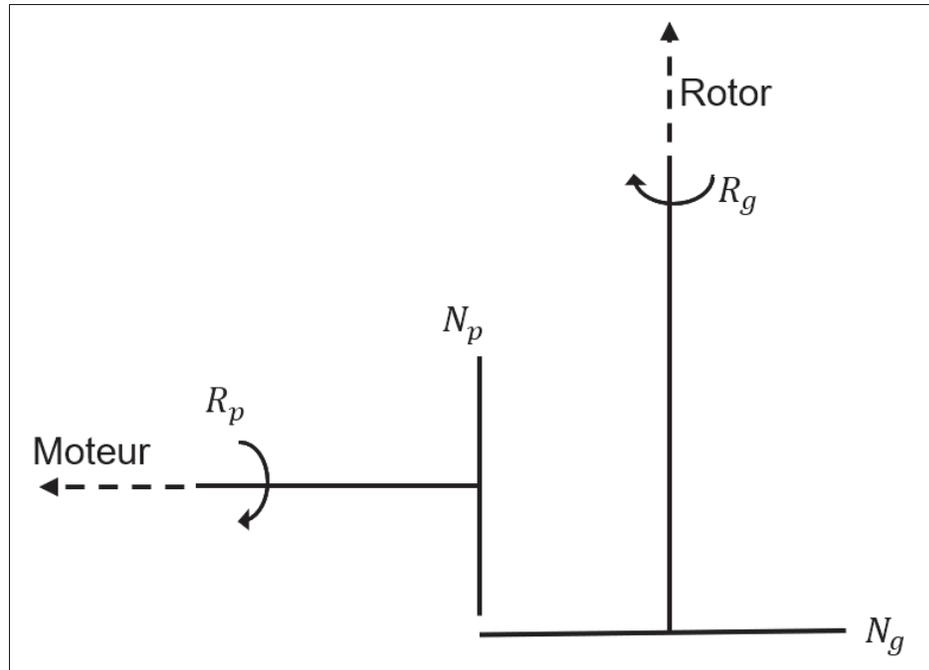


Figure 2.1 Représentation d'un boîtier de transmission de l'hélicoptère

$$f_{rg} = R_g/60 \quad (2.1)$$

$$f_{rp} = R_p/60 \quad (2.2)$$

$$f_m = f_{rp} \times N_p \quad (2.3)$$

$$f_{tr} = \frac{f_m N_a}{N_g N_p} \quad (2.4)$$

$$f_a = \frac{f_m}{N_a} \quad (2.5)$$

La fréquence fondamentale la plus élevée est la fréquence d'engrènement f_m , elle est utilisée pour établir les caractéristiques requises pour l'accéléromètre. Pour éviter le recouvrement du signal, celui-ci doit être échantillonné au-dessus de la cadence de Nyquist. La cadence de Nyquist f_N est la cadence minimale d'échantillonnage requise pour ne pas perdre d'information lors de la discrétisation d'un signal de fréquence f_b (Geerts *et al.* (2002)). La fréquence de Nyquist (2.6) est le double de la fréquence maximale à observer dans le signal échantillonné.

$$f_N = 2f_b \quad (2.6)$$

La sensibilité de l'accéléromètre définit la relation entre le niveau de vibration et le signal en sortie de l'accéléromètre. Ainsi, plus la sensibilité est élevée, plus le signal s'élèvera au-dessus du niveau de bruit de l'amplificateur. Par contre, une sensibilité trop élevée cause une saturation de l'amplificateur et limite la plage de lecture.

La construction de l'accéléromètre limite l'étendue de la plage de fréquences que peut mesurer l'accéléromètre. Ce phénomène est dû à la masse sismique utilisée pour la mesure. C'est cette masse qui entre en résonance. La fréquence naturelle du capteur doit donc se trouver au-dessus de celle du phénomène mesuré.

Un autre aspect important de la sélection d'accéléromètres est sa méthode de fixation au système à l'essai. Plusieurs méthodes de fixations sont disponibles allant d'un aimant jusqu'au goujon fileté. La rigidité du montage agit comme un filtre, limitant la lecture des plus hautes fréquences par l'accéléromètre. Pour utiliser le capteur sur toute sa plage, un montage rigide est requis.

Un critère de sélection important est la masse et la taille de l'accéléromètre. Tout d'abord, le capteur doit être assez léger afin d'influencer le moins possible l'équipement à l'essai. Habituellement la masse de l'accéléromètre ne devrait pas dépasser 10% de la masse de l'appareil à l'essai. Quant aux dimensions du capteur, celles-ci doivent permettre son installation sur l'équipement.

Finalement, le capteur doit résister aux conditions d’opération du système à l’essai. Ces considérations incluent : la température et les chocs. Au-delà des limites d’opération, la température affecte la sensibilité du capteur.

Sur l’hélicoptère les critères énoncés au tableau 2.2 doivent être observés. Les critères de plage de fréquence, fréquence naturelle et fréquence de coupure ont été choisis en fonction de la fréquence d’engrènement f_m .

Tableau 2.2 Critères de mesures d’accélération

Critères	Minimum	Maximum
fréquence [Hz]	1	1240
sensibilité [mV/g]	50	250
fréquence naturelle [Hz]	1240	-
fréquence de coupure du montage [Hz]	1240	-
masse [g]	-	500
dimensions [mm]	-	50
température [°C]	-10	60

En prenant en compte les différentes caractéristiques requises pour l’accéléromètre, un capteur piézoélectrique a été sélectionné. Les caractéristiques du capteur sont présentées dans le tableau 2.3 (PCB (2008)).

Tableau 2.3 Caractéristiques de l’accéléromètre
356A16

Caractéristiques	Minimum	Maximum
fréquence [Hz]	0.5	5000
sensibilité [mV/g]	90	110
fréquence naturelle [Hz]	25000	-
fréquence de coupure du montage [Hz]	50000	-
poids [g]	-	5.4
dimensions [mm]	-	20.3
température [°C]	-54	80

2.4 Sélection des encodeurs

Deux grands types d'encodeurs sont disponibles : les encodeurs incrémentiels et absolus. Les encodeurs incrémentiels mesurent un changement de position sans fournir d'information sur leur orientation absolue, cette information peut toutefois être obtenue une fois par tour. Les encodeurs absolus diffusent l'information sur leur orientation à chaque incrément, il est alors possible de connaître leur orientation à tout point, en tout temps.

Les principales caractéristiques d'un encodeur sont sa résolution et sa vitesse de rotation maximale. La résolution d'un encodeur se définit différemment pour un incrémentiel et un absolu. Pour l'incrémentiel, la résolution se définit par un nombre de cycles par tour en sortie par canal. Un cycle comprend un front montant et un front descendant. Un cycle complet sur deux canaux contient quatre informations pouvant être utilisées. Pour l'encodeur absolu, la résolution est caractérisée par le nombre de positions différentes pouvant être représentées par la sortie, cette information est habituellement présentée en nombre de bits de résolution. Un encodeur absolu de n bits peut représenter 2^n positions.

L'autre facteur influençant la sélection de l'encodeur est la vitesse maximale d'opération de celui-ci. Encore une fois, cette limitation est différente pour les deux types. Pour les incrémentiels, la limitation est habituellement liée à la vitesse de montée du signal. Pour les encodeurs absolus, la limitation provient du protocole utilisé pour transmettre la position.

Sur l'appareil à l'essai, des encodeurs sont utilisés pour trois mesures distinctes : la déformation de l'arbre de transmission, la vitesse de rotation de l'arbre de transmission et la position angulaire du rotor. Ces trois applications ont des requis différents, les plus sévères à chaque application sont utilisés pour la sélection de l'encodeur.

Tout d'abord, la précision de la mesure de déformation de l'arbre de transmission est influencée principalement par la résolution de l'encodeur. On cherche à mesurer un angle de déformation entre deux encodeurs situés à chaque bout de l'arbre de transmission. Pour un arbre donné et une résolution de mesure spécifique, une résolution minimale peut être établie. La résolution

désirée pour les tests est de 1 N-m. La résolution désirée a été choisie pour être inférieure à 1% du couple maximal développé par le moteur. Le calcul de la résolution d'encodeur minimale requise provient des équations (2.7) à (2.10).

$$\Theta = \frac{LT_{min}}{JG} \quad (2.7)$$

$$N_{fronts} = \frac{2\pi}{\Theta} \quad (2.8)$$

$$N_{cycles} = \frac{N_{tick}}{4} \quad (2.9)$$

$$N_{bits} = \log_2 N_{cycles} \quad (2.10)$$

Ainsi pour obtenir la résolution voulue de 1 N-m l'appareil à l'essai, une résolution de 32770 cycles par tour ou 17 bits est nécessaire.

L'encodeur incrémental HD25 a été choisi. Il a une résolution de 10000 cycles par tour sur deux canaux. Pour arriver à la résolution voulue, l'encodeur est couplé à l'arbre de transmission avec un ratio de quatre. Ce montage diminue le requis de résolution du même facteur, mais augmente la vitesse de rotation également. La vitesse de rotation maximale admissible par l'encodeur est déterminée par le temps de montée minimum. Pour l'encodeur HD25, ce temps est de 7ns.

$$\omega_{arbre} = \frac{2 * \pi}{T_{montee} * N_{fronts}} \quad (2.11)$$

On obtient alors une vitesse de rotation maximale de l'encodeur d'environ 44800 rad/s, plus élevée que la vitesse requise d'environ 879 rad/s. Toutefois, le périphérique d'entrées numériques devra être sélectionné conséquemment.

2.5 Sélection des capteurs de température

La mesure de températures peut se faire par plusieurs capteurs, les grandes catégories sont : thermocouple, thermistance, détecteur de températures à résistance (DTR) et infrarouge. Pour des questions pratiques, seuls les thermocouples et les DTR seront discutés.

Les thermocouples se basent sur l'effet Seebeck, un phénomène où une différence de potentiel est observée à la jonction de deux conducteurs différents à une température différente. Cette différence de potentiel est de l'ordre de quelques microvolts. Les thermocouples permettent de prendre des mesures sur une grande plage de températures (-270°C à 1350°C) et présentent une précision pouvant atteindre ± 0.1 °C .

Les détecteurs de températures à résistance sont composés d'un long filament dont la résistance change considérablement avec la température. Cette variation de résistance est ensuite mesurée pour estimer la température. Le conditionnement du capteur est habituellement effectué à l'aide d'une source de courant ou d'un pont de Wheatstone. La précision des DTR peut atteindre 0.001°C (Fontes (2005)).

Les thermocouples présentent plusieurs avantages au niveau de la versatilité. Ils se présentent en fils pouvant être coupés à la longueur voulue. De plus, une partie de leur circuit de conditionnement peut être réutilisé, ce qui réduit les coûts considérablement si l'installation de plusieurs capteurs est nécessaire.

Les capteurs DTR peuvent être plus précis que les thermocouples et sont régulièrement intégrés dans un support facilitant leur utilisation pour la prise de mesure sur les liquides. Pour la prise de mesure sur l'hélicoptère, des capteurs DTR et des thermocouples sont utilisés. Deux capteurs DTR sont installés sur les transmissions des rotors. Ces capteurs mesurent la température de l'huile. Des DTR ont été choisis parce que le format est imposé par la conception des transmissions. Pour les autres mesures de température, des thermocouples seront utilisés. Ce choix a été fait parce que leur utilisation est très simple et ils peuvent être facilement implémentés au besoin.

2.6 Sélection des capteurs de couple et portance

Les performances de l'appareil étant directement liées à celles des rotors, des mesures de portance et couple sont prises. Les technologies disponibles pour effectuer ces mesures lisent la déformation de l'arbre du rotor. L'installation de cellules de charge étant invasive, l'utilisation de jauge de déformation est préconisée.

Les jauges de déformation sont de minces fils métalliques supportés par un film non conducteur. Lorsque le film s'étire ou se contracte, la résistance du fil augmente ou réduit proportionnellement à la déformation du support. La variation de résistance est mesurée pour estimer la déformation du support. En utilisant plusieurs orientations et configurations de jauges, des déformations spécifiques de la pièce à l'essai peuvent être mesurées.

Pour mesurer la portance du rotor, la déformation axiale de l'arbre doit être mesurée. La configuration présentée à la figure 2.2 est utilisée. Cette configuration permet de compenser pour les déformations causées par la flexion. Les équations (2.12) et (2.13) présente le calcul de la déformation causée par une force axiale F_A (Ome (2018a) et Ome (2018b)).

