

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ELECTRIQUE
M.Ing

PAR
BARA, Atik

ÉTUDE ET RÉALISATION D'UNE ARCHITECTURE DE COMMUNICATION
ET DE TESTS POUR RÉSEAUX MULTI-CAPTEURS MEMS DANS LES
APPLICATIONS AVIONIQUES

MONTRÉAL, LE 8 OCTOBRE 2008

© Bara Atik, 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. René Jr Landry, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Vahé Nerguizian, codirecteur de mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Jean-François Boland
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Gino Rinaldi, examinateur externe
Conseil National de Recherches du Canada, Ottawa

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 28 AOÛT 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier les professeurs René Jr Landry et Vahé Nerguizian pour leur bon encadrement, mais également pour leur soutien inconditionnel. C'est cet apport combiné de conseils, d'encadrements, d'aide financière qui a permis l'achèvement de ce travail.

Je voudrais également remercier la société P&WC (Pratt and Whitney Canada) pour leur apport à la réussite de ce travail et plus particulièrement Patrice Dionne, ingénieur M.Sc.A, pour les Externes et les contrôles de Nacelles, Luc Gendron, et également le Docteur Gino Rinaldi.

J'ai aussi de la reconnaissance envers tous les techniciens de l'ÉTS et mes collègues du laboratoire LACIME (Laboratoire de communication et d'intégration de la microélectronique) pour le support et l'aide morale qu'ils m'ont données, leur disponibilité, leurs conseils, leurs encouragements, mais également leur amitié tout au long de cette maîtrise.

Je remercie également toute ma famille en particulier ma sœur pour tous les encouragements qu'elle m'a prodigués, mais aussi pour son soutien sans faille.

Je remercie tous les membres du jury pour le temps qu'ils m'ont accordé.

ÉTUDE ET REALISATION D'UNE ARCHITECTURE DE COMMUNICATION ET DE TESTS POUR RÉSEAUX MULTI-CAPTEURS MEMS DANS LES APPLICATIONS AVIONIQUES

BARA, Atik

RÉSUMÉ

Dans le cadre du projet CRIAQ 6.2, il a été décidé, de communs accords, avec les ingénieurs de la société P&WC (Pratt and Whitney Canada) la réalisation des tests sur le moteur de type PWC67168 D. Il fallait donc développer des capteurs performants qui permettent l'acquisition de données et l'analyse de la pression et de la température. En ce qui concerne les capteurs, il faut donc s'occuper de l'empaquetage et de la compatibilité entre les connecteurs et le système d'acquisition. De même, certaines questions telles que le traitement du signal peuvent se poser lors des tests.

Notre objectif consiste à assurer la bonne communication d'un réseau de micro capteurs en technologies MEMS. Ces applications concernent ceux de l'aérospatiale, spécifiquement dans les turbines des moteurs d'avion où un environnement sévère (hautes températures et corrosif) existe. La présence de ces capteurs permettrait entre autre le contrôle et la surveillance de la santé des moteurs des avions en temps réels (en vol et lors des tests au sol). C'est dans cette optique que nous avons concentré notre étude sur l'acquisition et le traitement des données dans ce projet. L'équipe de Concordia s'est occupée de la réalisation des capteurs.

L'acquisition de donnée est réalisée en trois étapes. Dans un premier temps, la connaissance des équipements et des cartes d'acquisitions de données est essentielle. Elle permet de choisir celle qui effectue les opérations de manière confortable. La deuxième étape consiste à réaliser une étude des capteurs et de vérifier leurs caractéristiques. Cette étude permet de les implémenter sur la plateforme d'acquisition de donnée. Cette implémentation se réalise par l'alimentation des capteurs, mais également par l'introduction de formules et d'équations dans la programmation de routine. La dernière étape consiste à la prise en compte de mesures sécuritaires. Les mesures sécuritaires consistent à la redondance et la protection des capteurs dans un environnement sévère. L'analyse et le traitement de signaux constituent également une part essentielle de notre étude. Elle permet de réaliser une étude comparative des signaux de pression. De plus dans le cas d'une perte de vitesse du moteur, la réalisation d'un filtre permettra la recomposition du signal. Ces étapes constituent un ensemble des mesures très importantes pour réaliser notre projet.

STUDY AND REALIZATION OF A COMMUNICATION'S DESIGN AND TESTS FOR A MULTI-SENSORS NETWORK MEMS IN THE AVIONIC'S FIELD

BARA, Atik

ABSTRACT

Within the framework of project CRIAQ 6.2, it was decided, with common agreements, with the engineers of company P&WC (Pratt and Whitney Canada) the realization of tests on the engine PWC67168 D. It was thus necessary to develop powerful sensors which allow the data acquisitions and the analysis of the pressure and temperature. With regard to the sensors, it is necessary to develop the packaging and compatibility between the connectors and the system of acquisition. In the same way, many questions such as the signal treatment can arise at the time of the tests.

In this work, our goal is to allow the best communication of a micro sensors network in technologies MEMS for the aerospace applications, specifically in the turbines of the engines where a harsh environment exists (high temperatures and corrosion). The presence of these sensors would allow the control and the monitoring of the planes engines in real times (in flight and at the time of the tests on the ground). It is accordingly that we focused our study on the acquisition and data treatment in this project. The team of Concordia works on the realization of the sensors.

The acquisition of data is carried out in three steps. First of all the knowledge of equipment and data acquisition card is essentials. It allows us to choose the best equipments that can do the job comfortably. The second step is to study the sensors and verify if their specifications can be implemented in the platform of the data acquisition. This implementation is achieved through supply of the sensors, but also by the introduction of formula and equation in programming routine. The final step is to take the security measure. This measure means the redundant sensors and the protection in a harsh environment. The analysis and signal processing are also an essential part of our study. It allows a comparative study of the signals pressure. When we have a loss of engine speed, the filter will allows us to find and return the best signal. All these steps are very important actions to realize our project.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 PRÉSENTATION DU PROJET	4
1.1 Problématique de l'industriel et du projet.....	4
1.2 Les objectifs du mémoire.....	8
1.3 La méthodologie de travail	10
CHAPITRE 2 TECHNOLOGIE DES CAPTEURS	11
2.1 Définition des capteurs	11
2.2 Les différentes catégories de capteurs	13
2.2.1 Les capteurs passifs.....	13
2.2.2 Les capteurs actifs.....	14
2.3 Les principales caractéristiques des capteurs.....	16
2.4 Les principaux types de capteurs	18
2.4.1 Les capteurs de températures.....	19
2.4.2 Les capteurs de mesures mécaniques.....	25
2.5 Les principales technologies de fabrication des capteurs	27
2.5.1 Silicium micro-usiné.....	27
2.5.2 Les capteurs à fibre optique	28
2.5.3 Les capteurs à couches épaisses.....	29
2.5.4 Les MEMS	29
2.5.4.1 La technologie des MEMS.....	29
2.5.4.2 Le marché des MEMS	33
2.5.4.3 Les avantages des MEMS	34
CHAPITRE 3 CHOIX DES ÉQUIPEMENTS ET LEURS CARACTÉRISTIQUES	37
3.1 Définition des besoins matériels et logiciels.....	37
3.2 Sélection d'un équipement d'acquisition de signaux.....	38
3.2.1 Récapitulation des cartes d'acquisition sur le marché	38
3.2.2 Description du châssis NICDAQ9172	49
3.2.3 La carte NI9205	50
3.3 Récapitulation des logiciels d'acquisition de données.....	51
3.3.1 Présentation de Matlab.....	51
3.3.2 Présentation de LabVIEW	52
3.4 Spécifications des capteurs utilisés dans le projet	56
CHAPITRE 4 TESTS PRÉLIMINAIRES EN LABORATOIRE.....	58
4.1 Configuration de la carte d'acquisition.....	58
4.2 Description de l'interface usagée	63
4.2.1 La sélection des signaux	67
4.2.2 Mesure des composantes fréquentielles.....	68

4.2.3	Calcul du nombre de RPM.....	71
4.2.4	Configuration de la température	71
4.2.5	Écriture d'un fichier de donnée.....	74
4.3	Présentation des résultats effectués en laboratoire.....	76
4.3.1	Description du montage réalisé.....	76
4.3.2	Résultat des tests préliminaires	81
CHAPITRE 5 TEST CHEZ PRATT AND WHITNEY.....		85
5.1	Présentation de l'environnement chez Pratt and Whitney	85
5.2	Montage du système d'acquisition sur le moteur	86
5.3	Présentation des résultats obtenus chez Pratt and Whitney	89
CONCLUSION.....		106
RECOMMANDATIONS		109
ANNEXE I	LES DIFFÉRENTS MODULES ENFICHABLES SUR LE CHÂSSIS NICDAQ-9172.....	110
ANNEXE II	PRÉSENTATION DE LA FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR DE PRESSION SPM0102ND3-C	112
ANNEXE III	PRÉSENTATION DE LA FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR DE PRESSION SPM0103ND3	116
ANNEXE IV	PRÉSENTATION DE LA FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR DE TEMPÉRATURE	121
ANNEXE V	PRÉSENTATION DE LA CARTE D'ALIMENTATION	126
ANNEXE VI	PRÉSENTATION DE LA FICHE TECHNIQUE DES NOUVEAUX CAPTEURS DE PRESSIONS.....	130
ANNEXE VII	PERFORMANCES ET SPÉCIFICATIONS DU QD-2K DATA ACQUISITION SYSTEM	131
ANNEXE VIII DIFFERENTES COMPAGNIES DE CARTES D'ACQUISITION		134
BIBLIOGRAPHIE		139
SITES INTERNET		141

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Les caractéristiques du moteur model PWC67168.....
Tableau 2.1	Quelques principes de capteur passifs
Tableau 2.2	Quelques principes de capteur actifs.....
Tableau 2.3	Prévision des différentes applications de la technologie MEMS.....
Tableau 3.1	Les principales cartes de la série B sur le marché
Tableau 3.2	Les principales cartes de la série E sur le marché.....
Tableau 3.3	Les principales cartes de la série R sur le marché
Tableau 3.4	Les principales cartes de la série S sur le marché
Tableau 3.5	Les principales cartes utilisant le bus PCI Express.....
Tableau 3.6	Les principales cartes le bus Firewire sur le marché
Tableau 3.7	Les principales cartes le bus PCMCIA sur le marché.....
Tableau 3.8	Les principales cartes le bus compactFlash sur le marché.....
Tableau 3.9	Les principales cartes le bus ISA sur le marché
Tableau 3.10	Les différentes type de bus USB.....
Tableau 3.11	Les caractéristiques générales des bus utilisant les cartes d'acquisition ...
Tableau 3.12	Termes et convention équivalentes dans LabVIEW
Tableau 4.1	Comparaison des deux plateformes
Tableau 5.1	Comparaison des cartes d'acquisition.....

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	L'environnement d'un moteur d'avion PWC 67168
Figure 1.2	Vue en coupe du moteur
Figure 1.3	Organigramme du déroulement du projet
Figure 2.1	Courbe graphique d'un capteur de champ magnétique.....
Figure 2.2	Principe de fonctionnement des capteurs passifs.....
Figure 2.3	Principe de fonctionnement des capteurs actifs
Figure 2.4	Le temps de réponse à 5% d'un système stable à un échelon.....
Figure 2.5	Caractéristiques des thermistances CTN et CTP
Figure 2.6	Montage Darlington.....
Figure 2.7	Processus LIGA
Figure 2.8	Prévision du marché mondial des MEMS
Figure 3.1	Présentation générale d'une chaîne d'acquisition.....
Figure 3.2	Présentation du châssis NIcDAQ-9172
Figure 3.3	Présentation du module NI 9205.....
Figure 3.4	Palette de commandes de la face avant.....
Figure 3.5	Présentation de la Palette de commande du bloc de diagramme
Figure 3.6	Représentation de la boucle While en langage G
Figure 4.1	Icône du DAQ assistant
Figure 4.2	Configuration en mode différentielle.....
Figure 4.3	Présentation des configurations effectuées sur le DAQ.....
Figure 4.4	Présentation de la plateforme 1
Figure 4.5	Présentation de la plateforme2.....

Figure 4.6	Présentation d'un sous programme de la plateforme 2	65
Figure 4.7	Icône de la sélection des signaux	67
Figure 4.8	Configuration de la sélection des signaux	67
Figure 4.9	Mesure des composantes fréquentielles.....	68
Figure 4.10	Configuration de la mesure des composantes fréquentielles	69
Figure 4.11	Mesure d'amplitude et de niveau	70
Figure 4.12	Configuration des mesures d'amplitude et de niveau	70
Figure 4.13	Traduction en langage G du calcule du RPM	71
Figure 4.14	Configuration de l'icône Formula.....	73
Figure 4.15	Traduction en langage G du calcul de la température.....	73
Figure 4.16	Icône d'enregistrement d'un fichier de mesure	74
Figure 4.17	Configuration du fichier d'enregistrement.....	75
Figure 4.18	Présentation du PCB en vue de face	76
Figure 4.19	Présentation du PCB en vue de profile	77
Figure 4.20	Carte d'alimentation.....	77
Figure 4.21	Deuxième version de la carte d'alimentation.....	78
Figure 4.22	Présentation du schéma de la source de courant	79
Figure 4.23	Présentation du schéma de la source de tension	80
Figure 4.24	Le ventilateur d'expérimentation.....	81
Figure 4.25	Mesure expérimentale de la pression à l'aide du ventilateur	81
Figure 4.26	Présentation des résultats préliminaires	83
Figure 5.1	Présentation de l'environnement chez Pratt and Whitney	86
Figure 5.2	Nouvelle présentation du PCB	87
Figure 5.3	Connecteur militaire utilisé pour les tests chez P&WC	87

Figure 5.4	Présentation de la nouvelle face avant de la plateforme	88
Figure 5.5	Configuration du système d'acquisition	89
Figure 5.6	25000 premiers échantillons des capteurs de pressions.....	90
Figure 5.7	Autocréation entre les pressions	91
Figure 5.8	Présentation d'un cycle du moteur.....	92
Figure 5.9	Évolution des fréquences fondamentales et leurs amplitudes.....	93
Figure 5.10	Signal associé à sa FFT	94
Figure 5.11	Évolution des RPM pendant la phase de saturation.....	94
Figure 5.12	Évolution des fréquences fondamentales et leurs amplitudes en fonction du temps pendant la phase de décélération	95
Figure 5.13	Signal associé à sa FFT pendant la phase de décélération.....	96
Figure 5.14	Évolution des RPM pendant la phase de décélération	96
Figure 5.15	Évolution des fréquences fondamentales et leurs amplitudes en fonction du temps pendant la phase à faible RPM	97
Figure 5.16	Signal associé à sa FFT	98
Figure 5.17	Évolution du cycle pendant la phase des faibles RPM	99
Figure 5.18	Réponse fréquentielle en dessous de 150 secondes	100
Figure 5.19	Réponse fréquentielle au-delà de 150 secondes.....	100
Figure 5.20	Filtrage du signal au début de la perte des RPM	101
Figure 5.21	Filtrage du signal (période de faibles RPM)	102
Figure 5.22	Évolution de la température pendant le cycle	104

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

A380	Airbus 380
ADC	Analog to Digital Converter
AISENSE	Analog Input SENSE
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit
BESOI	Bonded and Etched-Back Silicon-On-Insulator
CAN	Canadien
CONCAVE	Concordia Centre for Advanced Vehicle Engineering
CRIAQ	Consortium de recherche et d'innovation en aérospatiale au Québec
CTN	Coefficient de Température Négative
CTP	Coefficient de Température Positive
DACQ	Digital Acquisition Compact Q
DAQ	Data Acquisition
DDP	Différence De Potentiel
DI	Digital Input
DM	Digital Multimeter
DO	Digital Output
FFT	Fast Fourier Transformer
FIR	Filtre à réponse impulsionnelle finie
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GPIB	General Purpose Interface Bus
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LIGA	Lithographie, Galvansformung Abformung
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MST	Micro-Systems Technology
NEMS	Nano Electro-Mechanical System
NI	National Instrument
NRSE	Nonreferenced Single-Ended
PCB	Printed Circuit Board

PCI	Peripheral Component Interconnect
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PDA	Personal Digital Assistant
P&WC	Pratt and Whitney Canada
RIF	Réponse Impulsionnelle Finie
RPM	Revolution Per Minute
RQN	Resonance Quadripolaire Nucléaire
RSE	Ground-Referenced Single-Ended
SAW	Surface Acoustic Wave
SNR	Signal to Noise Ratio
SOI	Silicon-On-Insulator
TTL	Transistor Transistor Logic
US	United States
VI	Virtual Instrument

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

b	Indice de sensibilité thermique
B	Champ magnétique
C_T	Coefficient de Thomson
D	Diamètre
D1	Rayon concave
d	diamètre du tube
dT	Différence de température
dV	Différence de potentiel
$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température
E	Module de Young
E_p	Précision
f	Fréquence
G	Grandeur à mesurer
h	Rayon convexe
H	Intensité du champ magnétique
I	Courant
I_i	Indication de la grandeur donnée par l'essai ou signal d'entrée
I_c	Courant du collecteur
k	Constante de Boltzman
K	Constante fixé par le transistor
K_H	Constante d'effet Hall
L_{cs}	Longueur critique
Ln	Logarithme népérien
N	Nombre de rotation
P	Nombre de dents de la roue

P_{ab}	Coefficient Peltier relatif aux matériaux a et b
q	Charge électrique
Q	Chaleur
R_{25}	Résistance à 25 degrés
R_0	Valeur de la thermistance du capteur à la température de référence T_0
$R(T)$	Résistance de la thermistance
S	Sensibilité
S_{ab}	Coefficient Seebeck du couple de matériaux
T	Température
v	Vitesse moyenne du fluide
V_0	Tension à la température 0 Kelvin
V_a	Tension d'entrée
V_s	Tension de sortie
V_{BE}	Tension base émetteur
V_H	Tension de l'effet Hall
V_T	Tension aux bornes du capteur
W_λ	Énergie thermique de la température ($W.cm^{-2}.\mu m^{-1}$)
x	Coordonnée spatiale
ΔE_s	Variation du signal de sortie
ΔE_a	Variation du signal d'entrée
θ_1 et θ_2	Angles de contact entrent le substrat et la microstructure
γ_1	Tension de surface de liquide
γ	Constante fixées par le transistor
λ	Longueur d'onde

Unités de mesure

B	Billion
degré F	Degré Fahrenheit
Hz	Hertz
FT	Feet
PSIA	Pound per Square Inch Absolute
mA	Milliampère
KHz	Kilo Hertz
MHz	Mega Hertz
Mo/S	Méga Octet par seconde
mv	millivolt
mW	milliwatt

INTRODUCTION

L'aéronautique a connu une évolution phénoménale ces dix dernières années. La mise en service d'avions performants et de haute capacité telle que l'A380 par exemple en est la preuve réelle que ce secteur déborde de vitalité. Par rapport à cette évolution, il devient très important et même crucial, de fournir à ce secteur des équipements adaptés. Les équipements doivent respecter les normes sécuritaires en aéronautique. Le domaine de l'acquisition de données joue un rôle primordial en aéronautique et particulièrement au niveau des tests. L'acquisition de données intervient également au niveau des instruments de mesure et des informations de la cabine de pilotage d'un avion. L'emploi des équipements dans ce domaine doit vérifier et valider des normes de sécurité très strictes.

L'histoire des instruments dans le domaine de l'acquisition de données est relativement récente. Le développement des instruments de mesure et d'information en aéronautique date de la Première Guerre mondiale. Ces instruments étaient basés sur des principes de fonctionnement très simples. Le fonctionnement de ces équipements n'était pas toujours efficace. Les erreurs engendrées par ces instruments ont entraîné des incidents dramatiques. La fin de la Deuxième Guerre mondiale marque un tournant décisif dans ce domaine. Grâce à l'évolution de l'informatique et de la microélectronique, des améliorations considérables ont été apportées à ces instruments. La portabilité et la vitesse de calcul des équipements ont permis d'améliorer considérablement la sécurité dans ce domaine. Le développement de logiciels de haute performance a facilité l'implémentation des équipements dans les systèmes de navigation aérienne. Le domaine de l'acquisition de donnée nécessite la connaissance et l'analyse des différentes manières de réaliser des interfaces. Il est également crucial de connaître les différentes évolutions des équipements et des logiciels dans ce domaine.

L'implémentation d'un nouveau système d'acquisition doit répondre aux exigences indiquées précédemment. Ce sont ces exigences qui conduisent à la réalisation de tests. Il n'est pas facile de passer de la simulation d'un prototype en laboratoire à des essais grandeur nature sur un moteur d'avion. Le problème n'est pas seulement l'absence de plateforme

d'acquisition de données servant à la simulation du nouveau moteur de Pratt and Whitney Canada. C'est aussi la nécessité d'analyser et d'interpréter les résultats lors des tests à l'aide d'outils adéquats. Il faut également éviter l'intrusion de paramètres qui peuvent modifier les résultats attendus. C'est aussi la nécessité d'analyser et d'interpréter les résultats lors des tests à l'aide d'outils adéquats. Le traitement des signaux en temps réel devient un outil important et vital.

La question principale qui se pose est de savoir si nous pouvons obtenir les résultats attendus lors des tests dans l'environnement du moteur. Pour répondre à cette question, des essais ont été réalisés dans l'environnement du moteur. Cette étude se fera en trois étapes. Tout d'abord, nous allons discuter du choix des capteurs, et de la description de l'environnement du système d'acquisition de données. Par la suite, nous allons étudier la réalisation de la plateforme nécessaire à cette acquisition. Enfin, nous ferons une discussion sur les résultats obtenus après les simulations. L'analyse des résultats nous permettra de tirer des conclusions sur la précision et la fiabilité des capteurs, mais aussi de vérifier si nous devons réaliser diverses opérations sur les signaux obtenus. Pour faire face à l'enjeu sécuritaire qui s'est développé ces dernières années dans le domaine aéronautique, nous devons prendre certaines décisions. La vérification des résultats est essentielle, car elle assure la conformité de nos espérances. Pour répondre à toutes les séries d'étapes décrites ci-dessus, ce mémoire se déclinera comme suit :

Le Chapitre 1 identifie correctement le problème. Il clarifie notamment les objectifs. Une attention particulière sera accordée à la structure du rapport ainsi qu'aux contributions apportées.

Le Chapitre 2 présente le cahier de charge. Il expose les spécifications et entre en détail sur les différentes technologies des capteurs et leurs compatibilités.

Le Chapitre 3 traite du choix des équipements et des logiciels. Il permet de vérifier la correspondance entre la sélection et les exigences du cahier de charge.

Le Chapitre 4 consiste en un examen minutieux des tests à l'ÉTS et leurs évolutions sur les résultats obtenus. Il sert de transition entre le choix des équipements et les tests en grandeur nature.

Le Chapitre 5 couvre les tests chez Pratt and Whitney Canada.

CHAPITRE 1

PRÉSENTATION DU PROJET

1.1 Problématique de l'industriel et du projet

La société Pratt and Whitney en collaboration avec le laboratoire LACIME de l'ETS et le laboratoire CONCAVE du département de génie mécanique de l'Université Concordia, ont élaboré le projet CRIAQ version 6.2. Le projet a pour but d'obtenir une réponse à une question essentielle. Comment peut-on surveiller la nouvelle génération de moteur PWC67168?

Le contrôle est un concept large et parfois abstrait. Nous devons connaitre quel type de contrôle est nécessaire, dans le cas de notre étude. En effet dans un moteur il existe plusieurs paramètres qui peuvent être contrôlés. Nous pouvons contrôler la température, la puissance, la consommation en carburant, le rendement et d'autres paramètres liés à l'environnement extérieur du moteur. La multitude de paramètres nous indique que nous devons focaliser notre attention sur ceux qui nous paraissent importants dans le cas de notre étude. Quels sont les paramètres que Pratt and Whitney veut contrôler?