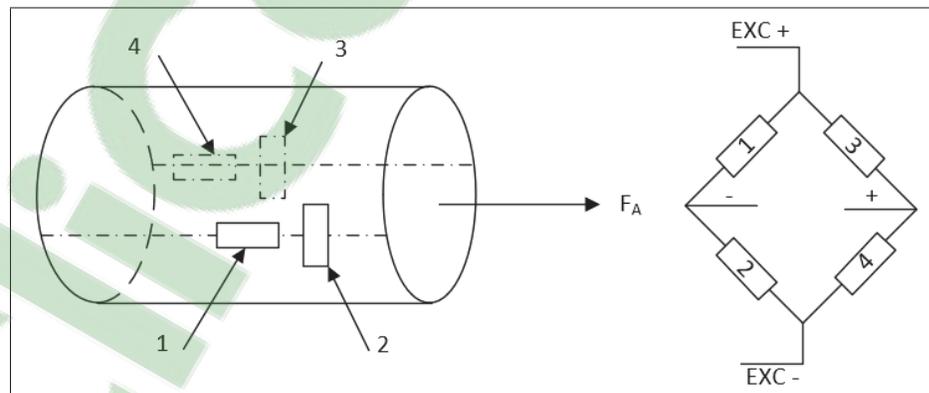


Figure 2.2 Configuration des jauges pour la mesure des déformations axiales

$$\varepsilon = \frac{-2V_r}{GF_A(\nu + 1) - V_r(\nu - 1)} \quad (2.12)$$

$$F_A = E\varepsilon A \quad (2.13)$$

Pour mesurer le couple sur l'arbre du rotor, la configuration présentée à la figure 2.3 est utilisée. Cette configuration permet de compenser pour les déformations causées par les forces axiales et la flexion.

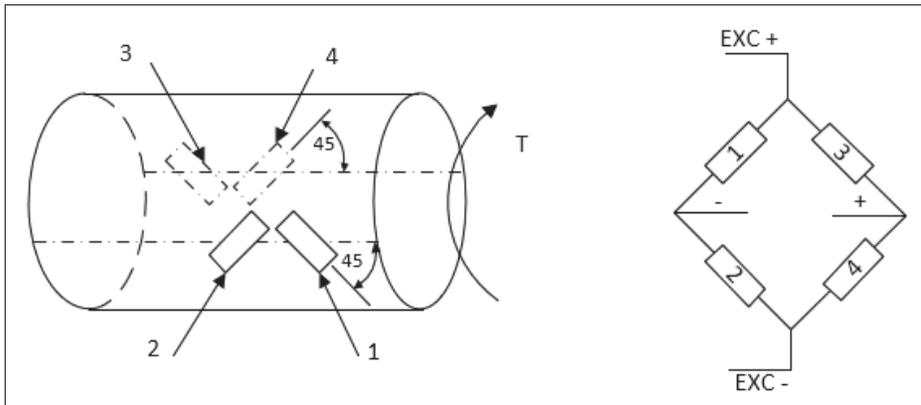


Figure 2.3 Configuration jauges de déformation pour la mesure du couple

$$\gamma = \frac{-2V_r}{GF_T(\nu + 1) - V_r(\nu - 1)} \quad (2.14)$$

$$T = \frac{\gamma GJ}{r} \quad (2.15)$$

Une particularité de la lecture de couple et portance sur un mât de rotor est que la mesure s'effectue sur une pièce en rotation. Deux options sont disponibles pour transmettre les informations au système d'enregistrement : la communication sans fil et les contacts tournants. Les contacts tournants sont très simples d'utilisation, mais apportent plusieurs difficultés. Tout d'abord, les contacts doivent être protégés contre les contaminants extérieurs. De plus, pour l'utilisation de deux ponts de Wheatstone complets, un minimum de six contacts est nécessaire, tous ces contacts nécessitent de l'espace sur l'arbre. Pour ces raisons, malgré les difficultés qu'apporte la communication sans fil, elle a été préconisée pour cette application.

2.6.1 Particularités de la transmission sans fil

L'utilisation d'un système de transmission sans-fil comporte certaines contraintes : la bande passante disponible est limitée, les modules doivent être alimentés de manière autonome et les données doivent être numérisées avant leur transmission. La solution sélectionnée pour la transmission sans fil intègre le conditionnement des ponts de Wheatstone, la gestion de la bande passante et la numérisation.

2.6.2 Système Microstrain®

Afin d'assurer la transmission sans fil des données de couple et portance, le système LXRS® de Microstrain® a été sélectionné. L'ensemble comprend deux modules. Le premier est situé sur l'arbre en rotation. Il alimente le capteur, filtre et amplifie le signal du capteur, numérise le signal et finalement le transmet au deuxième module. Le deuxième module contrôle les noeuds d'acquisition et reçoit les données envoyées par ceux-ci.

Bande passante

Le système MicroStrain® gère la bande passante disponible pour la transmission. Le logiciel embarqué limite la quantité de données numérisées à celle pouvant être enregistrée et transmise par la suite. Pour l'application à l'étude, la fréquence d'échantillonnage désirée est plus grande que ce que permet la bande passante pour une transmission en continu. Le logiciel procède donc à un échantillonnage de sursaut à la fréquence choisie et, par la suite, transmet les données recueillies. Par contre, avec cette méthode, les données ne sont pas transmises en continues dans le temps. Un élément de synchronisation est ajouté pour reconstruire les traces.

2.6.2.1 Alimentation

Pour alimenter le pont de Wheatstone à une tension constante de 3 Volts, le module nécessite une alimentation de 3.2 Volts minimum. La consommation maximale est de 25mA. Deux

cellules au lithium en série sont utilisées pour l'alimentation. Cette combinaison assure une capacité de 800 mAh et une tension nominale de 7.4V (Lor (2015)).

2.6.2.2 Conversion analogique numérique

La première étape de mesure du module MicroStrain[®] est un filtre passe-bas. La fréquence de coupure est choisie en fonction de l'application pour être la moitié de la fréquence d'échantillonnage. En utilisant cette fréquence de coupure, on limite le repliement de Nyquist. Pour l'application, la fréquence d'échantillonnage est fixée par le nombre d'observations voulu par rotation, doublé pour éviter le recouvrement (2.16).

$$f = \frac{N_{obs} * N}{\pi * 60} \quad (2.16)$$

Pour obtenir une lecture à chaque degré de rotation à la vitesse de rotor nominale, une fréquence minimum de 5443 Hz est requise. Puisque le matériel est limité à une fréquence d'échantillonnage de 4096 Hz, cette fréquence sera utilisée et le filtre configuré à 2048Hz.

Après le filtre, le signal passe par un amplificateur programmable. Un gain de 104 à 2560 peut être appliqué au signal entrant. Le signal atteint ensuite le convertisseur analogique numérique. Le convertisseur est caractérisé par son nombre de bits de résolution. Le nombre de bits de résolution définit le nombre de niveaux de tensions différents pouvant être mesurés par le convertisseur. Le nombre de niveaux est défini par 2^n bits. Une fois numérisée, la résolution de la tension à l'entrée correspond à une combinaison du gain de l'amplificateur, de la plage de mesure du convertisseur et de son nombre de bits.

$$\delta V_{min} = \frac{\Delta V}{2^n g} \quad (2.17)$$

Ainsi, avec 12 bits il est possible de lire une différence minimum de tension allant de 6.8 μV à 0.3 μV pour des gains de 104 et 2560 respectivement. Comme énoncé à la section 2.4 la

résolution de couple désirée pour les tests est de 1 N-m, et celle pour la portance est de 19 N. En utilisant les équations 2.12 et 2.13 pour un arbre de 25.4 mm avec un module de Young de 250 GPa, un module de cisaillement de 80 GPa et un coefficient de Poisson de 0.26, on obtient des résolutions 10 N à 227 N pour une charge axiale et de 0.01 N-m à 0.0003 N-m pour les lectures de couple. En utilisant le gain programmable approprié, les résultats seront dans la plage d'opération du convertisseur.

2.7 Définition de l'interface nécessaire au diagnostic

Pour assurer la sécurité des tests, un suivi des paramètres du moteur est primordial. L'ordinateur de bord de l'hélicoptère à l'essai diffuse plusieurs paramètres sur un bus CAN. Les paramètres diffusés sont présentés à l'Annexe I, Tableau I-1. Le format utilisé pour la diffusion des données suit la spécification CANAerospace v1.7 (Sto (2006)). Les avantages de ce protocole sont, entre autres, les identificateurs de messages prédéfinis, la redondance et la vérification des messages. L'utilisation des données de régime moteur, température du liquide de refroidissement et ouverture du papillon des gaz permet de faire un diagnostic des performances moteur et s'assurer d'opérer dans les conditions recommandées par le manufacturier.

CHAPITRE 3

SÉLECTION DU SYSTÈME D'ACQUISITION

Pour procéder à la sélection d'un système d'acquisition embarqué pour le drone, différents types ont été évalués selon plusieurs critères. Quatre types de systèmes d'acquisition sont discutés dans le chapitre : modulaires, industriels, sur mesure et les systèmes embarqués du domaine de l'automobile. Pour déterminer le choix du système d'acquisition, la programmation, la portabilité, le coût, la versatilité et la robustesse ont été évalués. Enfin, le choix final du système d'acquisition sera présenté.

3.1 Les besoins en entrées et interfaces de communications

Tel que discuté au chapitre précédent, les besoins en capteurs ont été établis. Ces besoins définissent les requis en entrées et sorties du système d'acquisition de données. Le tableau 3.1 résume les différentes interfaces nécessaires.

Tableau 3.1 Entrées requises des différentes interfaces du système d'acquisition

Type d'entrées	Nombre d'entrées
Analogiques	26
Numériques	6
Numériques (<1.5 us)	6
Accéléromètres IEPE	6
Thermocouples	> 4

Afin de communiquer avec les autres systèmes de l'aéronef et les capteurs de déformation sur le mât du rotor, plusieurs protocoles de communications doivent être pris en charge. Tout d'abord, pour suivre les indicateurs de santé du moteur, le système d'acquisition doit pouvoir lire le bus de données de l'ordinateur de contrôle du moteur. De plus, afin de recevoir les données de capteurs de déformations, le module d'acquisition doit comprendre une interface RS-232.

Les systèmes modulaires répondent aux besoins d'entrées et de protocoles de communication, si les modules nécessaires sont disponibles. Des systèmes industriels peuvent répondre aux besoins en capteurs, mais ne regroupent pas toutes les interfaces nécessaires dans un même module. Les modules d'acquisition utilisés dans le domaine de l'automobile, particulièrement en course, présentent une grande variété d'interfaces analogiques et numériques dans un même module, mais ne permettent pas l'utilisation de capteurs plus spécialisés comme les accéléromètres IEPE. Finalement, la conception d'un système sur mesure pourrait intégrer tous les entrées et protocoles de communications requis.

3.2 Programmation du système d'acquisition

Le système d'acquisition doit être versatile au niveau de sa configuration. Étant installés sur un prototype, les capteurs utilisés peuvent changer rapidement. Il est nécessaire de pouvoir modifier la configuration en conséquence. De plus, pour faciliter la maintenance du programme, un langage de programmation simple à l'entrée est préconisé.

La configuration nécessaire comprend : les changements d'échelles, la mise à zéro, la sélection des canaux à enregistrer et les fréquences d'échantillonnage.

La plupart des systèmes modulaires présentent la capacité de configurer les entrées. Soit par une interface graphique ou bien par l'utilisation d'un langage de programmation. Les systèmes industriels et automobiles se configurent à l'aide d'une interface graphique. Un système personnalisé devrait être programmé dans un langage natif.

Les options configurables par une interface graphique sont plus faciles d'utilisation et permettent des changements rapides de configuration. Par contre, leur simplicité limite le traitement et contraint l'utilisation des interfaces de communication. De l'autre côté, les systèmes programmés ajoutent un niveau de complexité. Un module personnalisé requiert la conception complète d'un logiciel embarqué et son maintien.

Certains systèmes comme le CompactRIO® de National Instruments nécessitent aussi la programmation d'un circuit logique programmable (FPGA). Les FPGA sont des périphériques contenant des éléments de logique programmable. Contrairement à un processeur, les FPGA n'exécutent pas des instructions, mais au démarrage les éléments logiques sont interconnectés pour avoir un comportement désiré. Cette différence à l'avantage de permettre le traitement parallèle de plusieurs signaux sans encombrer le processeur.

3.3 Portabilité du système d'acquisition

L'espace disponible pour installer le système d'acquisition étant restreint, le boîtier de ce dernier doit respecter les dimensions maximales suivantes : 40cm x 20cm x 15cm. En plus des contraintes de taille, l'aspect portabilité concerne aussi sur l'alimentation électrique du système. Sur l'appareil, deux alimentations électriques de base sont disponibles : 12VDC et 24VDC. Le système de collecte de données doit pouvoir être alimenté par l'une ou l'autre de ces sources. Bien que la consommation électrique allouée au système d'acquisition soit beaucoup plus grande que ce qui est nécessaire, un effort est fait pour la minimiser. Un autre aspect important à la portabilité du système est la possibilité de l'installer sur un autre appareil. Ainsi, si plusieurs appareils de tests sont utilisés, le système doit pouvoir être transféré d'un appareil à l'autre avec un minimum d'interventions.

Les systèmes modulaires se présentent dans des formats plus gros que les autres systèmes puisqu'ils requièrent plus d'espace pour les différentes options installées. Les systèmes industriels varient en tailles. Les options provenant du domaine automobile sont compactes. Finalement, une implémentation personnalisée serait très compacte puisqu'elle contiendrait seulement les périphériques nécessaires.