Les paramètres essentiels qui bénéficient d'une estime de la part des ingénieurs sont :

- La pression (paramètre principal)
- La température (paramètre secondaire)

Les moteurs se distinguent par la source d'énergie qui leur permet de fonctionner. Plusieurs types de moteurs existent et peuvent être classifiés de la manière suivante :

- Les moteurs électriques
- Les moteurs à combustion fossiles
- Les moteurs hybrides

Dans le cas de notre étude, le moteur PWC67168 est de type fossile. Cela s'explique par l'efficacité et la domination sans partage de ce type de moteur par rapport aux autres dans le domaine aéronautique. Ce moteur est l'un des plus innovants de sa catégorie, car il

consomme très peu de carburant. D'une manière générale, l'environnement d'un moteur est toujours la même. Un moteur est composé en général de deux parties :

- Le stator (la partie fixe)
- Le rotor (la partie qui tourne autour d'un axe de rotation fixe)

La Figure 1.1 montre l'environnement d'un moteur de type PWC67168 (Pratt and Whitney Canada 67168) et ses différents composants.

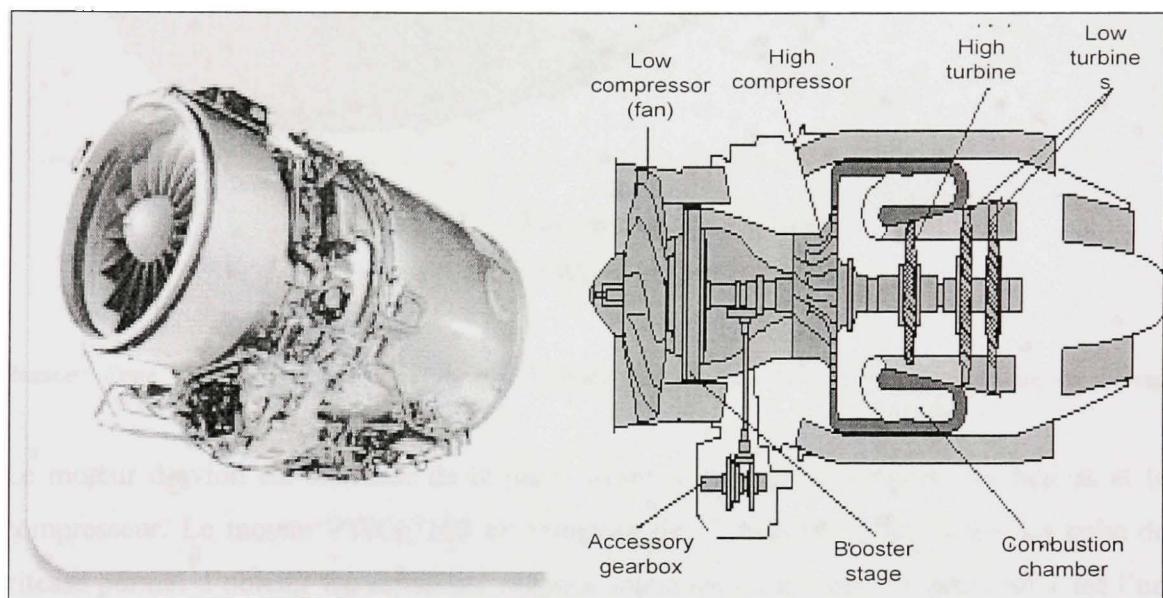


Figure 1.1 L'environnement d'un moteur d'avion PWC 67168.

(Tiré de Pratt and Whitney Canada, 2006)

Source : Cette figure a été tirée de, Pratt and Whitney Canada dans la section caractéristique du moteur PWC67168.

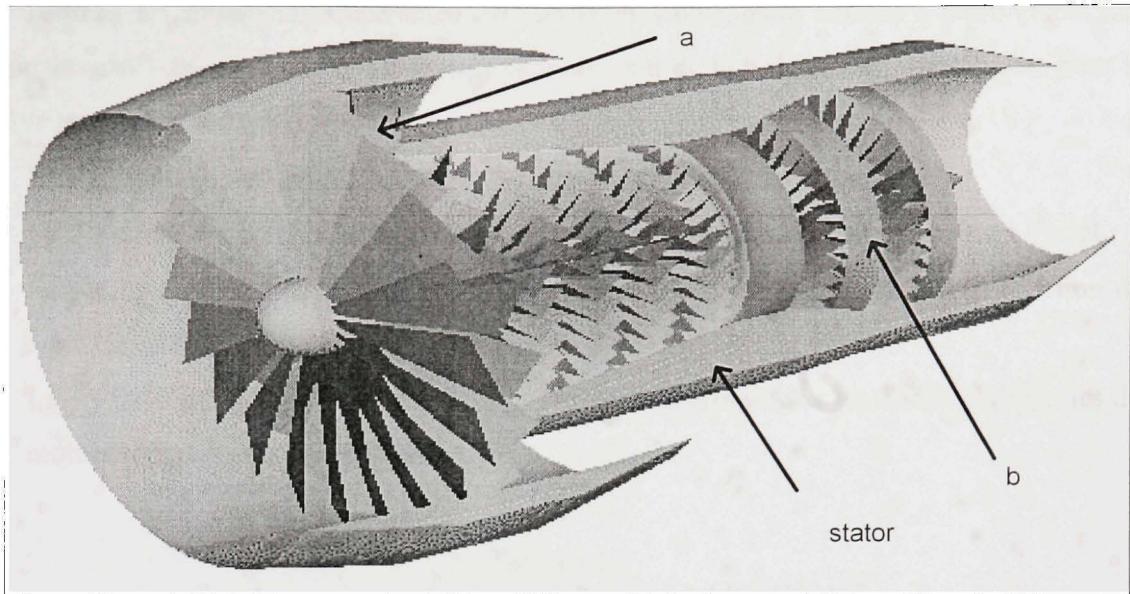


Figure 1.2 *Vue en coupe du moteur.*

(Tiré de Pratt and Whitney Canada, 2006)

Source : Cette figure a été tirée de Pratt and Whitney Canada dans la section caractéristique du moteur PWC67168.

Le moteur d'avion est constitué de la partie avant. Cette partie comporte les hélices et le compresseur. Le moteur PWC67168 est composé de 17 hélices équidistantes. La boîte de vitesse permet d'obtenir les différents régimes souhaités du moteur. Le propulseur est l'un des éléments les plus importants pour le fonctionnement du moteur. Il permet de fournir une force de poussée au moteur. La partie arrière du moteur est composée du compresseur qui fournit la puissance pneumatique au moteur. La Figure 1.2 montre que la turbine se compose d'un ensemble de disques rotatifs. Ces disques possèdent une force centrifuge très importante. Il est nécessaire qu'ils aient une stabilité irréprochable. La combustion du carburant s'effectue dans cette partie du moteur. Il est très intéressant d'obtenir les températures et les pressions au niveau de la partie avant du moteur (a) et au niveau de la partie arrière du moteur (b).

Le Tableau 1.1 montre les différentes caractéristiques du moteur soumis à notre étude. Les connaissances de la pression et la température au cœur de la turbine sont importantes pour le pilote pour les raisons suivantes :

- La connaissance du degré de chaleur permet d'identifier l'état du moteur ;
- La connaissance de la pression permet de savoir si le moteur est en marche ou à l'arrêt ;
- La pression permet au pilote de prendre certaines décisions préventives en fonction de l'évolution de ces paramètres ;
- La pression permet d'obtenir des renseignements théoriques sur les différents régimes du moteur lors des essais en entreprise.

Tableau 1.1
Les caractéristiques du moteur model PWC67168
(Tiré de Pratt and Whitney Canada, 2006)

	Température en (F)	Pression en PSIA	Fréquence d'un cycle de pression à 100% de vitesses
Sortie au niveau des pales	60 à 150 F	15 à 25	175 Hz
Pression basse compression.	170 à	20 à	
Sortie du premier axe (niveau du rotor)	500 F T25	100 P25	500 Hz
Détection de pic	Basse pression T25 170 à 500 F Haute pression T3 300 à 1000 F	Basse pression P25 20 à 100 F Haute pression P3 45 à 325	Bande passante de 10 KHz

Source : Ce Tableau a été tiré de Pratt and Whitney Canada dans la section caractéristique du moteur PWC67168.

Les informations du moteur doivent être obtenues immédiatement (donc en temps réel). Il est primordial que le pilote connaisse ses résultats de manière simultanée. Dans le cas contraire, la prise de décisions pour inverser le processus de la perte de vitesse du moteur serait tardive. Ce processus peut mettre en péril la vie des passagers de l'avion. Il existe donc une problématique sécuritaire à laquelle une réponse doit être apportée.

Concrètement, la problématique de mon mémoire consiste à réaliser l'acquisition de donnée et le traitement des signaux dans un système dont le cœur est le moteur PWC67168. L'éventualité selon laquelle nous devons faire une acquisition de donnée sans fil n'a pas été écartée.

1.2 Les objectifs du mémoire

Dans le cadre de la coopération entre l'ÉTS, Concordia et P&WC, mes travaux ont pour objectif de réaliser une bonne communication entre un réseau de micro-capteurs en technologies MEMS pour les applications aérospatiales et d'effectuer le traitement des signaux appropriés pour bien superviser les mesures. Ces applications couvrent en particulier les turbines des moteurs d'avion où nous retrouvons des conditions hostiles (hautes températures et corrosif, hautes pressions). La présence des capteurs permet d'assurer entre autres, le contrôle et la surveillance du bon fonctionnement des moteurs d'avion en temps réel (en vol et lors des tests au sol). Nous devons obtenir les informations sur la température. Nous devons également réaliser des acquisitions de données dans un environnement réel du moteur de Pratt and Whitney Canada. Faire des acquisitions de données dans un moteur n'est pas chose facile. Nous devons nous préoccuper des températures du moteur, des contraintes, et de plusieurs autres facteurs qui peuvent intervenir et parfois même interagir entre eux. La réalisation d'un mémoire nécessite une stratégie et un organigramme des étapes de la réalisation de l'acquisition. La Figure 1.3 présente donc l'organigramme général qui a guidé la réalisation de ce projet. Dans cette optique les objectifs de mon mémoire sont:

- Définir le capteur ;
- Couvrir les différents types de capteurs ;
- Connaitre les caractéristiques des capteurs ;

- Connaitre les différentes technologies de capteurs existant sur le marché ;
- Connaitre les différentes cartes qui réalisent l'acquisition de données ;
- Connaitre les principaux logiciels qui permettent la réalisation de l'acquisition de donnée ;
- Faire les choix des équipements qui répondent aux normes et contraintes du moteur chez P&WC. Il faudra donc faire un choix sur le matériel et le logiciel ;
- Prendre en main la carte d'acquisition;
- Prendre en main le logiciel d'acquisition ;
- Créer une plateforme qui permet d'obtenir les résultats recherchés à l'aide du traitement des signaux ;
- Définir le système d'acquisition de donnée ;
- Test en laboratoire et chez P&WC.

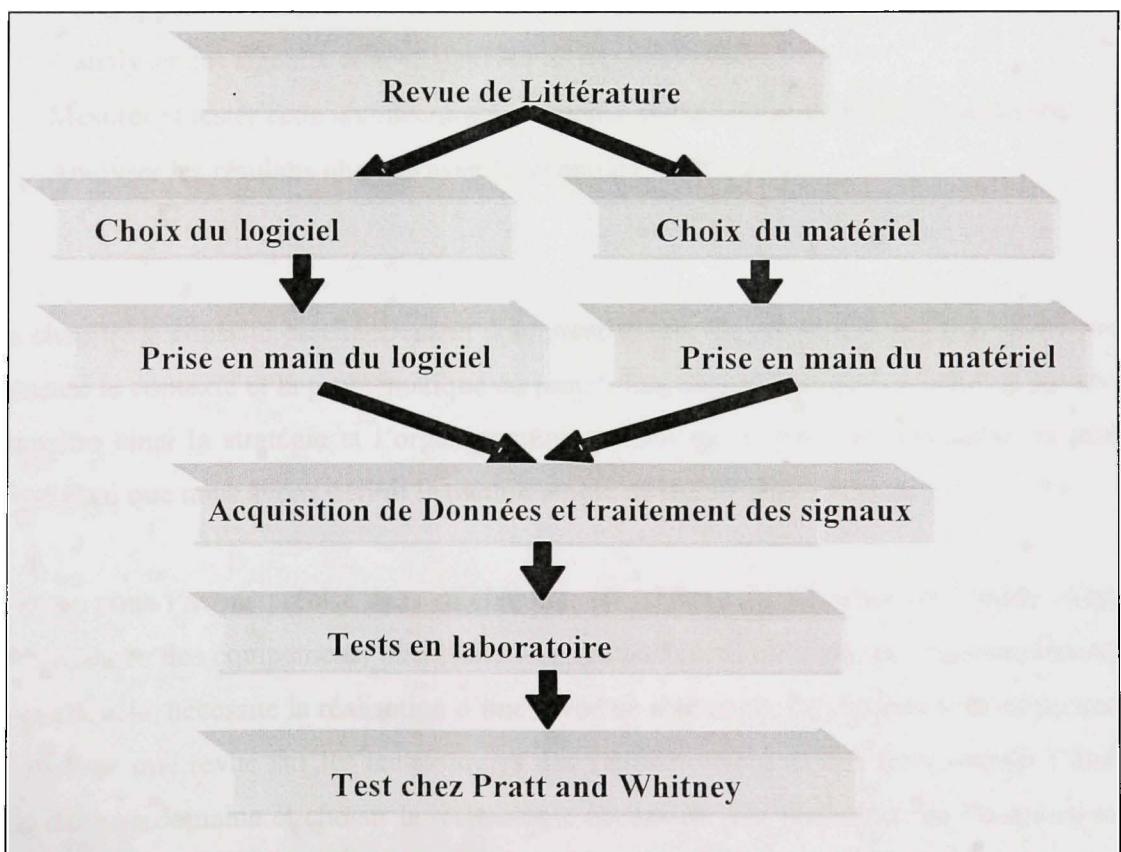


Figure 1.3 *Organigramme du déroulement du projet.*

1.3 La méthodologie de travail

Dans un premier temps, il s'agit d'étudier la problématique de l'application et de situer le travail à l'intérieur de l'équipe de recherche. Par la suite, nous allons proposer des solutions nouvelles pour le système de communication et de traitement des mesures MEMS.

Les étapes suivantes indiquent la méthodologie à suivre.

- Faire une revue de littérature sur les technologies d'empaquetage, de communication et de traitement des signaux des capteurs MEMS ;
- Développer un système d'intégration de test des capteurs MEMS ;
- Établir un réseau et une technologie d'acquisition des mesures des différents capteurs ;
- Mettre au point une table d'essai permettant l'acquisition et le traitement en temps réel des divers signaux provenant des capteurs ;
- Développer et adapter un simulateur sur Matlab Simulink ou Labview permettant d'analyser ces signaux et de diagnostiquer des anomalies ;
- Mesurer et tester cette architecture de capteurs MEMS dans un environnement réel ;
- Analyser les résultats obtenus avec la technologie développée.

Ce chapitre a consisté essentiellement à la présentation du projet CRIAQ 6.2. Nous avons présenté le contexte et la problématique du projet. Les objectifs du projet nous ont permis de connaître ainsi la stratégie et l'organigramme général qui a guidé la réalisation du projet. C'est ainsi que nous avons définie la méthodologie de travail pour ce rapport.

Comme nous l'avons précisé dans ce chapitre, un système d'acquisition de donnée exige la connaissance des équipements nécessaire à sa réalisation. C'est ainsi que l'accomplissement de cette tâche nécessite la réalisation d'une revue de littérature. Le chapitre suivant permettra de réaliser une revue sur les technologies des capteurs. Nous allons ainsi réaliser l'état de l'art dans ce domaine et choisir la technologie nécessaire à la réalisation de l'acquisition de données.

CHAPITRE 2

TECHNOLOGIE DES CAPTEURS

L'un des éléments essentiels qui composent le système d'acquisition de donnée est le capteur. Les types de capteurs que nous avons utilisés dans le cadre de ce projet sont des capteurs de technologies MEMS. Ce chapitre a pour objectif de présenter les différents capteurs existant sur le marché et leur technologie.

Nous allons tout d'abord définir les capteurs et les classifier en précisant les différentes technologies qui peuvent être utilisées dans un système d'acquisition. L'étape suivante consistera à évaluer les principales caractéristiques pour approfondir notre étude sur les capteurs MEMS ainsi que les différentes technologies et méthodes de fabrication. Il s'en suivra, une étude comparative des coûts de production sur le marché. Ces études nous permettront de justifier le choix de la technologie utilisée dans ce projet. Finalement, nous allons réaliser un résumé des points forts de ce chapitre sous forme de conclusion et donner ainsi la direction à suivre.

2.1 Définition des capteurs

D'après Ichinoise et Kobayashi (1990), l'intérêt que suscitent les capteurs est très récent. Cette curiosité provient de l'augmentation de plus en plus croissante qu'occupent les systèmes de traitement de l'information par microprocesseur.

Le mot capteur signifie sensor en anglais. Le terme "Sense" provient du latin. Cette expression se traduit par la capacité de sensation et de perception. Nous pouvons avoir des sensations et stimulations telles que les lumières, les sons, et la chaleur. Grâce à ces organes sensoriels, l'homme arrive à appréhender la nature et être en contact avec elle. Ces sensations qui autrefois étaient difficiles à mesurer sont de nos jours quantifiables. Les capteurs deviennent de plus en plus sophistiqués, car la technologie évolue de manière exponentielle. Ce sont des instruments qui permettent de connaître des informations issues d'un phénomène

ou d'un objet. Ils ont des principes semblables aux cinq sens de l'homme. Par définition, un capteur est un dispositif qui permet de convertir une donnée physique (c'est-à-dire une pression, une force, une déformation, etc.), en un signal électrique ou en une autre grandeur que l'on peut utiliser ou manipuler. Le capteur est constitué au minimum d'un transducteur. D'après Malmstad (1973), le transducteur d'entrée dans le domaine électrique est considéré comme tous éléments permettant la conversion des informations en quantité non électrique. Les transducteurs de sortie sont des éléments qui permettent la conversion de données d'un domaine électrique vers un domaine non électrique. La Figure 2.1 montre un exemple de fonction du capteur. Le terme transducteur est donc utilisé dans plusieurs contextes et peut donc prêter à confusion. D'une manière générale, nous désignons par le mot transducteur tout système qui permet la conversion d'une grandeur physique en une autre. La représentation mathématique d'un capteur peut se résumer à une fonction.

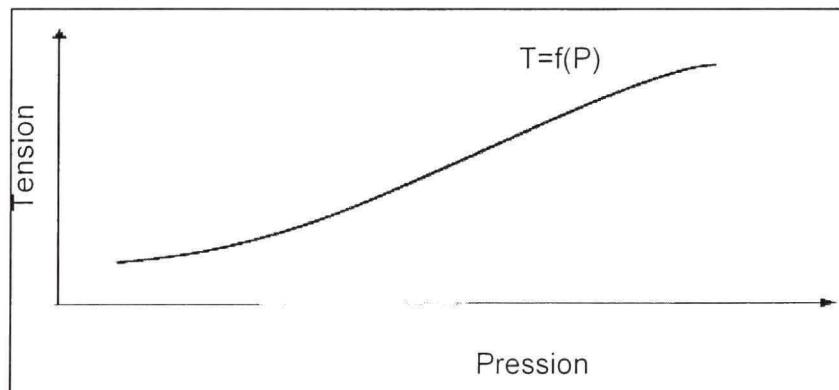


Figure 2.1 Courbe graphique d'un capteur de pression.
 (Tiré de science de l'ingénieur de Cachan, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du site des sciences de l'ingénieur de Cachan, dans la section chaîne d'acquisition: choix d'un capteur et d'un conditionneur. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

2.2 Les différentes catégories de capteurs

2.2.1 Les capteurs passifs

Par définition, on entend par capteurs passifs, tous dispositifs ou capteurs qui ne nécessitent pas la présence d'énergie extérieure pour fonctionner. D'après Kobayashi (1990), un capteur passif permet d'utiliser un élément intermédiaire appelé corps d'épreuve ou de référence. Cet élément constitue le corps intermédiaire. Sa position dans la chaîne du capteur se situe entre le mesurande et l'alimentation électrique. Le Tableau 2.1 illustre quelques exemples de capteurs passifs. De même, la Figure 2.2 montre le principe de fonctionnement des capteurs passifs. La transformation du mesurande ne se fait donc pas de manière directe (grandeur physique mesurée en une grandeur électrique). Chaque conversion d'une grandeur physique en grandeur électrique correspond donc à un signal de faible amplitude.

Tableau 2.1
Quelques principes de capteur passifs
(Tiré de Wikipédia, 2007)

Capteurs passifs	Principe
Thermistance	Variation de la température
Jauge de déformation	Variation en fonction de la déformation
Capteur de position	La résistivité des corps magnétorésistants est liée au phénomène du champ magnétique qui agit sur eux.

Source : Ce Tableau a été tiré du site Wikipédia, dans la section du capteur passif. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

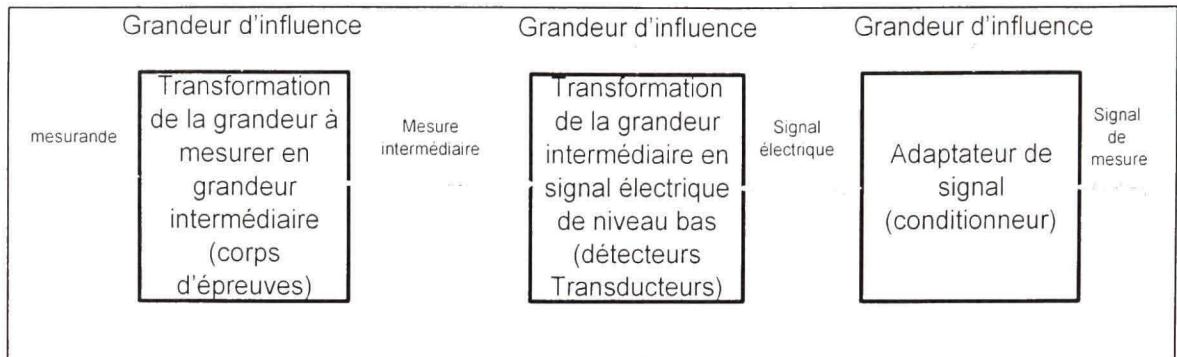


Figure 2.2 Principe de fonctionnement des capteurs passifs.

(Tiré de science de l'ingénieur de Cachan, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du site des sciences de l'ingénieur de Cachan, dans la section chaîne d'acquisition: choix d'un capteur et d'un conditionneur. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

2.2.2 Les capteurs actifs

Les capteurs actifs permettent une transformation directe de la mesurande (grandeur physique mesurée) en une grandeur électrique. Le Tableau 2.2 illustre quelques exemples de capteurs actifs. De même, la Figure 2.3 montre le principe de fonctionnement des capteurs actifs. Chaque conversion d'une grandeur physique en grandeur électrique correspond donc à un principe physique. Il existe également plusieurs autres critères qui permettent de classifier les capteurs. À l'aide de ces critères, nous pouvons citer les types de capteurs suivants :

- Les capteurs analogiques délivrent des signaux analogiques ;
- Les capteurs numériques délivrent des signaux numériques (0 ou 1) ;
- Les capteurs intelligents possèdent des facultés telles que la capacité à traiter leurs données et délivrer un signal.

Tableau 2.2
Quelques principes de capteur actifs
(Tiré de Wikipédia, 2007)

Capteurs actifs	Principe de conversion
Capteurs à effet Hall	<p>Le principe de conversion est celui du champ magnétique. Lorsqu'un courant parcourt un métal et si celui-ci est soumis à un champ magnétique perpendiculaire.</p> $V_H = K_H * B * I \quad (2.1)$ <p>Où V_H : est la tension effet Hall, K_H : le coefficient d'effet Hall B : Le champ magnétique, I : Le courant</p>
Capteur thermoélectrique	<p>Le principe est fondé sur la différence de température entre deux matériaux. Ce phénomène crée une tension proportionnelle à cette différence. Le principe est basé sur les effets de Seebeck, Peltier, et Thomson.</p> $S_{ab} = \frac{dV}{dT} \quad (2.2)$ <p>Où S_{ab} : le coefficient Seebeck, V : la tension, T: la température</p> $P_{ab} = \frac{Q}{I} \quad (2.3)$ <p>P_{ab} : coefficient Peltier, Q : quantité de chaleur, I : le courant</p> $\frac{dQ}{dx} = I \frac{dT}{dx} c_T \quad (2.4)$ <p>Où $dT(x)/dx$ est le gradient de température, c_T est le coefficient Thomson, X est la coordonnée spatiale et I est le courant</p>
Capteurs piézo-électriques	Un corps de type piézo-électrique soumis à des déformations entraîne l'apparition de charges électriques. Il se constitue alors une DDP (Différence de Potentiel) à ses bornes.