Tous les systèmes considérés répondent au critère de tension et aucun n'a une consommation pouvant nuire aux performances de l'appareil.

3.4 Coût du système d'acquisition

Les systèmes de mesures commerciaux se présentent sous une large gamme de prix. Le prix des systèmes modulaires varie en fonction des modules sélectionnés. Pour l'installation sur l'équipement testé, un budget de 15000\$ et moins est disponible. Le prix a été utilisé pour discriminer les systèmes trop dispendieux. Ainsi, seulement les systèmes respectant le budget ont été retenus. Par la suite, tous les systèmes respectant la limite de budget ont été mis sur le même pied d'égalité dans l'évaluation des besoins.

3.5 Versatilité du système d'acquisition

Les besoins de chaque test étant variables, le système doit pouvoir être adapté à un test spécifique où des capteurs différents seraient utilisés. Plusieurs options sont disponibles : une sur-estimation des requis pour prévoir l'ajout de capteurs sans changer la configuration matérielle ou bien un système modulaire qui s'adapte à la configuration requise pour un test en particulier. Encore une fois, ce critère a été utilisé pour encadrer la sélection du système d'acquisition autant un système modulaire configuré avec seulement les entrées nécessaires, qu'un système comportant plus d'entrées que les requis prévus ont été considérés.

3.6 Robustesse du système d'acquisition

Les conditions d'opération du drone demandent que le système utilisé puisse résister à des chocs, des vibrations et des variations de température. Les systèmes d'enregistrement se présentent sous différentes formes. Les moins renforcés sont vendus sans coffret et les plus renforcés dans un boîtier étanche. La robustesse d'un système augmente son coût. De plus, un système étanche et renforcé implique plus de complexité au niveau des connexions. Certains enregistreurs sont vendus dans un boîtier résistant au chocs et aux vibrations, mais qui n'est pas étanche.

En plus d'avoir un boîtier résistant, les connexions électriques au système d'acquisition de données doivent être fiables. Plusieurs options de connexions sont disponibles, mais pas offertes

sur tous les modèles. Pour l'installation sur le drone, des connexions résistantes aux vibrations sont nécessaires. On recherche des interfaces vissées ou soudées.

3.7 Choix du système d'acquisition

Basé sur les critères précédents, le choix du système d'acquisition approprié à l'application s'est arrêté sur le cRio-9035[®] de National Instruments. Le cRio[®] est un contrôleur embarqué exécutant une distribution propriétaire de Linux. La ligne CompactRio[®] de National Instruments propose des systèmes modulaires. Les différents modèles peuvent accueillir quatre ou huit modules d'entrées et sorties ou de communications. Cette modularité répond aux besoins de versatilité. Par exemple, une carte d'entrées numériques pourrait être remplacée par une carte de lecture de thermocouple entre deux tests. Au-delà de la versatilité, l'approche modulaire permet de configurer un système adapté aux tests requis. Ainsi, seulement les modules nécessaires sont achetés et installés. Bien que plus cher que les systèmes non modulaires, le cRio[®] offre un accès bas niveau aux périphériques et un environnement de programmation exhaustif. Il est possible de programmer une partie du traitement des données directement sur le système embarqué. De plus, puisque l'interface est directe avec les périphériques, il est possible d'implémenter les protocoles de communications nécessaires. Sur l'aspect mécanique, le cRio[®] est une boîte rectangulaire en métal résistante aux chocs, mais non étanche contre les contaminants extérieurs. Idéalement le système aurait été protégé des intempéries, mais comme plusieurs autres composants électroniques sur le prototype de drone ne sont pas protégés, le compromis est acceptable.

3.7.1 Détails des cartes d'acquisition du système d'acquisition sélectionné

Le système sélectionné présente huit emplacements pour les cartes d'entrées et sorties. Les cartes insérées sont choisies en fonction des requis de l'application et du test requis. Pour les tests au sol du drone les cartes suivantes ont été choisies, afin d'interfacer les capteurs sélectionnés au chapitre précédent. La liste des cartes sélectionnées et leur nombre d'entrées sont présentés dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2 Cartes d'entrées et sorties sélectionnées
pour le système d'acquisition

Carte	Description	Quantité de canaux
NI-9205	Entrées analogiques 16-bit	32
NI-9213	Entrées de thermocouple	16
NI-9401	Entrées et sorties numériques rapides	8
NI-9403	Entrées et sorties numériques	32
NI-9870	Communications RS-232	4
NI-9230	Entrées analogiques IEPE	3
SEA-9744	Communication 4G/3G/2G, GPS	-

La carte de mesure de tension NI-9205 (Nat (2015a)) répond au besoin de lire des capteurs d'usage général (capteur DTR) ou lire la tension des batteries. Trois plages de tensions peuvent être mesurées : $\pm 200\text{mV}$, $\pm 1\text{V}$, $\pm 5\text{V}$ et $\pm 10\text{V}$. Ces plages, combinées à la résolution de 16 bits du convertisseur analogique numérique, permettent de mesurer des tensions minimales de $6\mu\text{V}$, $30\mu\text{V}$, $152\mu\text{V}$ et $305\mu\text{V}$ respectivement.

La carte de mesure de thermocouples NI-9213 (Nat (2016)) permet de lire 16 thermocouples simultanément. La carte fournit aussi une lecture de température de jonction froide. La carte contient un convertisseur analogique numérique d'une résolution de 24 bits sur une plage fixe de $\pm 78.125\text{mV}$. Sans prendre en compte la précision du thermocouple, la carte peut mesurer des différences minimales de $<0.02^\circ$ pour des thermocouples de type J,K,T,E et N.

La carte NI-9403 (Nat (2015d)) est aussi une carte d'entrées et sorties numériques. Par contre, elle ne permet pas des longueurs d'impulsions aussi courtes que la NI-9401. Elle a été choisie pour les capteurs numériques d'usage général comme un capteur à effet Hall pour mesurer la vitesse de rotation de l'embrayage. Par contre, la carte NI-9430 ne peut pas lire des impulsions plus courtes que $7\mu\text{s}$. C'est pourquoi une carte différente est nécessaire pour la lecture des encodeurs.

Pour lire les signaux des encodeurs, la carte NI-9401 (Nat (2015c)) a été choisie. Il s'agit d'une carte d'entrées et de sorties numériques haute vitesse. Les huit canaux opèrent à des niveaux logiques transistors-transistors(TTL) 5V. C'est-à-dire, que de 0V à 0.8V le signal est lu comme

bas(0) et de 2V à 5V comme haut(1). La particularité de la carte NI-9401 est qu'elle peut lire des impulsions aussi courtes que 100ns. Une seule carte est utilisée puisque son prix est plus élevé à l'achat.

La carte NI-9870 (Nat (2014)) expose quatre ports de communication RS-232. Le premier port est utilisé pour communiquer avec le convertisseur utilisé pour lire les données des deux bus CAN. Le deuxième port est utilisé pour recevoir les données envoyées par le module de réception sans fil des jauges de déformations.

La carte NI-9230 (Nat (2015b)) interface avec des capteurs de type IEPE. Elle contient une source de courant, un condensateur de couplage, un amplificateur et un convertisseur analogique numérique. La carte a trois canaux qui se partagent une cadence d'acquisition maximale de 12.8 kéch/s par voie. Le convertisseur a 24 bits de résolution. Pour l'utilisation de deux accéléromètres trois axes, deux cartes sont nécessaires.

La carte SEA-9744 (S.E (2016)) est la seule qui ne provient pas de National Instruments. Cette carte fournit les périphériques nécessaires pour la télémétrie. La connectivité 4G/3G/2G est utilisée pour pouvoir se connecter à l'ordinateur embarqué du compactRio[®]. De plus, ce module contient un périphérique GPS (global positioning system). Pour les tests, la principale utilisation du GPS est pour avoir une base de temps partagée entre les différents systèmes du drone.

CHAPITRE 4

ACQUISITION ET VISUALISATION

Pour arriver à interpréter les données de performances et diagnostics recueillies sur l'appareil, plusieurs étapes préalables sont nécessaires. Tout d'abord, les capteurs permettent de détecter un phénomène physique. C'est pourquoi un circuit de conditionnement est utilisé pour mettre en valeur la modification du comportement du capteur. Par la suite, le signal conditionné est numérisé. Une fois sous forme numérique, les données sont prétraitées par le système d'acquisition avant d'être enregistrées sur un support physique. Finalement, les données subissent un post-traitement avant d'être affichées pour l'analyse. Ce chapitre porte sur chacune de ces étapes pour les différents capteurs utilisés.

4.1 Conditionnement des capteurs

Les capteurs de différents types nécessitent un circuit de conditionnement différent. Trois grandes catégories se distinguent : les signaux analogiques, les signaux numériques et les protocoles de communication.

4.1.1 Conditionnement des capteurs analogiques

Sur le système d'acquisition à l'étude, six types de conditionnement différents sont nécessaires pour les signaux analogiques. Tout d'abord, les signaux asymétriques ne nécessitent pas de conditionnement pour être mesurés par la carte d'entrées analogiques. Ces signaux sont référencés à la masse du système d'acquisition et ont une amplitude pouvant être mesurée avec une résolution suffisante.

Plusieurs capteurs passifs utilisent un diviseur de tension pour convertir un phénomène physique en signal électrique. Les diviseurs de tension sont un arrangement de deux résistances en série, comme à la figure 4.1, excitées par un potentiel électrique. La tension entre les deux résistances est proportionnelle à l'impédance de chacune des résistances.

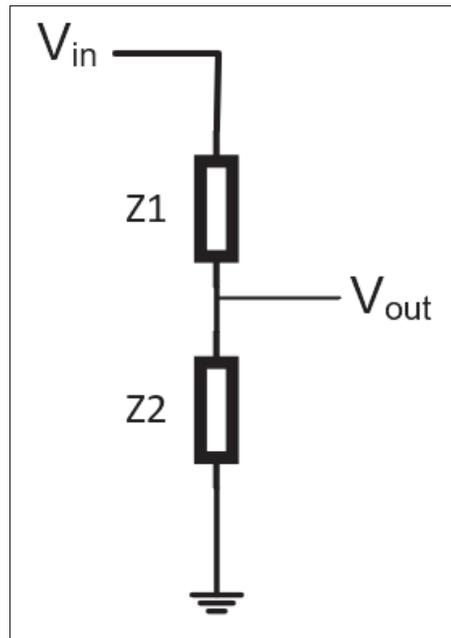


Figure 4.1 Diviseur de tension

La tension de sortie est donc proportionnelle à la tension en entrée et au ratio des résistances (4.1).

$$V_{out} = V_{in} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (4.1)$$

Un diviseur de tension peut-être utilisé si la tension du signal est trop élevée pour les entrées de la carte de mesure. Les diviseurs de tensions sont utilisés dans plusieurs capteurs ratiométriques, comme les potentiomètres. L'équation spécifique aux potentiomètres (4.2) montre la relation entre le ratio des résistances et la tension à l'entrée.

$$V_{out} = V_{in} \frac{kR_t}{R_t} \quad (4.2)$$

où $0 < k < 1$ représente la position du potentiomètre entre sa valeur minimale et maximale.

Un autre circuit de conditionnement est utilisé pour la mesure de résistances, les ponts de Wheatstone, présentés à la figure 4.2. Ils permettent de mesurer de petites variations de résistance.

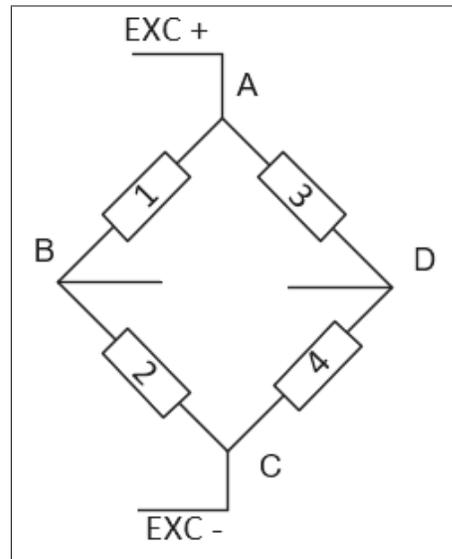


Figure 4.2 Pont de Wheatstone

Avec l'hypothèse qu'il n'y a pas de courant entre les bornes B et D, l'équation (4.3) représente la tension entre B et D (Lamarche (2015)).

$$V_{BD} = V_{in} \frac{R_2 R_3 - R_1 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (4.3)$$

Ainsi,

$$V_{BD} = 0 \mid_{R_2 R_3 = R_1 R_4} \quad (4.4)$$

On dit alors que le pont est balancé. Ensuite, lorsqu'une ou plusieurs des résistances sont modifiées, la valeur de V_{BD} est altérée. Les ponts de Wheatstone sont utilisés pour mesurer la variation de résistance des jauges de déformation. Plusieurs configurations de jauges sont uti-

lisées (Ome (2018b)). Tout d'abord, le quart de pont contient un seul élément variable. Ensuite le demi-pont utilise deux éléments variables, ce qui permet de doubler sa sensibilité aux variations. Finalement, le pont complet est constitué que d'éléments variables. La sensibilité est alors maximale et correspond au double du demi-pont.

Généralement, les quatre résistances formant le pont ont des valeurs nominales identiques. On obtient alors l'équation (4.5) pour un quart de pont.

$$V_{BD} = V_{in} \frac{\Delta R/R}{4 + 2\Delta R/R} \quad (4.5)$$

où la valeur de la résistance variable est $R + \Delta R$

Pour un pont complet où $R_1 = R_4 = R + \Delta R$ et $R_2 = R_3 = R - \Delta R$ (4.3) on obtient l'équation (4.6).

$$V_{BD} = V_{in} \frac{\Delta R}{R} \quad (4.6)$$

Un autre circuit de conditionnement pour la mesure de résistance utilise une source de courant fixe pour exciter un capteur résistif. La tension est ensuite mesurée aux bornes du capteur. Le circuit de conditionnement est présenté à la figure 4.3.

Ce circuit de conditionnement a une réponse linéaire sur toute la plage d'opération contrairement au diviseur de tension. Par contre, l'utilisation d'une source de courant est moins fréquente puisque son implémentation est plus complexe. La mesure de résistance à l'aide d'une source de courant s'applique très bien à des situations où l'on s'intéresse directement à la valeur de la résistance, par exemple, les DTR.

L'utilisation d'un circuit similaire est utilisée pour mesurer le courant passant dans un circuit. La valeur de la résistance est fixée à une valeur connue et la chute de tension de part et d'autre

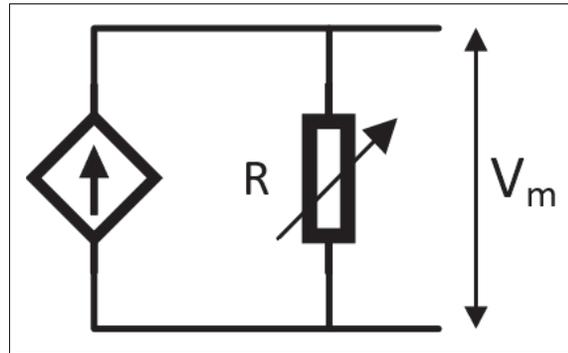


Figure 4.3 Conditionnement de capteurs résistif avec une source de courant

est mesurée. Par la loi de Ohm (4.7), la tension mesurée est proportionnelle au courant dans la résistance.

$$V = RI \quad (4.7)$$

Ensuite viennent les mesures sur les capteurs actifs qui ne nécessitent pas d'excitation. Un type particulier sur le drone est le thermocouple. C'est l'effet Seebeck qui cause une différence de potentiel entre deux métaux de nature différente à une température différente. C'est en mesurant cette tension qu'on arrive à déduire une mesure de température. Par contre, l'utilisation des thermocouples nécessite plusieurs précautions. À chaque jonction du conducteur, si les matériaux changent, un nouveau thermocouple est ajouté en série, ce qui agit comme une source de tension en série. Il existe plusieurs manières de contrer ces effets, la plus courante est de limiter les jonctions et de compenser la connexion au système de mesure à l'aide d'une compensation de jonction froide.

La compensation de jonction froide consiste à lire la température à la jonction entre le thermocouple et un autre métal. Généralement le système de mesure fournit la température à la jonction du thermocouple et de la carte. Le calcul est ensuite effectué pour soustraire l'effet de cette jonction additionnelle. La plupart des cartes d'acquisition conçues pour la lecture de thermocouples comportent cette fonctionnalité.

4.1.2 Conditionnement des capteurs numériques

La deuxième grande catégorie de conditionnement concerne les signaux numériques. Ces signaux nécessitent très peu de conditionnement. Certains capteurs utilisent une résistance de polarisation à la source afin d'attacher le signal à la tension d'alimentation lorsqu'aucune information n'est transmise. Plus la valeur de la résistance est faible, plus la vitesse de transmission peut être élevée. Par contre, une valeur trop faible peut excéder la capacité de la source à fournir du courant. Sur le drone, un capteur à effet Hall utilise une résistance de polarisation.

4.1.3 Implémentation physique des protocoles de communications

Sur le drone, deux protocoles de communication sont utilisés pour acquérir des informations de divers instruments.

Tout d'abord, l'ordinateur du moteur diffuse des informations sur son état sur un bus CAN. La structure d'un bus CAN comprend trois niveaux (Figure 4.4). Premièrement, la ligne de transmission est constituée d'une paire de fils torsadés fermée à chaque extrémité par une résistance de 120Ω . C'est sur cette ligne que tous les périphériques communiquent. Deuxièmement, chacun des appareils sur le bus doit convertir les signaux différentiels en signaux référencés, cette opération est assurée par l'émetteur-récepteur. Ce dernier fait aussi l'opération inverse. Finalement, la gestion des données entrantes et sortantes est assurée par le contrôleur de bus. Il gère l'intégrité des messages reçus, assemble les messages envoyés et contrôle la présence du périphérique sur le bus. Le contrôleur peut être intégré à un micro-contrôleur.

Sur le drone, les mesures de couple et de portance sont transmises par radio à un module qui à son tour les diffuse sur un lien RS-232. La couche physique du protocole de communication RS-232 comprend trois fils : réception, transmission et masse. Contrairement au bus CAN, la communication RS-232 peut seulement se faire entre deux périphériques. La transmission étant effectuée à une tension trop élevée pour être lue directement par un micro-contrôleur, un émetteur-récepteur est nécessaire.

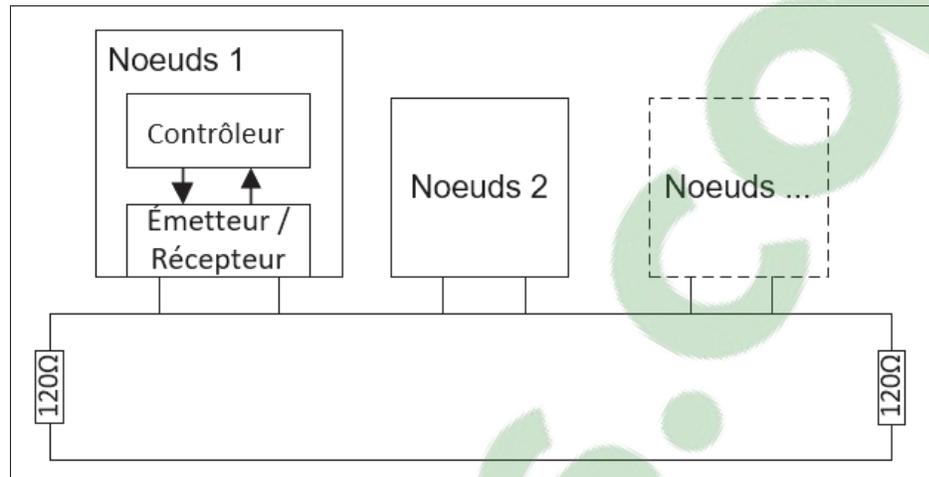


Figure 4.4 Structure d'un bus CAN

4.2 Prétraitement des mesures et implémentation logicielle des protocoles de communication

L'architecture du CompactRio[®] divise le prétraitement en deux parties : FPGA et logicielle. La structure du programme d'acquisition est présentée à la figure 4.5

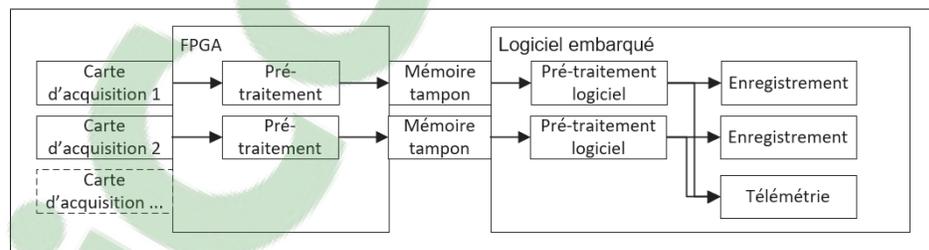


Figure 4.5 Fonctionnement du logiciel embarqué

4.2.1 Prétraitement par la matrice prédéfinie programmable par l'utilisateur

Suite à la numérisation des données par les différentes cartes d'acquisitions, les données sont traitées dans le FPGA.

4.2.1.1 Synchronisation des données

Le FPGA est configuré pour tenir dans un registre la valeur du temps GPS actuel. À chaque cycle, la valeur de temps est mise à jour. En l'absence d'un signal GPS, le temps de l'horloge embarquée du CompactRIO[®] est utilisé. Cette valeur globale de temps est utilisée pour synchroniser les différentes valeurs provenant des cartes de mesures. À chaque fois qu'une carte retourne un nouvel échantillon, la valeur de temps du registre est lue et associée aux données.

4.2.1.2 Données analogiques

Les données analogiques mesurées par les cartes d'acquisitions sont directement envoyées à la partie logicielle.

4.2.1.3 Encodeur

Les informations numériques recueillies sur les encodeurs sont traitées pour extraire la position relative, le sens de rotation et la vitesse de rotation. Pour calculer la position relative des encodeurs, le nombre de fronts d'onde est calculé (4.8).

$$\Omega = \frac{2\pi}{N_{inc} * N_{front} * N_{canaux}} \quad (4.8)$$

où N_{inc} , N_{front} et N_{canaux} sont respectivement le nombre d'incrément, le nombre de fronts et le nombre de canaux.

Pour identifier le sens de rotation, on vérifie la séquence des fronts d'onde rencontrés.

où A_i est le premier canal, B_{i-1} la valeur de l'itération précédente du deuxième canal.

Plusieurs techniques existent pour calculer la vitesse de rotation. La première consiste à calculer le nombre de fronts dans un délai prescrit. Plus le délai est long, moins la mesure représente de petites variations. Cette méthode permet de rejeter beaucoup de bruits dans le système. De

Tableau 4.1 Table de vérité

A_i	B_{i-1}	Direction
0	0	Horaire
0	1	Antihoraire
1	0	Antihoraire
1	1	Horaire

plus, le calcul permet de calculer une vitesse de zéro. La deuxième méthode consiste à mesurer le temps requis pour atteindre un nombre de fronts prescrit. Cette méthode présente un comportement semblable à la précédente ; plus le nombre de fronts à compter est grand, plus la mesure est robuste au bruit, moins elle peut représenter des variations de vitesse. Puisque cette méthode ne permet pas de mesurer une vitesse de zéro, il faut déterminer dans le logiciel la vitesse minimale calculée.

La méthode retenue est la deuxième puisqu'elle est facilement implémentée dans le FPGA. De plus, lire une vitesse de zéro n'est pas nécessaire.

4.2.1.4 Accéléromètres

Un traitement possible des accéléromètres par le FPGA, est le calcul de la transformation rapide de Fourier (FFT). Le FPGA est un périphérique approprié pour ce genre de calcul facilement parallélisable. Le nombre d'éléments du FPGA utilisé dans ce cas étant trop petit, l'implémentation de la FFT doit se faire en post-traitement. Le FPGA contient un nombre limité d'éléments logiques. Afin d'implémenter le calcul de la transformée de Fourier, le nombre d'éléments logiques requis était trop grand. Il aurait été possible de réduire la résolution de la FFT mais ce compromis était trop néfaste pour l'utilisation désirée des données.

4.2.1.5 Thermocouples

Les thermocouples sont directement transférés dans la partie logicielle. Le calcul des températures aurait pu se faire dans la partie matérielle, mais le FPGA n'a pas assez d'éléments. L'implémentation dans le FPGA de la conversion des mesures de thermocouple requiert un

type d'élément logique spécifique, les tables de recherche. Ces éléments sont en nombre limité sur le FPGA. L'utilisation de la matrice FPGA aurait permis un traitement simultané de toutes les valeurs de thermocouple. Tandis que le calcul dans la partie logicielle se fait en série.

4.2.1.6 Données séries

L'implémentation des mémoires tampons des ports de communications séries est faite dans la partie FPGA. Deux tampons par port série sont utilisés : un en envoi et un en réception. Une machine d'état est utilisée pour gérer la réception et l'envoi de données. Les états sont dictés par la partie logicielle.

4.2.2 Logiciel embarqué

Le logiciel embarqué est programmé dans Labview[®]. En plus d'effectuer le pré-traitement de certaines données et leur enregistrement, le programme configure et gère l'exécution de la matrice programmable. L'exécution du logiciel est séparée en trois catégories : l'initialisation, la récupération des données et leur pré-traitement et l'enregistrement. Les deux dernières catégories sont exécutées en parallèle pour chacun des types de données.

Au démarrage de l'ordinateur embarqué, la première action est de lire le fichier de configuration sauvegardé. Ce fichier contient la calibration des capteurs, les fréquences d'acquisition et les paramètres d'installation mécanique. Par la suite, le programme configure les mémoires tampons de la matrice programmable en fonction des taux d'échantillonnages et du nombre de capteurs utilisés. Finalement, la matrice programmable est démarrée et le programme attend pour un signal de disponibilité pour continuer son exécution.