Source : Ce Tableau a été tiré du site Wikipédia, dans la section du capteur passif. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

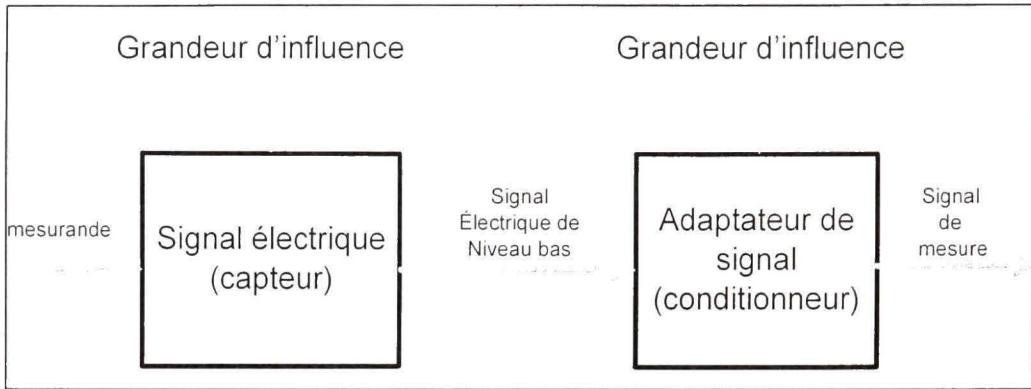


Figure 2.3 Principe de fonctionnement des capteurs actifs.

(Tiré de science de l'ingénieur de Cachan, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du site des sciences de l'ingénieur de Cachan, dans la section chaîne d'acquisition: choix d'un capteur et d'un conditionneur. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

2.3 Les principales caractéristiques des capteurs

D'une manière générale, nous caractérisons les capteurs selon plusieurs critères. Ces caractéristiques dicteront le choix des capteurs dans la suite du mémoire. Parmi ces critères, nous pouvons citer :

La sensibilité

La sensibilité est la plus petite variation qu'un capteur permet de déceler. Elle constitue un paramètre qui a pour objectif d'évaluer la variation du signal de sortie d'un capteur en fonction du signal d'entrée. Lorsque la valeur du signal d'entrée est de même type que la valeur du signal de sortie, la sensibilité est équivalente au gain. L'équation suivante illustre la traduction mathématique de cette sensibilité.

$$S = \frac{dI_1}{dG} \quad (2.5)$$

où S est la sensibilité, dI_1 est la variation du signal d'entrée et dG est le signal de sortie

La précision

La précision d'un capteur est la capacité de ce dernier à fournir une réponse particulière. La valeur de cette réponse ressemble à celle de l'entrée. Elle peut être caractérisée par l'erreur. Nous obtenons alors une valeur en unité ou en pourcentage. L'équation suivante illustre la traduction mathématique de la précision.

$$E_p = \frac{\Delta E_s}{\Delta E_a} \quad (2.6)$$

où E_p est la précision, ΔE_a est la variation du signal de sortie et ΔE_s la variation du signal d'entrée.

La linéarité

La linéarité est la capacité d'un capteur à fournir une valeur en sortie proportionnelle à celle de l'entrée. Un capteur possédant une bonne linéarité se traduit par une caractéristique de la sortie par rapport à l'entrée qui est une droite.

L'hystérésis

L'hystérésis se traduit par deux courbes :

- Une courbe de croissance
- Une courbe de décroissance

Ces deux courbes ne sont pas liées, car elles ne se superposent pas. D'une manière générale d'après Robert (1993), on entend par hystérésis la propriété d'un instrument de mesure dont la réponse à un signal en entrée dépend de la séquence des signaux d'entrée précédents.

La dérive thermique

La dérive thermique est la capacité d'un capteur à dériver de sa valeur sous l'influence de la température. Cette caractéristique est liée à la précision. Il est préférable de choisir un capteur qui possède une petite dérive thermique. Dans le cas d'un moteur par exemple, une grande dérive thermique du capteur de pression entraînera des valeurs différentes de celles que nous devons obtenir en réalité.

Le temps de réponse

D'après Robert (1990), le temps de réponse est l'intervalle compris entre le moment où le signal à l'entrée réalise un changement brusque et celui où le signal à la sortie atteint dans des limites sa valeur terminale en régime établi et s'y maintient. La Figure 2.4 montre le temps de réponse à un système stable et à un échelon. Ce temps de réponse est spécifiquement déterminé par le pourcentage. Les valeurs les plus utilisées sont les temps de réponse à 2% et à 5%.

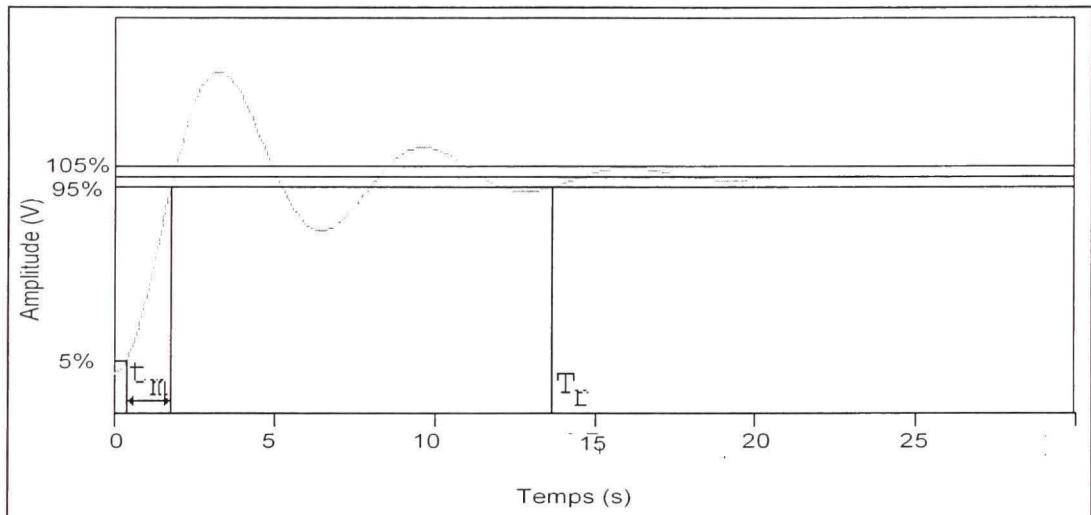


Figure 2.4 Le temps de réponse à 5% d'un système stable à un échelon.

(Tiré de Wikipédia, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du site de Wikipédia, dans la section automatisation: stabilité à un échelon. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

2.4 Les principaux types de capteurs

Ichinoise et Kobayashi (1990) indiquent que l'on prévoit l'augmentation de la production des capteurs dans les années suivantes. Cette croissance s'explique par la demande persistante des capteurs dans tous les domaines en particulier de l'industrie. Cette raison s'explique par

l'existence d'une multitude de capteurs qui possèdent des morphologies, des caractéristiques, et des objectifs différents.

2.4.1 Les capteurs de températures

La température est un élément très important dans notre environnement. Il est très facile de faire un amalgame entre la température et la chaleur. Par définition, la température est un niveau d'énergie du mouvement des atomes ou des particules. Cette énergie s'appelle la chaleur. Il existe plusieurs types de capteurs de température. Le premier critère qui permet de différencier ces capteurs est le contact.

C'est ainsi que nous distinguons deux types de capteurs :

- Les capteurs de contact touchent l'environnement ou l'objet dont ils veulent connaître la température. Ils ne sont pas appropriés à des températures au-delà de 2500 degrés.
- Les capteurs sans contact sont très éloignés de l'objet dont on veut connaître la température. Ils ne sont pas appropriés pour des mesures de haute précision et en milieu gazeux.

D'une manière générale, le choix des capteurs doit répondre aux critères suivants :

- Méthode de détection
- Domaine des températures à mesurer
- Précision et sensibilité
- Temps de réponse
- Taille et poids du capteur
- Adaptation à l'environnement
- Fiabilité et sécurité
- Prix et disponibilité sur le marché

Il existe aussi des capteurs de température qui utilisent des matériaux tels que la platine, le nickel, et le cuivre. Les capteurs utilisant des résistances de platine sont très stables. Ce sont souvent des résistances de 100 ohms. Elles sont alimentées par un courant de 2.5mA et

possèdent des précisions de 0.15 %, 0.2 % et 0.5 %. Ce sont des capteurs qui sont très utilisés dans le domaine industriel. Les thermistances font partie des capteurs de température. Ce sont des capteurs ayant une résistance qui évolue énormément quand la température varie.

Il existe plusieurs types de thermistances :

- Les thermistances CTN sont des résistances à coefficients de température négatifs. La résistance d'une thermistance est déterminée en fonction de la température. L'équation suivante illustre la traduction mathématique de la résistance de la thermistance.

$$R(T) = R_0 \exp[b(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0})] \quad (2.7)$$

où R_0 est la résistance initiale, T_0 est la température initiale, et T est la température recherchée, b est le coefficient CTN.

Ce sont des thermistances qui mesurent des températures pouvant aller jusqu'à plus de 300 degrés.

- Les thermistances CTP sont des résistances à coefficients de températures positifs. La Figure 2.5 illustre les caractéristiques typiques des thermistances CTN et CTP. Les coefficients des pentes varient en fonction des matériaux utilisés. Le baryum a un coefficient plus élevé que celui du plomb.

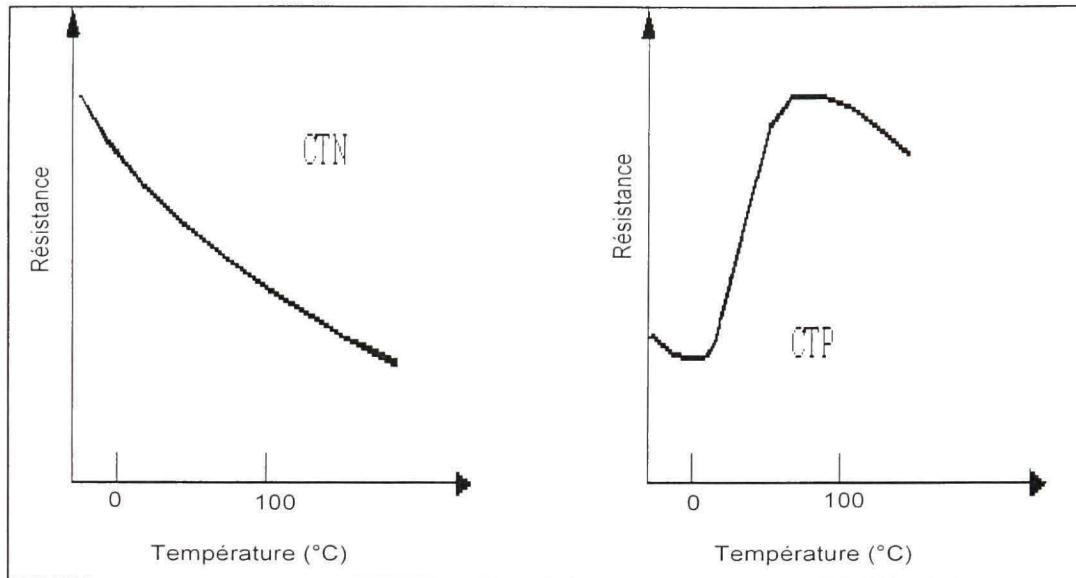


Figure 2.5 Caractéristiques des thermistances CTN et CTP.
(Tiré de science de Wikipédia, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du site des sciences de Wikipédia, dans la section thermistance. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Les thermocouples

Le principe du thermocouple est basé sur l'utilisation de l'effet Seebeck décrit précédemment. Le thermocouple possède un défaut de précision. Son principe est commercialisé dans le domaine médical. L'utilisation des thermomètres fait exemple de référence également dans les domaines de la science et de l'industrie.

Capteur thermique à transistor et semi-conducteur

Lorsque le collecteur d'un transistor est parcouru par un courant constant, il se crée une tension à ses bornes. Ce capteur intègre les composants des circuits d'alimentation (amplificateurs, source de courant). Nous exprimons la tension entre la base et l'émetteur par l'équation suivante :

$$V_{BE} = V_0 - \left(\frac{kT}{q} \right) \ln\left(KT \frac{\gamma}{I_c}\right) \quad (2.8)$$

où T est la température, k est la constante de Boltzman, q est la charge électrique, V_0 est la tension à la température 0 Kelvin, I_c est le courant collecteur, et K et γ sont des constantes fixées pour un transistor.