La première étape d'exécution des blocs est de récupérer les données dans les mémoires tampons. La matrice produit des données sans arrêt à un rythme régulier, tandis que le logiciel embarqué consomme les données à intervalles irréguliers. La mémoire tampon permet de synchroniser le producteur et le consommateur. À chaque fois qu'un bloc est exécuté dans le logiciel, il récupère un nombre précis de données qu'il traitera pendant l'acquisition des données

suivantes par la matrice. Il faut sélectionner la dimension de mémoires tampons pour éviter un dépassement. Une fois les données récupérées, elles sont traitées si nécessaire et finalement enregistrées.

L'enregistrement est fait en parallèle dans le fichier de données. Ce mode d'opération nécessite l'écriture de données supplémentaires pour réassembler le fichier en ordre une fois récupéré de l'ordinateur embarqué. Malgré cette surcharge, le processus d'enregistrement est plus stable et plus robuste. Les données étant enregistrées dès qu'elles sont traitées, très peu de données peuvent être perdues lors d'un arrêt non planifié du système. Chacun des blocs de traitements enregistre les données sous un groupe. Chacun des groupes contient le temps GPS associé à la prise de données. L'estampe de temps permet de comparer les données de différents groupes entre elles, même si elles sont recueillies à des fréquences différentes. Pour tous les groupes qui sont traités par le logiciel embarqué, la valeur brute est aussi enregistrée.

4.2.2.1 Thermocouples

Le traitement des thermocouples permet de passer d'une valeur de tension à une valeur de température compensée pour la température de jonction. L'effet Seebeck traduit une différence de température à la jonction de deux conducteurs différents en une différence de potentiel entre ces deux conducteurs. En contre-partie, le même effet se produit à la jonction des fils du thermocouple et des borniers de la carte d'acquisition. Afin de compenser l'erreur induite, une compensation de jonction froide est appliquée. Cette compensation consiste à calculer la différence de tension produite à la jonction pour l'ajouter à la tension mesurée par le convertisseur analogique numérique. Pour calculer la différence de tension aux borniers, la carte d'acquisition fournit une lecture de la température près de la jonction.

La nature de l'information sur la température de jonction froide est le résultat d'une conversion analogique numérique. Il faut alors convertir ce résultat en température et ensuite à l'aide de tables ou d'équations le convertir en tension équivalente à celle de la jonction. C'est cette tension qui est ajoutée à la tension lue par le convertisseur analogique numérique. La première

étape nécessaire à la conversion de la température de jonction froide est la conversion vers une température.

La carte NI-9213 utilise un capteur DTR pour mesurer la température de jonction froide. Pour obtenir une température, on utilise l'équation de Steinhart-Hart (4.9) (Steinhart & Hart (1968)).

$$\frac{1}{T} = A + B \ln(R_T) + C [\ln(R_T)]^3 \quad (4.9)$$

où R_T est la résistance du capteur.

4.2.2.2 Encodeurs

La partie logicielle traitant les encodeurs comporte deux étapes : le calcul de la différence d'angle et le calcul du couple. La première consiste en la soustraction du compte de chaque encodeur. Deuxièmement, l'équivalence en différence angulaire est calculée. Avec cette différence le couple requis pour atteindre la déformation angulaire est calculé. Pour terminer, les valeurs de couple, angle et compte sont enregistrées.

4.2.2.3 Données analogiques

Le traitement des valeurs analogiques recueillies consiste au séquençement, à la mise à l'échelle et à l'enregistrement. Les mesures faites par la carte d'acquisition arrivent par une mémoire tampon en ordre, mais non identifiées. Pour conserver une synchronisation, une interruption est levée par le FPGA pour signifier la présence de nouvelles données. Une fois les données recueillies dans la mémoire tampon, elles sont mises à l'échelle. Les informations sur les facteurs d'échelle et l'appellation de chaque canal sont contenues dans le fichier de configuration. L'implémentation consiste à une mise à l'échelle polynomiale. Le logiciel lit un tableau pour déterminer l'ordre de la fonction polynomiale. Ensuite, chaque valeur est associée à un canal et enregistrée.

4.2.2.4 Accéléromètres

Les accéléromètres générant beaucoup de données, aucun traitement n'est effectué dans la partie logicielle. Les valeurs sont séquencées et enregistrées. Le traitement des données d'accélération par la partie logicielle crée une baisse importante des performances du système. Il a donc été choisi de les traiter suite aux essais.

4.2.2.5 Données séries

Les ports de données séries sont utilisés pour deux systèmes différents. Le premier sert à acquérir les données de diagnostic moteur et le deuxième les données des capteurs de déformation.

4.2.2.6 CANAerospace

Le protocole CANAerospace défini par Stock Flight Systems (Sto (2006)) est une couche logicielle ajoutée sur le standard CAN 2.0. Le but est d'assurer une interopérabilité entre les différents systèmes avioniques. Des données formatées selon la norme sont diffusées sur un bus CAN. Plusieurs données s'y retrouvent comme : la vitesse de rotation du moteur, les différentes températures d'opération et la consommation d'essence.

Format des messages

Les messages envoyés sont formatés pour être auto-identifiables. C'est-à-dire qu'ils comportent toutes les informations pour être utilisés sans connaître la configuration de l'émetteur.

Tableau 4.2 Format de message selon la norme
CANAerospace V1.7

Octet 0	Octet 1	Octet 2	Octet 3	Octet 4..7
ID noeud	Type de données	Code de service	Code de message	Données

L'identification du nœud est utilisée pour identifier le destinataire du message, si zéro est utilisée tous les nœuds sont considérés destinataires. L'octet un contient le type de données transporté par le message. L'octet deux représente le code de service utilisé pour transmettre la validité de l'information transmise. Le code de message est incrémenté à chaque envoi pour permettre une différenciation des messages contenant la même information. Finalement, les quatre derniers octets contiennent les données transmises. La structure du message ne contient pas de contrôle d'erreurs, cette partie est assurée par le protocole CAN.

Afin de lire les messages présents sur les deux bus CAN de l'appareil, un convertisseur CAN à RS232 a été ajouté. Les données de la communication série sont traitées dans la partie logicielle du CompactRIO. Tout d'abord, le code attend une interruption du périphérique série. Ensuite, un bloc de données est lu de la mémoire tampon. Le code lit les données jusqu'à ce qu'un préambule ajouté par le convertisseur soit trouvé. Conséquemment, chacune des parties du message reçu est séparée et la valeur du contrôle cyclique (CRC) de redondance est validée. Si le CRC est bon, le numéro d'identification du message est comparé à une liste et les données sont associées au bon canal. Finalement, les données modifiées sont enregistrées. Puisque les données provenant du moteur sont asynchrones, seuls les canaux modifiés sont enregistrés.

4.2.2.7 Microstrain®

Le module de lecture des capteurs de déformation utilise un protocole propriétaire pour configurer les modules d'acquisition et pour transmettre les données. Pour commencer à recevoir les données des modules, le logiciel doit d'abord configurer les modules. La configuration consiste à envoyer la fréquence d'acquisition et le nombre de valeurs attendues. Les modules d'acquisition ne peuvent pas acquérir en continu à une fréquence de plus de 512Hz. Pour l'application on requiert une fréquence de 1024Hz minimum. Pour se faire, la configuration consiste à effectuer un échantillonnage de sursaut à la fréquence requise pour une courte période. Entre les acquisitions, le module peut transmettre les données. Ce mode d'acquisition nécessite par contre un élément de synchronisation. Le logiciel envoie une marque de temps lors de l'initialisation pour synchroniser les modules. Une fois la configuration complétée, une commande est

envoyée pour démarrer les lectures. Ensuite les données sont envoyées périodiquement. Une fois reçues, elles sont mises à l'échelle et enregistrées.

4.2.2.8 Télémétrie

Une partie importante du système d'acquisition est de transmettre en temps réel une partie des données, en particulier celles concernant la sécurité de l'appareil. Pour arriver à cette fin, plusieurs éléments doivent être ajoutés au logiciel. Tout d'abord, il faut recueillir les données spécifiques à envoyer. Ensuite, ces données doivent être préparées pour l'envoi et finalement elles doivent être transmises à la station de base.

Chaque section qui contient des données devant être envoyées par télémétrie comporte une section qui met à jour les différentes valeurs dans un tableau. C'est à partir de ce dernier que le logiciel prépare le message à être envoyé. L'utilisation de ce tableau permet un asynchronisme entre la mise à jour des données par les différents périphériques et leur utilisation.

Pour l'envoi des données, plusieurs solutions ont été explorées. Toutes les solutions reposaient sur la technologie TCP/IP. La différenciation s'est faite au niveau de la transmission. Les deux solutions envisagées étaient la transmission par le réseau cellulaire et l'utilisation d'un modem radio. Les deux solutions comportent leurs avantages et inconvénients. La transmission cellulaire a pour avantage de permettre d'accéder aux données à l'aide d'une connexion internet même hors site. Par contre, son étendue est limitée à la couverture du réseau utilisé. Le modem radio peut être utilisé n'importe où la législation le permet. Contrairement à la technologie cellulaire, il faut deux modems radio pour établir une communication et ceux-ci doivent rester en communication directe. Dans les deux cas, la bande passante disponible est suffisante pour l'application.

Par souci de simplicité d'utilisation et de portabilité il a été choisi d'utiliser deux modems radio opérant autour de la fréquence de 2.4GHz pour transmettre les données de télémétrie.

4.3 Enregistrement

L'enregistrement des valeurs dans un fichier comporte plusieurs contraintes. Tout d'abord, les valeurs recueillies par les différents périphériques doivent être synchronisées de manière à pouvoir les situer dans le temps. Ensuite, vu la nature du véhicule, l'enregistrement doit se faire de manière continue pour assurer la sauvegarde des données en cas de fermeture non prévue. Finalement, la vitesse d'enregistrement doit être suffisante pour enregistrer toutes les données recueillies.

Synchronisation

Les différents types de données ne sont pas recueillis à la même cadence tout dépendent de leur utilisation. La synchronisation de ces différents taux d'acquisitions se fait à l'aide d'un marqueur de temps commun. Le temps fourni par le GPS est préconisé pour permettre la comparaison des données avec les autres systèmes du drone. Puisque le signal GPS peut prendre plusieurs minutes à synchroniser, une combinaison est faite avec le temps interne du CompactRIO[®]. Au démarrage, le temps utilisé est celui de l'horloge interne du module. Dès que le module GPS signale sa synchronisation, le temps du CompactRIO[®] est mis à jour pour être de pair avec celui du GPS. Par la suite, les deux sources sont comparées et ajustées au besoin au temps du GPS. Cette méthode permet d'avoir une source de temps robuste, même en cas d'une perte de signal GPS.

The logo for Clicours.COM, featuring the text "Clicours.COM" in a white, sans-serif font on a dark blue rectangular background.

Robustesse

Le véhicule peut être éteint à tout moment, il faut alors que les dernières données recueillies soient enregistrées sur le médium de stockage pour pouvoir les consulter. À chacune des exécutions des boucles d'acquisition, toutes les données sont directement enregistrées. Dans le fichier on retrouve ainsi des blocs de données provenant du traitement de chacun des périphériques dans un ordre variable. Pour la lecture du fichier, chaque bloc contient un en-tête décrivant le nombre de données, leur type et leur provenance. Cette opération d'enregistrement est très

rapide, mais ajoute du traitement lors des consultations subséquentes. Une fois les données remises en ordre la lecture du fichier est plus rapide. L'enregistrement du temps GPS à chaque point de données ajoute aussi à la robustesse du système. Si un délai cause le prolongement de quelques étapes de calculs, les données demeurent synchronisées.

Bande passante

Le système d'acquisition enregistre plusieurs données à des fréquences différentes. Cette quantité de données se traduit par une bande passante à enregistrer et un temps maximal d'enregistrement. Deux principaux types de données sont utilisées pour l'enregistrement : nombres à virgule flottante et nombres en double précision. Sur le CompactRIO[®] ces nombres requièrent respectivement 32 et 64 bits de mémoire pour leurs enregistrements. En utilisant la taille des données enregistrées et leur fréquence d'enregistrement, on peut calculer la bande passante requise. Le tableau 4.3 résume les différentes bandes passantes générées par les groupes de mesures. L'expression de la bande passante est fonction de la taille des variables et de leur fréquence d'acquisition (4.10).

$$B = T_v * f \quad (4.10)$$

Tableau 4.3 Bande passante requise pour chacun des groupes de mesures

Groupe	Type	Fréquence [1/s]	Bande passante [bit/s]	Nombre de canaux	Bande passante totale [bit/s]
Accéléromètre	Float	2048	65 536	3	196 608
Capteurs analogiques	Float	40	1280	26	33 280
Encodeurs	Double	200	6400	6	38 400
Thermocouples	Float	40	1280	6	7680
Données séries	Float	410	13 120	2	26 420
Total					302 388

Ainsi, la bande passante totale est d'environ 37.8 kilooctets par seconde ou 136 mégaoctets par heure. Cette estimation ne tient pas compte de la surcharge imposée par le format de fichier. Cette information permet d'estimer la durée maximale d'enregistrement pour le support de 4 gigaoctets, installé sur le système, à environ 29 heures.