Les thermomètres RQN

Le capteur est basé sur le principe de la résonnance quadripolaire nucléaire. L'expression de la température est en fonction des fréquences de résonnance. Ce capteur possède une grande précision. Il est utilisé pour les domaines d'applications où la température varie entre des valeurs négatives et positives. Il est parfois utilisé comme capteur de précision.

Capteurs thermiques à quartz

Ces capteurs sont basés sur les propriétés d'oscillation du quartz. La fréquence est donc très sensible à la variation de la température. Nous pouvons ainsi avoir une bonne résolution comparable à celle des capteurs RQN. La précision de ces capteurs varie de 0,1 à 0,01 degré. Ils sont utilisés dans des domaines d'applications où la température varie entre des valeurs comprises entre -80 et 250 degrés.

Capteurs à onde de surface (SAW)

Ce capteur utilise uniquement la surface pour transmettre les ondes. La température varie en fonction de la fréquence d'oscillation. Le principe est équivalent à celui du quartz. Le capteur possède une très bonne résolution. Nous obtenons des réponses de températures avec des fréquences de résonance supérieures à 100 MHz. De même, ces capteurs possèdent une très bonne sensibilité. Ils n'ont pas un temps de réponse très élevé.

Les capteurs thermophiles

Les capteurs thermophiles sont des systèmes infrarouges composés de plusieurs thermocouples reliés en série. Ces thermocouples sont souvent en forme de cercles ou de lignes. Il existe une relation entre l'énergie thermique et la température. D'après

Kobayashi(1990), nous exprimons l'énergie thermique de la température par l'équation suivante :

$$W_{\lambda} = 3.74 * 10^4 * \lambda^{-5} \left[\exp\left(\frac{1.44 * 10^4}{\lambda T} - 1\right) \right]^{-1} \quad (2.9)$$

où λ est la longueur d'onde, W_{λ} est l'énergie correspondant à la longueur d'onde, et T est la température.

Cette énergie permet la déduction de la température. Nous avons le résultat suivant :

$$\lambda T = \frac{1.44 * 10^4}{\ln \left[\frac{3.74 * 10^4 * \lambda^{-5}}{W_{\lambda}} \right] + 1} \quad (2.10)$$

Pour améliorer la sensibilité des capteurs, nous utilisons des matériaux particuliers. Ces matériaux ont un rapport λ/ρ très faible. Les capteurs ont la particularité d'avoir des prix très élevés à cause de leur moyen de fabrication. La réduction des coûts de production est possible grâce à l'utilisation des technologies des semi-conducteurs. Ces capteurs sont très répandus dans le domaine de l'aérospatiale.

Les pyrocapteurs

Les pyrocapteurs ont un principe basé sur les rayonnements infrarouges. La nouveauté par rapport aux capteurs thermophiles est l'utilisation de matériaux pyro-électriques. Ils ont des coups de fabrications très bas par rapport aux thermophiles. De plus, ils sont faciles à utiliser. Leurs applications sont très répandues dans le domaine des appareils électroménagers.

Les thermomètres à cristaux liquides

Il existe trois catégories de cristaux liquides :

- Les nématiques constituent des liquides biréfringents. Nous entendons par biréfringence, la capacité physique que possède un matériau à propager la lumière de

manière anisotrope. L'indice de réfraction d'un milieu biréfringent est lié à la direction de propagation et de la polarisation du rayon lumineux.

- Les smectiques sont des cristaux liquides dont les molécules sont des couches séparées.
- Les cholestériques constituent la structure que nous retrouvons très souvent au niveau des capteurs de températures. Lorsque la température varie, nous constatons donc un changement de couleur des cristaux. Le capteur effectue donc la mesure et l'affichage de la température. Il ne s'utilise pas dans des processus qui nécessitent le contrôle de la température. Les capteurs sont commercialisés comme outils d'exploration non destructive, mais également comme thermomètre.

Les ferrites thermosensibles

Ils ont un principe basé sur la dépendance entre la température et le magnétisme. Grâce à ce principe, l'obtention des capteurs de haute précision est possible. Les ferrites sont utilisées comme capteur thermique. Nous considérons les caractéristiques des grandeurs magnétiques en fonction de la température et celle des réponses dynamiques en fonction de la chaleur.

Les thyristors thermosensibles

Les thyristors thermosensibles sont des capteurs identiques aux thyristors. Ils comportent deux jonctions PN. Ces capteurs peuvent jouer le rôle d'interrupteur de courant. L'un des critères à vérifier pour le choix du thyristor est le domaine de température.

Nous avons trois plages de températures où ces capteurs peuvent opérer :

- Basse température -30 à 35 degrés C
- Moyenne température 15 à 60 degrés C
- Haute température 70 à 120 degrés C

Les thyristors thermosensibles sont utilisés dans le domaine de la commande et surtout dans l'électroménager.

2.4.2 Les capteurs de mesures mécaniques

Ils peuvent être des capteurs de contact ou à distance. Les grandeurs mécaniques se présentent sous plusieurs formes. Il existe plusieurs types de capteurs mécaniques.

Les capteurs de pression à silicium

Ce sont des capteurs encore appelés capteur de pression à diaphragme. Les progrès dans le domaine du développement des monocristaux, ont abouti à la création de membranes fines. Ces membranes constituent la partie essentielle du capteur de pression à silicium. Le capteur est très sensible aux déformations thermiques ou mécaniques. Il est donc nécessaire de prendre certaines dispositions pour assurer la stabilité des mesures. Ils possèdent un facteur de jauge très important et une hystérésis très faible.

Capteur de pression à capacité statique

Le capteur à capacité statique ne possède pas d'éléments diffus comparativement au capteur silicium. Il nécessite un circuit de conversion de la pression en signal. Le capteur dispose également de composants électriques réduits. Il possède également une bonne fiabilité.

Les phototransistors

Les phototransistors sont composés d'une base de type P et d'un émetteur de type N. Ces deux bornes sont supportées par une jonction de type N. L'augmentation du courant amplificateur est possible avec certains montages tels que celui de Darlington. La Figure 2.6 montre la disposition en cascade de ces transistors (montage Darlington).

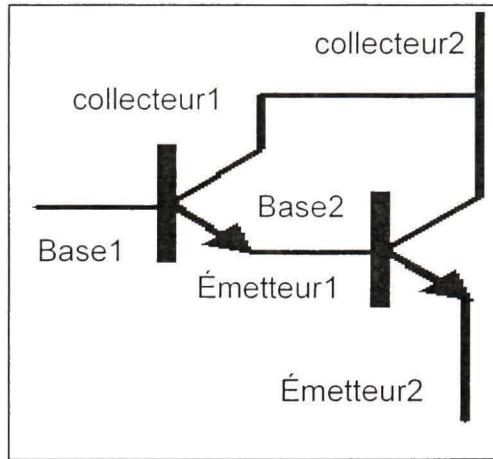


Figure 2.6 Montage Darlington.

(Tiré de science de Wikipédia, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du site des sciences de *Wikipédia*, dans la section Transistor Darlington. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Ils ont un temps de réponse très faible, et une mauvaise linéarité. Ces caractéristiques entraînent par conséquent une utilisation limitée dans le domaine de l'industrie.

Les capteurs intelligents

D'une manière générale, les capteurs dits intelligents ont fait leur apparition depuis les années 1980 dans le domaine de l'industrie. Comme le montre Robert (1993), ces capteurs ont dû s'améliorer et répondre à certains critères comme la capacité de traitement, la crédibilité, mais également la capacité de fournir les informations de manière souple et efficace. Le capteur intelligent n'est pas un composant ordinaire. Il doit posséder certaines caractéristiques. Les qualités à considérer sont les suivantes :

- Le capteur doit pouvoir être crédible en ce sens qu'il doit avoir la capacité de connaître son état. Il doit par exemple savoir si son installation fonctionne correctement.
- Les capteurs intelligents doivent être interopérables. C'est-à-dire que des capteurs de constructeurs différents doivent pouvoir communiquer facilement.

- Les capteurs doivent être interchangeables. C'est-à-dire qu'un fabricant de capteurs peut être remplacé par un autre.
- Les capteurs doivent être compatibles. C'est-à-dire qu'ils peuvent se remplacer facilement par une nouvelle génération de capteur.

Les capteurs biologiques

D'après Tran Minh (1991) et Ichinoise (1990), le biocapteur est un dispositif basé sur un principe chimique. Il permet donc la conversion d'un phénomène ou une propriété biochimique en un signal électrique. Dans le même ordre d'idée, Asch (2006) montre que les capteurs biologiques sont très utilisés en industrie à cause de leur principe chimique.

2.5 Les principales technologies de fabrication des capteurs

2.5.1 Silicium micro-usiné

Les technologies micro-usiné, sont des séries de techniques et procédés qui continuent à s'améliorer depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale.

Pour réaliser les capteurs en silicium micro-usiné, les technologies suivantes sont à considérer :

- La photolithographie consiste à imprimer un motif maître sur un masque. D'après Elwenspoek (2001) et (1998), elle demande des étapes très importantes pour le transfert du masque au substrat. Ces étapes incluent la rotation résistive, la précuissage, l'illumination au masque d'alignement, la postcuissage, et le développement.
- La déposition de film mince et dopage constitue l'une des technologies micro-usiné. Il est impossible de réaliser un capteur uniquement avec du silicium. Nous devons utiliser des matériaux qui sont très peu sensibles à la gravure. Parmi les techniques les plus importantes, nous pouvons considérer la déposition chimique, le dioxyde de silicium, le dopage, l'évaporation, et la pulvérisation.

- La gravure chimique humide est la technique la plus ancienne du silicium micro-usiné. Parmi ces techniques, nous pouvons citer l'isotropie et l'anisotropie.
- Le ‘wafer bounding’ est une technique nécessaire. Elle joue un rôle essentiel au niveau de l'empaquetage.
- La gravure à plasma est composée de plusieurs profils qui permettent de rendre possible cette technique. Parmi ces techniques, nous pouvons citer la méthode du silicium noir, et le mode de gravure anisotrope par plasma.
- La surface micro-usiné est un processus qui permet le développement de microstructure libre de motifs dans un large espace à deux dimensions. Face à cette technique, nous sommes confrontés à deux problèmes :
 1. La pression au niveau des films minces constitue le premier obstacle auquel nous sommes confrontés. Il existe essentiellement deux types de pression. La compression latérale et le gradient de pression au niveau du film.
 2. La réussite du collage n'est pas chose facile. En effet, la gravure peut entraîner le contact entre la couche superficielle et le substrat. La solution est de rendre la structure très raide. Elwenspoek (2001) indique la valeur critique grâce à l'équation suivante.

$$L_{cs} > 1.059 \left\{ \frac{8Ed^2h^3}{\gamma_1(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)} \right\}^{1/4} \quad (2.11)$$

où θ_2 et θ_1 sont les angles de contact du liquide avec le substrat et la microstructure, γ_1 est la tension superficielle du liquide, L_{cs} la longueur critique, d le rayon concave, h le rayon convexe, et E est le module de Young.

2.5.2 Les capteurs à fibre optique

D'après Elwenspoek (2001) et (1998), la fibre optique, peut être considérée comme tous fils en verre ou en plastique très fin ayant la capacité de conduire la lumière. Les fibres optiques possèdent plusieurs avantages qui sont toujours d'actualité.

Le choix de cette famille de capteurs, est inspiré par les avantages suivants :

- Une grande information peut circuler à l'intérieur du capteur presqu'à la vitesse de la lumière.
- Il n'existe pas de perturbations dont les causes proviennent des bruits électromagnétiques. Cette caractéristique permet de garantir un signal de très bonne qualité.
- Il existe des fibres possédant des pertes de transmission négligeables.
- Ils ne génèrent pas des étincelles électriques. Cette qualité a une très grande influence sur le caractère sécurisant de ces fils.

Ce capteur possède des fibres optiques qui permettent la détection ou le transport de l'information.