4.4 Post-traitement

4.4.1 Affichage

Afin de pouvoir consulter les données, plusieurs options ont été considérées pour leur affichage. Les solutions d'affichage ont été évaluées selon plusieurs critères : prix, interface utilisateur, facilité d'implémentation et capacité de traitement. Les solutions étudiées variaient d'un logiciel maison jusqu'à un logiciel commercial. Le prix des programmes commerciaux est souvent multipliés par le nombre de licences requises. Puisque plusieurs personnes devaient pouvoir consulter les données, cette contrainte était dominante. Dans le même ordre d'idée, plusieurs personnes ayant des expériences et compétences variées sont appelées à utiliser le logiciel. Il est important de conserver une interface simple et facile d'utilisation. Le logiciel était destiné à plusieurs sites et entreprises. La solution choisie devait s'installer sur n'importe quel ordinateur avec un minimum d'intervention. Finalement, il était désirable de pouvoir faire quelques traitements sur les données directement dans le logiciel d'affichage : filtres, minimums et maximums.

Il a été choisi de concevoir un logiciel de visualisation simple contenant seulement les fonctionnalités requises : afficher les données sur des échelles indépendantes, synchroniser les données sur un axe de temps, afficher des graphiques x-y et appliquer des filtres simples. Cette décision a été prise pour faciliter l'utilisation du logiciel par l'équipe de test. De plus, en limitant les fonctionnalités du logiciel aux besoins d'interprétation des données, l'utilisation du logiciel est facilitée.

Pour arriver à bien discerner les comportements de l'appareil, la visualisation de plusieurs données différentes synchronisées sur un même axe de temps est nécessaire. Un aperçu du logiciel d'affichage est présenté à l'Annexe II. Ensuite, lors de l'enregistrement, les données ont été enregistrées avec une étampe de temps commune ce qui permet de synchroniser l'affiche des différentes mesures. L'affichage de graphique X-Y permet d'observer des relations entre différentes données. Finalement, la possibilité d'appliquer des filtres permet de filtrer les données contenant du bruit nuisant à l'interprétation.

4.4.2 Filtres

Deux types de filtres ont été implémentés : une moyenne mobile et un filtre passe-bas à réponse infinie à une impulsion (RII). Les deux implémentations utilisées proviennent de la librairie Scipy (Jones *et al.* (2001–)).

La moyenne mobile est implémentée à l'aide d'un produit de convolution. La librairie utilisée permet l'utilisation de plusieurs fenêtres pour le produit de convolution : carrée, Hanning, Hamming et Bartlett (Oppenheim *et al.* (1999)). L'utilisation des différentes fenêtres permet de pondérer les valeurs plus éloignées du centre de la moyenne mobile.

Le filtre RII est implémenté en appliquant un filtre RII vers l'avant et ensuite vers l'arrière. L'application successive du filtre assure un temps de propagation de phase nul. Un filtre Butterworth du troisième ordre est utilisé.

4.5 Télémétrie

Pendant les tests, plusieurs données doivent être surveillées. Ces données sont transmises à un poste de travail pour être affiché. Les données sélectionnées varient en fonction du test effectué. Ci-dessous, un exemple de tableau de bord.

On remarque que différents affichages sont utilisés selon la nature des données, par exemple les informations de diagnostic moteur sont colorées en fonction des différentes plages d'opéra-

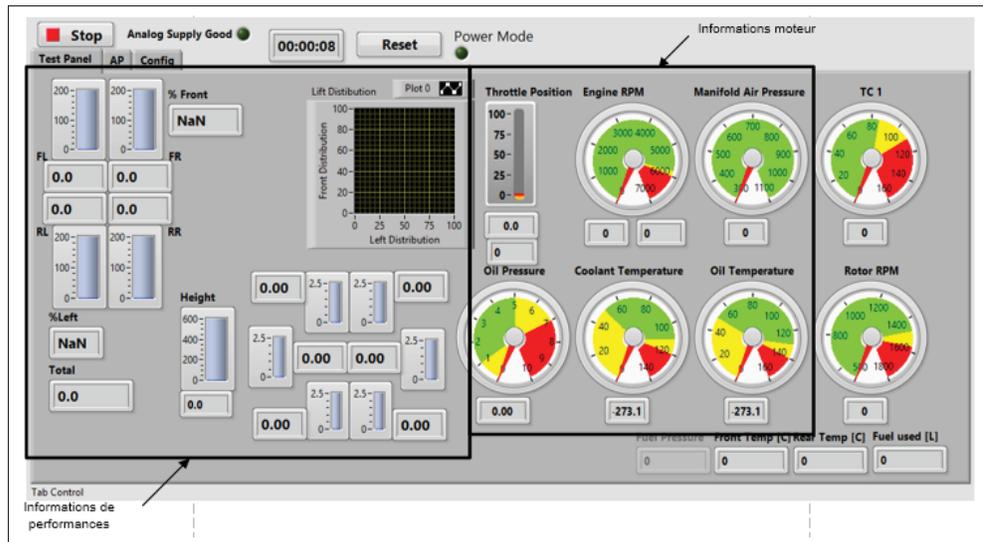


Figure 4.6 Tableau de bord

tion. Sur la figure précédente, on aperçoit aussi des informations de performances. Ces données disponibles lorsque le test est en cours fournissent l'information nécessaire pour prendre des décisions sur la poursuite des tests. L'interface de la télémétrie fournit un accès bidirectionnel à l'ordinateur embarqué. Des fonctions de configuration ont été implémentées : début d'enregistrement, nom de fichier, fréquence de rafraîchissement et affichage de l'état du logiciel embarqué.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Suite au développement du système, de son intégration et de sa validation, plusieurs résultats ont émergé. Ces résultats sont présentés dans ce chapitre.

5.1 Développement du système d'acquisition

Le développement du système d'acquisition s'est fait en deux principales étapes, soit la sélection des capteurs et la sélection du système d'acquisition. Suite aux premiers tests au sol, les choix faits ont pu être validés.

5.1.1 Validation de la sélection des capteurs

En premier lieu, les besoins en capteurs avaient été établis. Suite à l'élaboration des premiers plans de tests, certaines des mesures énoncées au chapitre 2 ont été modifiées.

Les premières mesures ajoutées sont des mesures de positions du banc d'essais. Sans être des mesures prises sur l'appareil directement, elles procurent plusieurs renseignements sur l'état du banc d'essais. Par exemple, un potentiomètre linéaire a été installé sur le banc d'essais pour mesurer le déplacement vertical. Il était alors possible de savoir si l'hélicoptère avait décollé du sol. Dans le même ordre d'idée, des capteurs de position ont été ajoutés pour la mesure du roulis et du tangage. L'ajout de ces capteurs a apporté de l'information pertinente aux capteurs déjà présents.

Les deuxièmes mesures ajoutées sont les lectures de cellules de charge sur le banc d'essais. Ces cellules ont été installées entre le banc d'essais et l'hélicoptère. Elles mesurent indirectement la portance du drone et la répartition de celle-ci. Les cellules de charge sont remises à zéro avant chaque test, ainsi seulement la variation de charge est mesurée. Les mesures de charge prises entre le banc d'essais ont servi de mesures de portance lorsque les capteurs prévus ne pouvaient être utilisés.



Figure 5.1 Banc d'essais de l'hélicoptère LX300
Tirée de Laflamme Aero Inc.

Finalement, afin de diagnostiquer un manque de portance, des mesures ont été ajoutées pour lire la consommation de courant des servomoteurs. Pour prendre ces mesures, un module personnalisé de lecture de courant a été inséré en série sur le circuit de puissance de chacun des actionneurs. La conception de ce module sort de la portée de ce texte, le schéma électrique est présenté à l'Annexe III.

De plus, quelques capteurs ont été retirés puisque les premiers tests sont effectués au sol. Il s'agit des accéléromètres et gyroscopes prévus pour mesurer les performances dynamiques de l'appareil.

Tous les capteurs ajoutés pour compléter les besoins déjà établis au chapitre 2 n'ont pas nécessité de modifications à la sélection de cartes installées sur le CompactRio[®]. Après la validation des besoins et les ajustements aux requis, le choix des capteurs a été validé.

5.1.2 Validation des accéléromètres

Pour valider la sélection des accéléromètres, une transformée rapide de Fourier a été calculée. On peut apercevoir à la figure 5.2 que les fréquences fondamentales décrites à la section 2.3

sont pour la plupart présentes. Seule la fréquence d'engrènement n'est pas visible sur cet échantillon puisque la fréquence d'échantillonnage était trop basse. La fréquence d'échantillonnage a été réduite suite aux premiers essais au sol pour diminuer la taille des fichiers générés et ainsi accélérer leur ouverture sur l'ordinateur.

Les valeurs de fréquences fondamentales des transmissions calculées à la section 2.3 se retrouvent dans le spectre de fréquence calculé à l'aide de la transformée rapide de Fourier. Le tableau 5.1 présente un comparatif entre les valeurs théoriques et mesurées. La figure 5.2 présente différentes fréquences fondamentales sur le graphique de FFT.

Tableau 5.1 Comparaison des valeurs théoriques et mesurées des fréquences fondamentales des transmissions

Fréquences fondamentales	Valeurs théoriques (Hz)	Valeurs mesurées (Hz)
f_{rg}	23.8	24.1
f_{rp}	34.3	34.9
f_m	618	-
f_{tr}	4.0	-
\hat{f}_{tr}	206.0	208.8

Les fréquences d'engrènement et la fréquence de répétition de dents n'ont pu être observées. La fréquence d'engrènement est trop élevée pour apparaître dans cet échantillon. Il est possible que l'amplitude de la fréquence de répétition de dent soit trop petite pour se démarquer du niveau de bruit.

5.1.3 Validation des encodeurs

Les choix des encodeurs HD-25 ont été validés lors de l'implémentation du calcul d'angle et de couple dans le logiciel du système d'acquisition. Afin de valider les performances des encodeurs, ils ont été entraînés à l'aide d'un petit moteur électrique jusqu'à leur vitesse nominale de 8400 RPM. Ce test a permis de valider le calcul des fronts et le calcul d'angle dans le logiciel.

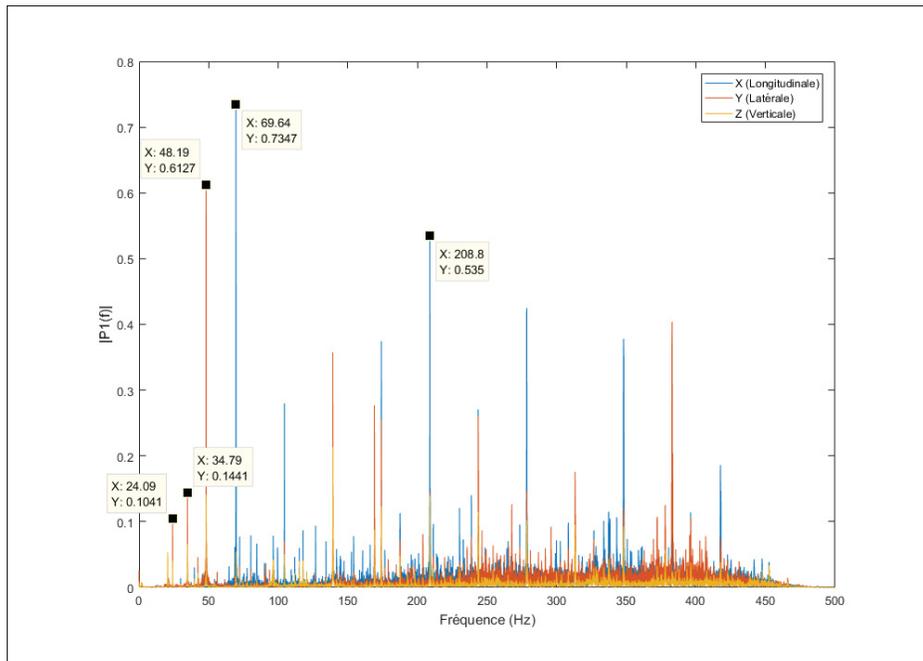


Figure 5.2 Transformation rapide de Fourier des valeurs d'accéléromètres

5.1.4 Validation des capteurs de température

Deux types de capteurs de température ont été choisis pour le drone, les DTR et les thermocouples. Les deux DTR installés sur les transmissions de rotors ont été choisis afin de suivre l'évolution de la température d'huile. La principale caractéristique recherchée était le format et elle a été respectée. La décision de choisir des thermocouples pour les autres mesures de température a été bénéfique au déroulement des tests. À plusieurs reprises, l'ajout d'un thermocouple au système a permis de valider la température de certaines composantes clés, par exemple, la température du châssis près de l'échappement.

5.2 Intégration du système d'acquisition

Tous les critères recherchés pour le système d'acquisition ont été respectés : les besoins en entrées et sorties, l'interface de programmation, la portabilité du système, le coût, la versatilité et la robustesse.

Les cartes d'entrées et sorties ont été choisies en fonction des besoins en capteurs. Toutefois, des entrées supplémentaires ont été prévues pour des capteurs d'usage général. Cette précaution s'est avérée utile pour répondre aux besoins spécifiques de certains tests. Par exemple, certains tests ont été effectués sur un banc d'essais, de l'instrumentation supplémentaire a été ajoutée pour compléter celle présente sur le drone. La possibilité d'ajouter ces capteurs à même le système embarqué a facilité l'analyse des données puisqu'elles se retrouvaient déjà synchronisées avec celles du drone.

L'intégration du système d'acquisition au drone s'est passée graduellement, selon les critères de priorité présentés à la section 2.2. Cette priorisation a permis l'intégration graduelle des capteurs et la validation de l'intégration de ceux-ci par étapes.

5.2.1 Validation de l'intégration des mesures de diagnostics

Les premières mesures implémentées dans le système d'acquisition ont été les mesures de diagnostics. Avant de brancher le système d'acquisition au moteur, une solution temporaire a été utilisée pour faire une première validation de l'intégration. Un périphérique CAN fonctionnant avec un ordinateur a été utilisé pour envoyer des trames similaires à celles envoyées par le moteur. Cette simulation a permis de valider la partie du programme qui interprète les données envoyées par le moteur. Par la suite, une fois installé sur le drone et ajouté au bus CAN, le système a été testé en comparant les valeurs décodées à celles d'un écran de diagnostic fourni par le manufacturier du moteur. Suite à ces deux tests, il a été convenu que l'ensemble de matériel et logiciel permettant la communication avec le moteur fournissait des données pouvant être utilisées pour le diagnostic.

Ensuite, afin de continuer l'intégration des capteurs en ordre de priorité, la partie logicielle de l'acquisition des capteurs analogiques a été implémentée et validée. La première étape de validation a été de comparer la valeur lue par le système à un multimètre numérique. Deuxièmement, des tests ont été effectués pour vérifier la partie logicielle qui fait la mise à l'échelle.

La première mesure analogique intégrée a été la mesure de tension des batteries. Le conditionnement de cette mesure étant constitué seulement d'un diviseur de tension, la mesure a pu être validée en la comparant directement avec une lecture au multimètre.

5.2.2 Validation de l'intégration des mesures de performances

L'intégration des capteurs du deuxième groupe a débuté par l'implémentation de la partie logicielle de l'interface des accéléromètres IEPE. La validation des valeurs des accéléromètres est simplifiée par la nature des équipements utilisés. Tous les périphériques utilisés pour la mesure des accélérations sont conçus pour être utilisés ensemble. De plus, les valeurs de calibration sont fournies par le manufacturier des accéléromètres. Ainsi, seulement la mise à l'échelle est à valider.

Lors de l'intégration sur le drone des encodeurs, un problème est apparu. Le montage mécanique des encodeurs et la rigidité du châssis trop faible causent un déplacement des encodeurs lorsqu'un couple est appliqué. Ce déplacement relatif des encodeurs vient fausser grandement les données. La lecture de couple et d'angle de rotors est donc invalide. Les encodeurs peuvent toutefois être utilisés pour lire la vitesse de rotation des rotors. Suite à des discussions avec les partenaires du projet, il a été déterminé de reporter l'intégration d'une nouvelle méthode de mesures lors des phases de tests suivantes.

Ensuite, la mesure des températures de transmissions a été validée. Pour valider l'intégration des capteurs RTD, la valeur de la lecture du capteur mise à l'échelle est comparée à des valeurs de températures connues, par exemple le point de congélation, la température ambiante et la température de l'eau en ébullition. Dans le graphique présenté à la figure 5.3, on aperçoit l'évolution de la température de l'huile d'une des transmissions du drone durant un test. Aucun filtre analogique n'est présent dans la carte d'acquisition, c'est ce qui explique la quantité de bruit de la trace non filtrée. Par contre, suite à l'application d'un filtre numérique, on obtient une mesure qui représente bien le phénomène mesuré.

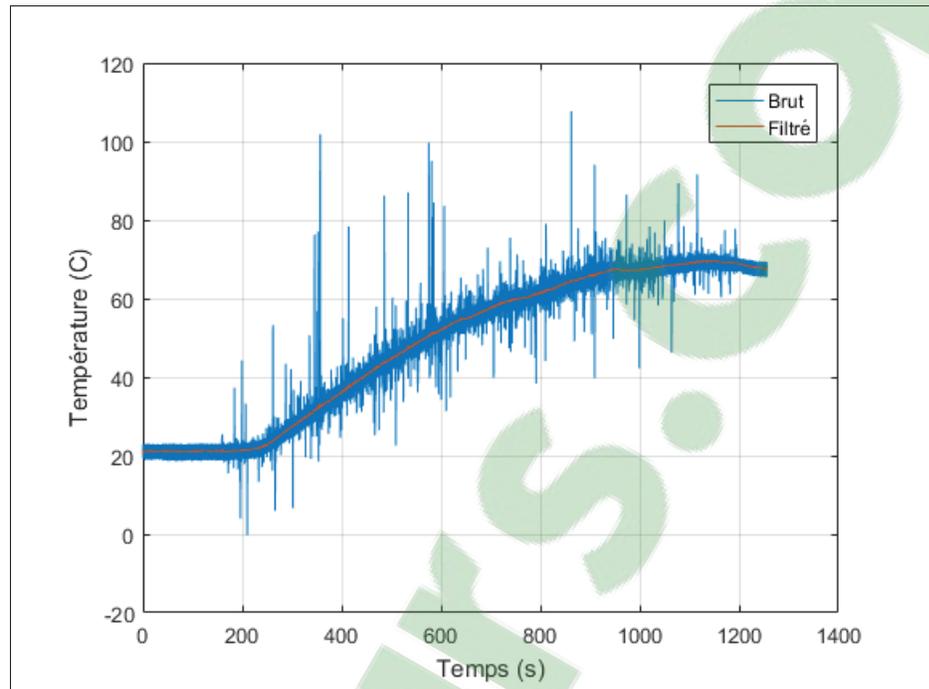


Figure 5.3 Comparaison entre le signal brut et filtré d'un capteur DTR installé sur le drone pour mesurer la température d'une transmission

Sur la figure 5.3, on remarque aussi la présence de bruit lorsque le moteur fonctionne (200 s à 1200 s). Ce bruit peut être dû à plusieurs phénomènes. Le plus probable est de l'induction électromagnétique. Une attention particulière a été portée pour éloigner les fils des conducteurs à courant alternatif et ceux dont la charge change souvent et rapidement par exemple, les fils d'allumage et de l'alternateur.

5.2.3 Validation de l'intégration des mesures de performances avancées

Par la suite, la mesure de température du compartiment moteur a été validée. Il fallait tester la conversion, à l'aide d'une fonction polynomiale, de la valeur transmise par la carte en température. Encore une fois, la valeur obtenue a été comparée à des valeurs de températures connues. Il est intéressant de remarquer à la figure 5.4 que le signal mesuré contient très peu de bruit. Cela s'explique par la nature du convertisseur analogique numérique de la carte d'acquisition. Le convertisseur de la carte de lecture de thermocouples est de type sigma-delta. La méthode

de conversion de ces convertisseurs utilise une moyenne de l'entrée analogique pour effectuer la conversion. Le désavantage des convertisseurs sigma-delta est le temps de conversion plus élevé.

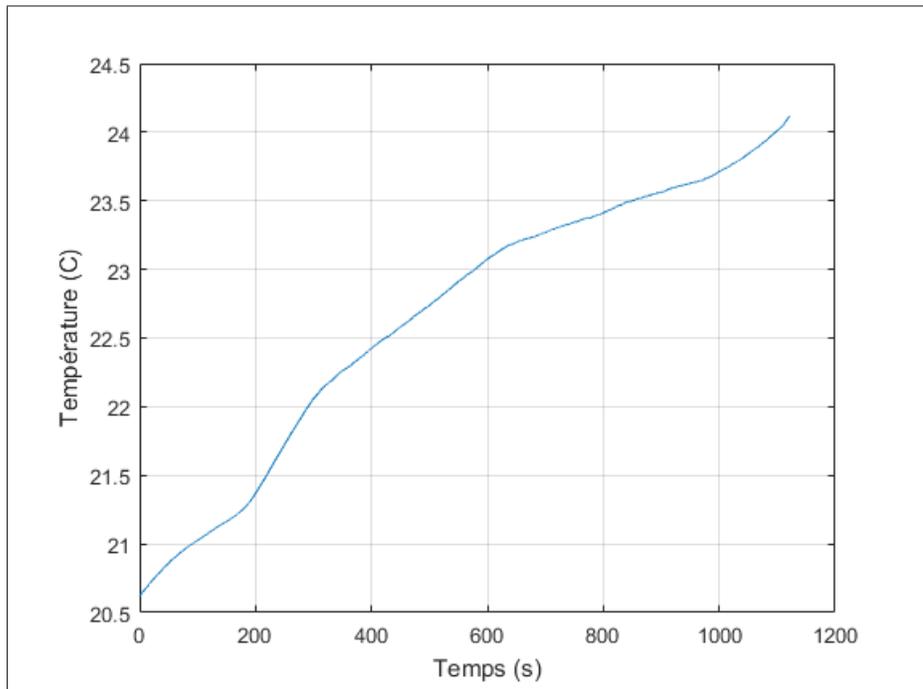


Figure 5.4 Évolution de la température du compartiment moteur dans le temps

5.2.4 Intégration des interfaces de communications

L'implémentation de l'interface CAN a permis d'obtenir plusieurs informations de qualité sur les performances du moteur. À la figure 5.5, on aperçoit un exemple de trace provenant des données du bus CAN. Sur la figure, il s'agit de la température des gaz d'échappement du cylindre numéro un du moteur. L'accès à ces données a permis de ne pas dédoubler les capteurs sur le drone. De plus, en les enregistrant sur le CompactRIO[®], il a été possible de les comparer facilement avec les autres données enregistrées.

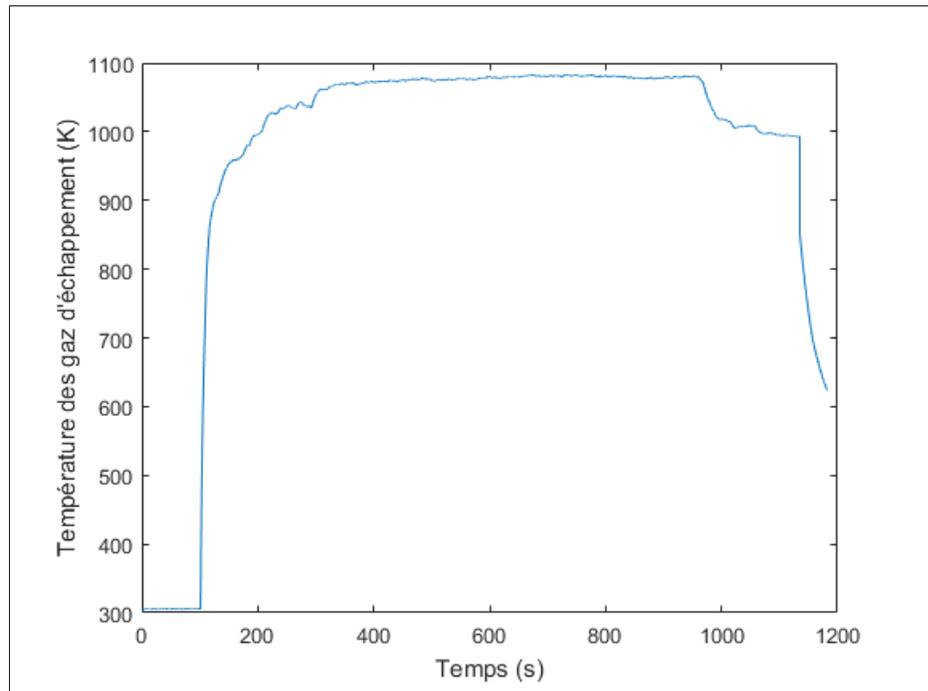


Figure 5.5 Trace des valeurs de températures des gaz d'échappement reçues par le bus CAN

5.2.5 Enregistrement

L'implémentation de l'enregistrement des données a bien fonctionné. Par contre, quelques particularités non désirables ont été observées. Tout d'abord, puisque l'enregistrement des données se fait dans le désordre, les fichiers sont longs à ouvrir. Par exemple, le fichier d'un test de 15 minutes peut prendre plus de cinq minutes à ouvrir sur un ordinateur de travail milieu de gamme. Une solution serait de défragmenter les fichiers une fois recueillis hors du CompactRio[®]. Ainsi, les ouvertures subséquentes seraient plus rapides. Un autre point observé est la corruption de certains fichiers. Parfois le logiciel d'affichage des données ne pouvait pas ouvrir les fichiers. Ce problème est dû à la méthode d'enregistrement des fichiers combinée à une fermeture soudaine du CompactRio[®]. Ce problème causé par la fermeture du système, lorsque des données étaient en écriture, ne cause la perte que des données du dernier cycle d'acquisition. Pour régler ce problème, une routine de vérification des fichiers pourrait être utilisée pour retirer les données incomplètes.