2.5.3 Les capteurs à couches épaisses

D'après Elwenspoek (2001) et (1998) et Santos (2004), les capteurs à couches épaisses sont encore appelés hybrides et constituent une solution à l'erreur de mesure constatée avec les autres technologies de fabrication. Cette technologie a longtemps été la méthode de fabrication des capteurs de pression. Mais de nos jours, elle est utilisée dans les domaines des capteurs biologiques et chimiques.

Les technologies de fabrication de ces capteurs reposent en général sur :

- Un support de type céramique
- La décomposition de sels en oxyde ayant une réactivité thermique très élevée.
- Un composant de type-résine époxy pour permettre l'amélioration de la sensibilité du capteur. La résine est utilisée pour ses propriétés d'adhérences sur la céramique.

2.5.4 Les MEMS

2.5.4.1 La technologie des MEMS

Le développement des MEMS provient des évolutions technologiques qui sont apparues à partir de la Deuxième Guerre mondiale. L'évolution de la technologie des radars a conduit à

la recherche de nouveaux matériaux tels que le silicium pur. D'après Santos (2004), l'origine des MEMS remonte à Richard P. Feynman (1992). En 1959, ce savant a découvert l'observation de ce qu'il appelle « l'abondance de pièce au fond ». Il conclut alors à la possibilité de miniaturiser des systèmes. Santos montre qu'il n'existe pas d'obstacles à la possibilité de miniaturiser les systèmes. Cet auteur montre que la réduction d'échelle ou miniaturisation a des conséquences non seulement sur la taille des MEMS, la densité, la vitesse, mais également sur la consommation de puissance. D'après Elwenspoek (2001) et Beeby (2004), on appelle MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) ou MST (Micro-Systems technology) un élément comprenant un microsystème.

Par définition, on entend par microsystème, tout élément comprenant :

- Un capteur qui délivre l'information au système.
- Un circuit électrique qui conditionne le signal électrique.
- Un déclencheur qui répond au signal électrique fourni par le circuit.

Les MEMS sont des systèmes qui incluent des domaines très larges comme les capteurs chimiques, les systèmes micro optiques et les systèmes de microanalyse. Les techniques de fabrication des MEMS sont identiques aux procédés de fabrication des circuits intégrés en micro-électronique. Le substrat constitue l'un des matériaux utilisés.

Le silicium est largement utilisé dans l'industrie des circuits intégrés à cause des raisons suivantes :

- Ce substrat est pur, disponible et bon marché.
- Il possède un large éventail de techniques et processus très matures et facilement accessibles.
- Le silicium dispose d'un très bon potentiel de contrôle d'intégration. Depuis quelques années, la technologie de fabrication de la gaufre SOI est applicable aux MEMS. Nous distinguons principalement deux processus de fabrication. La gaufre BESOI constitue le premier processus élaboré. Nous envoyons tout d'abord une grande énergie o^+ au silicium. Le processus se poursuit en faisant subir des températures de 1300 degrés C. Nous réalisons ensuite une étape d'oxydation. Ce processus se poursuit par l'ajout d'une seconde couche de gaufre. Cet ensemble est soumis à une température de 1100

degrés C. L'ajout d'une dernière couche est réalisé pour polir la gaufre. Le deuxième processus s'illustre par la gaufre UNIBOND SOI : ce processus se caractérise par une étape d'oxydation de la gaufre. L'étape suivante est l'envoi d'une grande énergie H^+ . Il se poursuit par l'ajout d'une seconde couche de gaufre et une soumission à de hautes pressions. Cette gaufre supporte une coupe en plan et des températures de 1100 degrés Celsius.

Nous utilisons aussi le quartz. Ce dernier possède une structure comparable à celle du silicium. Ce sont des matériaux piézo-électriques. Il est utilisé pour fabriquer des accéléromètres ou des gyroscopes. Les trois techniques fondamentales développées pour obtenir les MEMS comme le montre Gardner (2001) sont :

- La déposition utilisant les processus d'oxydation, déposition physique, diffusion et implémentation
- La lithographie est de type optique. Elle consiste à réaliser un bombardement d'électrons
- La gravure ou l'etching utilisant une gravure sèche ou humide

Il existe également d'autres techniques applicables aux MEMS et qui ne sont pas spécifiques aux circuits intégrés. Parmi ces techniques, nous pouvons inclure par exemple le ‘wafer bounding’, la déposition d’électron et le procédé LIGA (Terme allemand signifiant : Lithographie, Galvansformung Abformung). La Figure 2.7 montre les processus d’élaboration du LIGA.

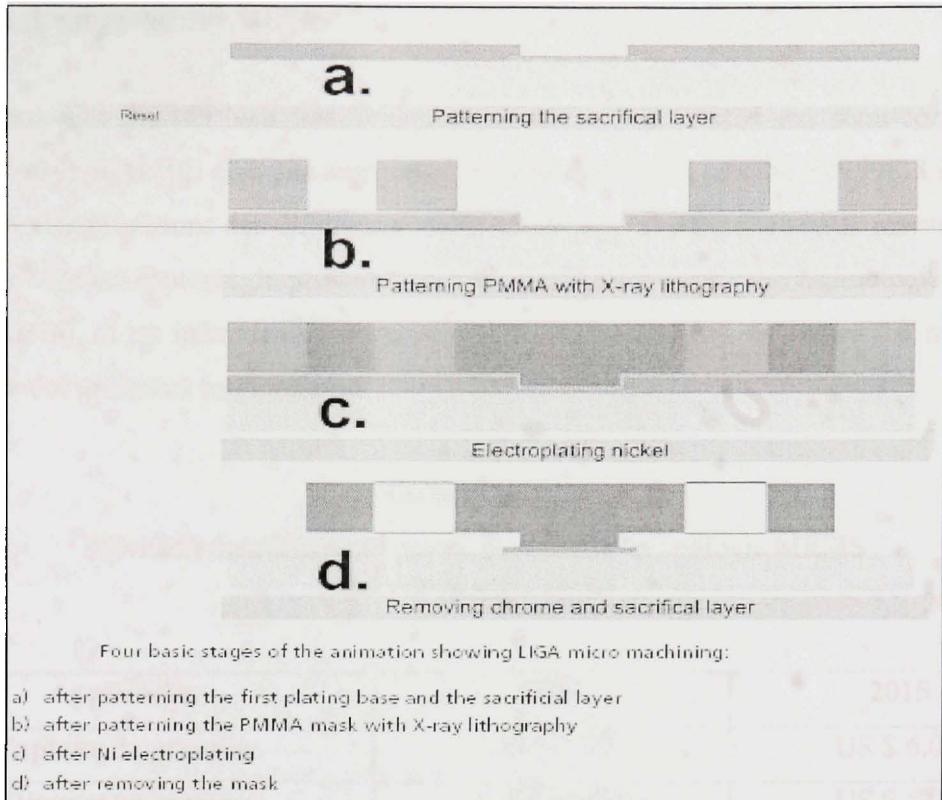


Figure 2.7 Processus LIGA.

(Tiré de pages perso-orange de Michel Hubin, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du site pages perso-orange de Michel Hubin, dans la section. Tendances technologiques huitièmes parties (8/8): mems et microactionneurs. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Comme le montre Pelesko (2003) et Lyshevski (2002), les techniques de fabrication des MEMS font intervenir des notions très complexes comme les équations de Schrödinger et l'équation de la théorie des fonctions d'ondes. Ils font également intervenir des notions de la mécanique des fluides dont le développement ne pourrait pas se réaliser dans le cadre de notre étude.

2.5.4.2 Le marché des MEMS

Les technologies MEMS sont très attractives au niveau du marché des semi-conducteurs. Gabriel (1998) prévoyait déjà une augmentation considérable du marché en 1998. Le Tableau 2.3 indique les prévisions des différentes applications des MEMS. Comme le montre Bryzec (2006), ce sont les capteurs de pression qui sont très utilisés dans cette technologie. D'après Bryzec (2006), et les informations du cabinet d'étude IC Insights, la Figure 2.8 montre les prévisions des analystes économiques.

Tableau 2.3

Prévision des différentes applications de la technologie MEMS
(Tiré de Bryzec, 2006)

Application	2005	2015
Capteur de pression	US \$ 3.0B	US \$ 6.0B
Diagnostic in vitro	US \$ 0.01B	US \$ 5.0B
Lecture/Écriture pour Disque	US \$ 2.0B	US \$ 4.0B
Imprimante	US \$ 2.0B	US \$ 3.5B
Écran optique	US \$ 1.0B	US \$ 3.0B
Gyroscope	US \$ 0.1B	US \$ 2.0B
Lab on a chip	US \$ 0.01B	US \$ 2.0B
Drug delivery systems	US \$ 0.0B	US \$ 1.5B
Capteur d'inertie	US \$ 0.2B	US \$ 1.5B
Capteur chimique	US \$ 0.1B	US \$ 1.0B
Interrupteur Optique	US \$ 0.1B	US \$ 1.0B
Article RF	US \$ 0.1B	US \$ 1.0B
Micro spectromètre	US \$ 0.02B	US \$ 0.4B

Source : Ce Tableau a été tiré de Bryzec, J., et al., *Marvelous MEMS*. Circuits and Devices Magazine, IEEE, 2006. 22(2): p. 8-28.

D'après Bryzec (2006), les circuits intégrés de type MEMS ont généré en 2005 un marché de 8 milliards de dollars. Le cabinet d'étude IC Insights confirme également cette tendance à la hausse des marchés.

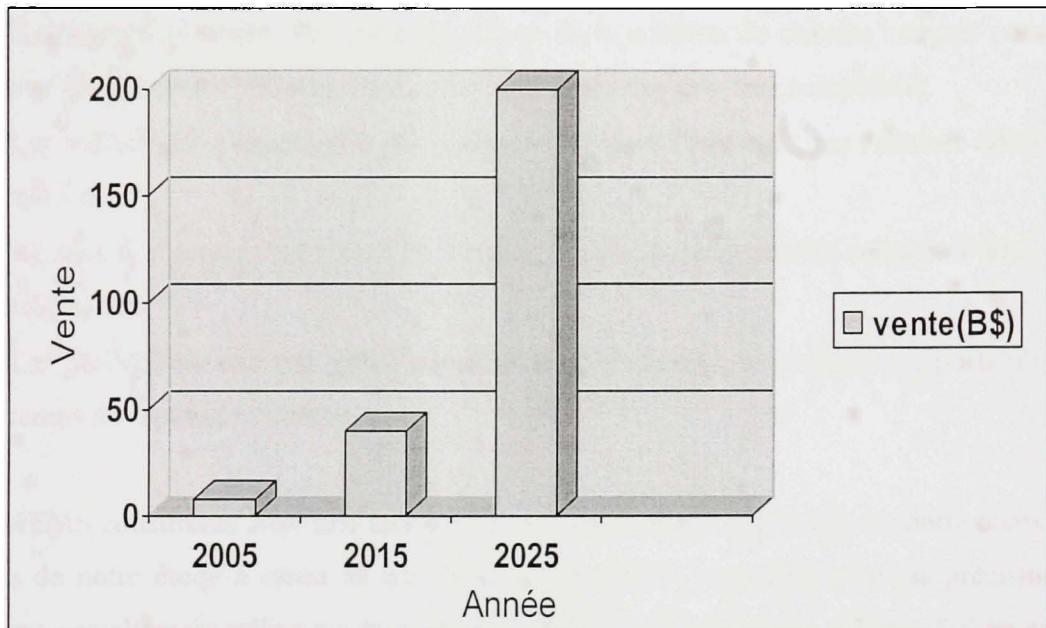


Figure 2.8 Prévision du marché mondial des MEMS.

(Tiré de génération-nt, 2007)

Source : Cette figure a été tirée du site génération-nt, dans la section prévision du marché des MEMS. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

2.5.4.3 Les avantages des MEMS

Il serait impossible de comprendre l'engouement que suscitent les MEMS si nous ne considérons pas l'interprétation des avantages qui découlent de cette nouvelle génération de capteur. D'après Osiander (2006) et Banks (2006), les MEMS possèdent des atouts très importants dans le domaine de l'aérospatial. De nos jours, cette technologie prend une importance considérable dans le domaine de l'électronique.