5.2.6 Affichage

La conception d'un logiciel personnalisé pour l'affichage des données a permis d'adapter l'affichage des données aux spécificités de l'analyse de performances de véhicule. Par exemple, le logiciel permet d'afficher plusieurs traces synchronisées sur des axes différents. Dans le même logiciel, il est possible d'appliquer différents filtres aux canaux de données. Cette fonctionnalité a été utile pour traiter les données non filtrées au préalable comme les données des capteurs DTR présentés à la figure 5.3. D'autres fonctionnalités ont été implémentées, mais comportent toujours quelques anomalies. Par exemple, la fonction de graphique en nuage de points ne permet pas de comparer sur un même graphique les données provenant de différents groupes d'enregistrement. Pour compléter les manques du logiciel d'affichage, le logiciel Matlab[®] de Mathworks a été utilisé. La portabilité du logiciel d'affichage a permis à toute l'équipe de tests de l'utiliser sans licence sur leur ordinateur. Un aperçu du logiciel d'affichage est présenté à l'Annexe II.

5.2.7 Télémétrie

Tout d'abord, la partie matérielle du lien de télémétrie choisie a été modifiée suite aux premiers essais. La conception initiale du système comportait un modem cellulaire pour transmettre les données au sol. Il s'est avéré complexe d'obtenir le lien direct vers l'appareil au travers du fournisseur de services mobiles. C'est finalement une radio opérant sur la bande 2.4 GHz qui a été utilisée pour la transmission de données. Comme le lien planifié, le modem est transparent à la connexion. Pour l'utilisateur, utiliser un câble entre le système d'acquisition et l'ordinateur est exactement la même expérience que lorsque la transmission est faite par le modem sans fil. L'utilisation de la télémétrie en temps réel a permis d'avoir un portrait de la santé et des performances de l'appareil. L'utilisation de la télémétrie a permis de prendre des décisions sur le déroulement des tests en se basant sur les données affichées. Par contre, très peu de commandes ont été implémentées du sol vers le drone. Il aurait été possible, par exemple, d'envoyer des commandes à un module d'acquisition pour en changer la configuration.

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les véhicules aériens sans pilote sont en plein essor. Avec de plus en plus d'applications commerciales, les besoins de développement sont plus grands. Très peu de systèmes d'acquisition sont orientés vers ce marché.

Afin de pallier à ce manque, un système d'instrumentation et de télémétrie destiné à l'usage des drones hélicoptères de classe intermédiaire a été proposé dans le cadre de ce mémoire. En combinant des solutions commerciales et personnalisées, il est possible d'obtenir une solution de collecte de données portable, versatile et robuste, à un prix abordable pour les entreprises développant les appareils et leurs applications.

Tout d'abord, le véhicule utilisé comme plate-forme de tests a été décrit. Ce véhicule a servi de base pour déterminer les besoins en capteurs et les contraintes dictant les spécifications du système d'acquisition. Ensuite, basés sur les caractéristiques du véhicule, les besoins en capteurs ont été établis et priorisés. Avec la liste de capteurs à mesurer et les protocoles de communications à implémenter, le système d'acquisition embarqué a été sélectionné. Avec le système d'acquisition choisi, les différents capteurs et protocoles ont été implémentés et intégrés. Finalement, un logiciel de présentation et d'interprétation des données a été programmé selon les besoins des utilisateurs.

La majorité des objectifs de ce mémoire ont été atteints. Le système a permis de mesurer les performances du drone lors des premiers tests au sol. Les informations recueillies ont pu être utilisées pour diagnostiquer différents problèmes mécaniques et électriques. En plus d'être utilisées pour le diagnostic, les données amassées ont pu être utilisées pour définir une enveloppe de performances. Certaines mesures prévues lors de la conception du système n'ont pu être validées. Bien que l'installation des jauges de déformations a été complétée, l'implémentation du protocole de communication n'a pu être complétée.

Les travaux réalisés pourraient être continués en adaptant les différents algorithmes de traitements de données pour permettre le traitement des données sur l'appareil. Cette amélioration permettrait de réduire le temps de traitement entre les tests et rendrait disponibles les données traitées pour la télémétrie. De plus, il serait intéressant de compenser les déformations mécaniques causant des erreurs sur les encodeurs pour arriver à une mesure de couple sur les arbres de transmission.

ANNEXE I

LISTE DES PARAMÈTRES DIFFUSÉS PAR LE MOTEUR

Tableau-A I-1 Liste des paramètres diffusés par le moteur

Paramètres
Engine Speed
Fuel Flow Rate
Manifold Air Pressure
Oil Pressure
Oil Temperature
Coolant Temperature
LaneA Status
Engine Speed
Fuel Flow Rate
Manifold Air Pressure
Oil Pressure
Oil Temperature
Coolant Temperature
LaneB Status
EGT Cylinder 1
EGT Cylinder 2
EGT Cylinder 3
EGT Cylinder 4
Manifold Air Temperature
Engine Ambient Temperature
EGT Cylinder 1
EGT Cylinder 2
EGT Cylinder 3

Tableau-A I-1 – Liste des paramètres diffusés par le moteur (suite)

Paramètres
EGT Cylinder 4
Manifold Air Temperature
Engine Ambient Temperature
Fuel Pressure
Throttle Position
Engine Ambient Pressure
Throttle Position
Engine Ambient Pressure
Aircraft Bus Voltage
ECU Supply Bus Voltage
ECU Supply Bus Voltage
Latitude
Longitude
GPS Height
GPS Ground Speed
GPS Track
GPS Status 1
GPS Status 2
TOP Marker
Engine Hours
ECU Hours
ECU Hours
Fuel Pressure Reduced
ECUA Sensor Faults Lane A
ECUB Sensor Faults Lane A
ECUA Device Faults Lane A

Tableau-A I-1 – *Liste des paramètres diffusés par le moteur (suite)*

Paramètres
ECUB Device Faults Lane A
ECUA Sensor Faults Lane B
ECUB Sensor Faults Lane B
ECUA Device Faults Lane B
ECUB Device Faults Lane B

ANNEXE III

PÉRIPHÉRIQUES DE LECTURE DE COURANT

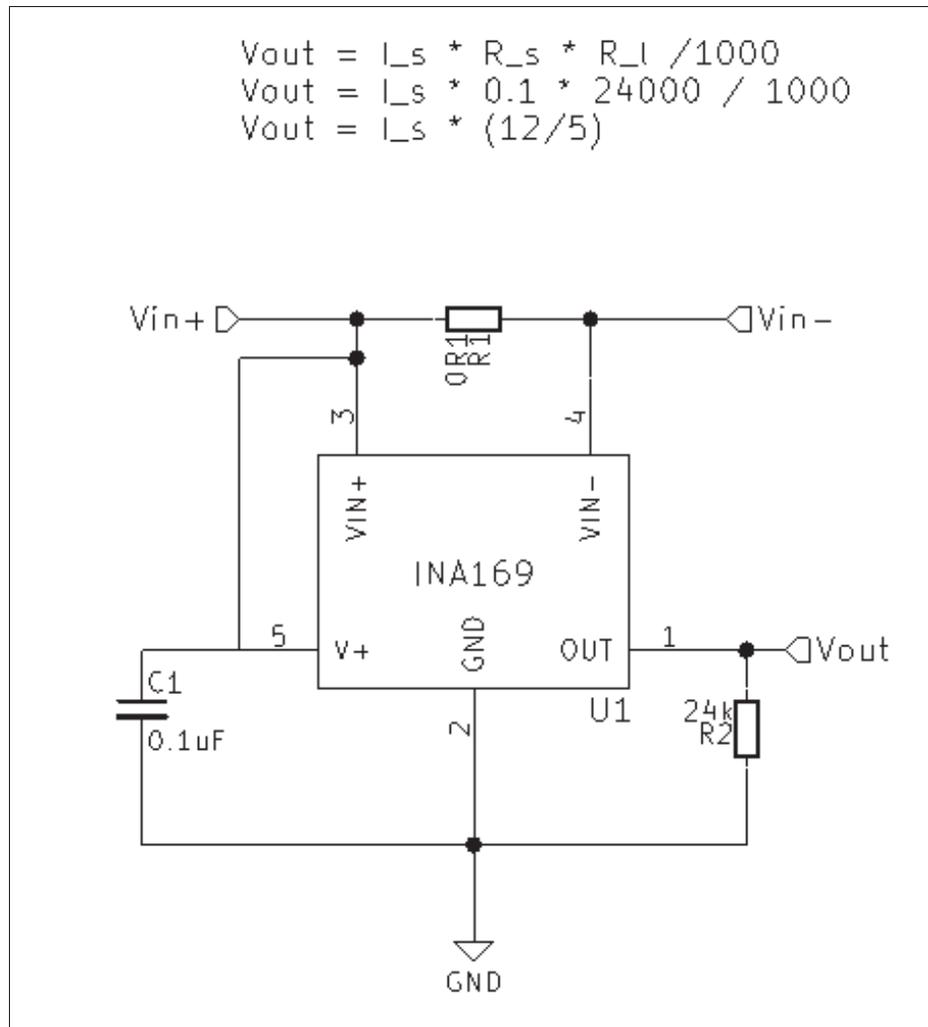


Figure-A III-1 Schéma électrique des périphériques de lecture de courant

LISTE DE RÉFÉRENCES

- Fontes, J. (2005). Temperature sensors. Dans *Sensor Technology Handbook* (éd. 1, pp. 531-561). Burlington, Massachusetts, États-Unis : Elsevier.
- Geerts, Y., Steyaert, M. & Sansen, W. (2002). Architecture study of delta-sigma converters. Dans *Design of Multi-Bit Delta-Sigma A/D Converters* (éd. 1, pp. 7-97). Dordrecht : Kluwer Academic Publishers.
- Jones, E., Oliphant, T., Peterson, P. et al. (2001–). SciPy : Open source scientific tools for Python. Repéré à <http://www.scipy.org/>.
- Lamarche, L. (2015). SYS803 : Systèmes de mesure. École de technologie supérieure.
- Lang, G. F. (1999, May). S&v geometry 101. *Sound and vibration*, pp. 16-26.
- Lord Corporation. (2015). SG-Link-OEM-LXRS Datasheet. Repéré à [http://files.microstrain.com/SG-Link_OEM_LXRS_Datasheet_\(8400-0051\).pdf](http://files.microstrain.com/SG-Link_OEM_LXRS_Datasheet_(8400-0051).pdf).
- National Instruments. (2014). NI-9870 Datasheet. Repéré à <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-276>.
- National Instruments. (2015a). NI-9205 Datasheet. Repéré à http://www.ni.com/pdf/manuals/374188a_02.pdf.
- National Instruments. (2015b). NI-9230 Datasheet. Repéré à http://www.ni.com/pdf/manuals/374829a_02.pdf.
- National Instruments. (2015c). NI-9401 Datasheet. Repéré à http://www.ni.com/pdf/manuals/374068a_02.pdf.
- National Instruments. (2015d). NI-9403 Datasheet. Repéré à http://www.ni.com/pdf/manuals/374069a_02.pdf.
- National Instruments. (2016). NI-9213 Datasheet. Repéré à http://www.ni.com/pdf/manuals/374916a_02.pdf.
- Omega Engineering inc. (2018a). Practical Strain Gage Measurements. Repéré à <https://www.omega.ca/techref/pdf/StrainGageCalcs.pdf>.
- Omega Engineering inc. (2018b). Positioning Strain Gages to Monitor Bending, Axial, Shear, and Torsional Loads. Repéré à https://www.omega.ca/techref/pdf/Positioning_Strain_Gages.pdf.
- Oppenheim, A. V., Schafer, R. W. & Buck, J. R. (1999). Filter design techniques. Dans Doe, J., Doe, J. & Doe, J. (Éds.), *Discrete-time signal processing* (éd. 2, pp. 468-471). Upper Saddle River, N.J. : Prentice-Hall.

PCB Piezotronics. (2008). 356A16 Triaxial ICP Accelerometer.

S.E.A. Datentechnik GmbH. (2016). SEA-9744 Hardware Manual.

Steinhart, J. S. & Hart, S. R. (1968, Août). Calibration curves for thermistors. *Deep sea research and oceanographic abstracts*, 15(4), 497-503.

Stock Flight Systems. (2006). Interface specification for airborne CAN applications V 1.7. Berg, Germany : Stock Flight Systems.

Wilson, J. S. (2005). Acceleration, shock and vibration sensors. Dans *Sensor Technology Handbook* (éd. 1, pp. 137-159). Burlington, Massachusetts, États-Unis : Elsevier.