D'après Bryzec (2006), nous pouvons récapituler les avantages des MEMS comme suit :

- Les MEMS peuvent être utilisés comme ‘packaging’ pour des dispositifs de type nano. Ce dispositif suggère une synergie avec les nanotechnologies. Cette association entraîne une augmentation des budgets accordés dans ce domaine.
- Les techniques de conception des MEMS existent et sont très utilisées dans d’autres domaines.
- Il existe un potentiel très élevé au niveau de la création de circuits intégrés possédant une grande facilité d’intégration, mais également des prix très compétitifs.
- Les MEMS ont d’excellentes propriétés mécaniques à cause de leur structure cristalline très pure.
- Le coût des gaufres est fixe. Cet avantage a pour conséquence la réduction du coût de fabrication.
- Les MEMS ont une très faible consommation d’énergie, une très bonne portabilité, un temps de réponse très élevé.

Les MEMS constituent alors une technologie très importante. Elle constitue notre choix dans le cas de notre étude à cause de son prix, sa portabilité, mais également sa précision. Le système actuellement utilisé sur le moteur de P&WC est volumineux. De plus, il ne permet d’être utilisé que pour les tests en laboratoire. L’intégration des MEMS dans le système d’acquisition de donnée nous permettra d’effectuer les tests en laboratoires et de conserver ces capteurs lors de l’utilisation des avions en vol. Cette flexibilité des MEMS est due à leur portabilité par rapport aux anciens équipements de P&WC.

Ce chapitre a couvert essentiellement les notions de base des capteurs. Nous avons répondu aux questions essentielles concernant les capteurs. La définition du capteur nous a permis de comprendre le rôle essentiel de ce composant dans notre étude. Cette étude s'est poursuivie par un état des lieux des différentes sortes de capteurs. Cette discussion a ensuite indiqué les différents types de capteur en mettant un accent essentiel sur les capteurs de pression et de température. Nous avons ensuite montré les principales technologies des capteurs en précisant ceux des MEMS. Grâce aux caractéristiques des capteurs développées précédemment, il est donc incontestable que les capteurs de types MEMS conviennent parfaitement à l'application qui doit être développée.

Plusieurs techniques existent pour développer les systèmes d'acquisition. Nous devons trouver les équipements nécessaires qui permettent d'effectuer les acquisitions de données. Le chapitre suivant permettra de connaître les différents équipements choisis pour atteindre le but que l'on s'est fixé à savoir : développer un système d'acquisition dans un environnement du moteur PWC67168.

CHAPITRE 3

CHOIX DES ÉQUIPEMENTS ET LEURS CARACTÉRISTIQUES

Tels qu'il a été établi au chapitre précédent, les capteurs de types MEMS constituent de nos jours une part importante sur le marché des capteurs. Ils possèdent des avantages très importants par rapport aux anciennes générations de capteurs grâce à leur production à bas prix. Ce chapitre sert de transition entre les technologies des capteurs et les tests.

Ce chapitre débute par une introduction du matériel et des logiciels. Nous allons ensuite réaliser l'étude du matériel. Cette introspection se fera par une présentation des cartes d'acquisition sur le marché. Nous allons effectuer une sélection de celle qui nous paraît remplir les conditions nécessaires et suffisantes pour une réalisation des tests. La deuxième partie de ce chapitre concernera le logiciel. Un état des lieux des logiciels sur le marché sera réalisé. Nous allons nous attarder sur la description de LabVIEW en parlant des avantages. Ces descriptions nous indiqueront ainsi les qualités qui ont entraîné le choix de ce logiciel pour l'application que nous voulons réaliser. La dernière partie de ce chapitre nous permettra ainsi de conclure sur l'état des lieux au niveau des équipements. Dans cette partie, nous allons discuter des caractéristiques des capteurs de type MEMS qui a été réalisé par l'équipe du laboratoire CONCAVE de CONCORDIA.

3.1 Définition des besoins matériels et logiciels

La chaîne d'acquisition de données est composée des différents éléments qui permettent l'acheminement de donnée vers l'ordinateur.

Comme le montre Gani (2002), la Figure 3.1 résume nos besoins matériels.

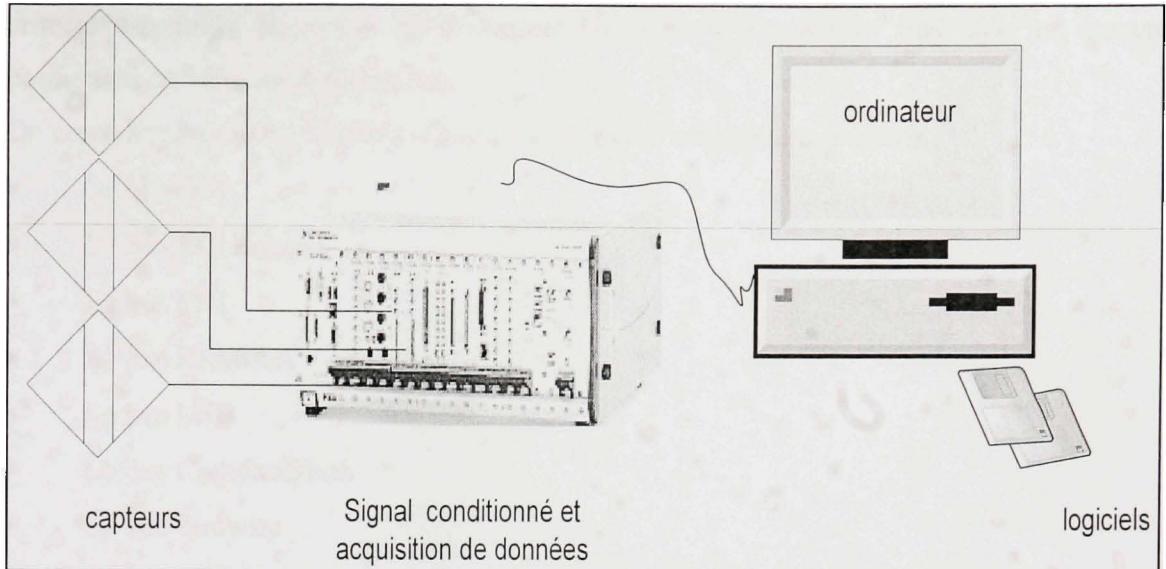


Figure 3.1 *Présentation générale d'une chaîne d'acquisition.*

La carte d'acquisition doit avoir une bonne résolution. De même, cette carte est tenue de répondre aux conditions de sécurité dans le domaine de l'aérospatial. Dans le cas d'un incident pendant lequel un capteur ne fonctionne pas, un autre doit poursuivre le transfert de données au pilote. C'est ainsi que la carte doit posséder au moins quatre canaux pour répondre à cette exigence. Ce nombre est également conforme par rapport aux données que l'on veut obtenir (pression et température). En ce qui concerne le logiciel, il doit être compatible au matériel pour effectuer les opérations en temps réel. Notons aussi que l'on doit réaliser des opérations sur le signal avec ce logiciel si le résultat n'est pas conforme à nos attentes.

3.2 Sélection d'un équipement d'acquisition de signaux

3.2.1 Récapitulation des cartes d'acquisition sur le marché

La société National Instrument du Texas a le monopole sur les cartes d'acquisition de données. Il existe une multitude de cartes d'acquisition. Le type de bus constitue l'un des

critères essentiels. Il permet de distinguer les outils d'acquisition ainsi que les moyens permettant de véhiculer les données.

On considère plusieurs familles utilisant des cartes d'acquisitions à savoir :

- Le bus PCI
- Le bus PCI express
- Le bus PXI
- Le bus PCMCIA
- Le bus USB
- Le bus CompactFlash
- Le bus Firewire
- Le bus ISA

Les cartes utilisant le bus PCI

Par définition le sigle PCI signifie Peripheral Component Interconnect. Il possède une résolution variant selon la carte entre 32 bits et plus de 64 bits. Ce bus permettant d'avoir une vitesse de plusieurs MHz. Il existe une multitude de cartes de type PCI. Le rythme de sortie des cartes sur le marché est très soutenu à cause de l'évolution exponentielle de la microélectronique.

National instrument permet de réaliser la distinction entre les cartes à l'aide des séries qui en général se décomposent comme suit :

- La série B permet d'obtenir des capacités d'acquisitions économiques et fiables. Le Tableau 3.1 montre les différentes cartes existantes sur le marché. Ils constituent la meilleure solution pour des laboratoires et l'automatisation. Cette série est très efficace notamment dans le cas d'un asservissement d'une machine électrique, par exemple. La vitesse de ces cartes est de 200 Kéch/secondes. Ceci constitue donc une vitesse très importante.

Tableau 3.1
Les principales cartes de la série B sur le marché
(Tiré de NI, 2007)

Famille de la série B	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
PCI 6010	16 MC/8DI 200kéch./seconde 16 bits	2 16 bits	6 DI /4 DO TTL
PCI 6013	16 MC/8DI 200kéch./seconde 16 bits	--	8 E/S N TTL
PCI 6014	16 MC/8DI 200kéch./seconde 16 bits	2 10kéch./seconde 16 bits	8 E/S N TTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section cartes de la série B. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

- La série E a été introduite sur le marché dans les années 1995. Elle joue un rôle déterminant en ce qui concerne le standard d'acquisition de donnée. Actuellement, il s'agit d'une série qui commence à perdre de l'importance. Elle entame son déclin par rapport à la série M. Le Tableau 3.2 montre les différentes cartes existantes sur le marché.

Tableau 3.2
Les principales cartes de la série E sur le marché
(Tiré de NI, 2007)

Famille de la série E	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
PCE 6036 E	16MC/8DI@200kéch./seconde@ 16 bits	2 10Kech./s 16 bits	8 E/S N TTL
PCE 6034 E	16 MC/8DI@200k/s @16 bits	--	8 E/S N TTL
PCE 6035 E	16 MC/8DI @200k/s @16 bits	2 10Kech/s 12 bits	8 E/S N TTL
PCE 6052 E	16 MC/8DI. @ 333k/s@ 16 bits.	2 333K/s @16 bits	8 E/S N TTL
PCE 6025 E	16 MC/8DI @200k/s @ 12 bits	2 10K/s 12 bits	32 E/S N TTL
PCE 6024 E	16 MC/8DI @200k/s @12 bits	2 10K/s 12 bits	8 E/S N TTL
PCE 6023 E	16 MC/8DI @200k/s @12 bits	--	8 E/S N TTL
PCE 6033 E	64 MC/32DI @100k/s @16 bits	--	8 E/S N TTL
PCE 6071 E	64 MC/32DI @1.25M/s @ 12 bits	2 1M/s 12 bits	8 E/S N TTL
PCE 6031 E	64 MC/32DI @100K/s @16bits	2 100K/s 16 bits	8 E/S N TTL
PCE 6032 E	16 MC/8DI @100k/s @16bits	--	8 E/S N TTL
PCE 6036 E	16 MC/8DI @20k/s @16 bits	2 20k/s 12 bits	8 E/S N TTL
PCE 6036 E	16 MC/8DI@100k./s@16 bits	2 100k/s 16 bits	8 E/S N TTL
PCE 6036 E	16 MC/8DI @500k./s @12 bits	2 1M/s 12 bits	8 E/S N TTL
PCI-MOI-16E-1	16 MC/8DI @1.25M/s @12 bits	2 1M/s 12 bits	8 E/S N TTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section cartes de la série E. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

On entend par TTL signifie Transistor Transistor Logique.

- La série M comporte des cartes qui déterminent un standard nouveau pour la sécurité, la capacité, la valeur et les performances. Elle constitue une nouvelle génération de cartes d'acquisition. Elle est idéale pour les applications telles que les tests, les contrôles, la conception, et surtout l'enregistrement des données de mesures.
- La série R comprend des cartes utilisant des entrées et sortie reconfigurables RIO. L'une des fonctions réalisées par ces entrées sorties est le traitement de signal embarqué. Le module RIO est composé d'un FPGA. Nous entendons par FPGA un ensemble de matrices programmables. Cette technologie constitue un réseau de logiques programmables. Elle est sans cesse en évolution. Le Tableau 3.3 montre les différentes cartes existantes sur le marché. De plus, elle est moins chère que la technologie des ASIC. La série R est généralement utilisée dans le domaine du contrôle des hautes vitesses, la simulation HIL, le prototypage rapide, mais également le déterministe analogique ou discret.

Tableau 3.3
Les principales cartes de la série R sur le marché
(Tiré de NI, 2007)

Série R	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
PCI-7813 R	--	--	160 E/S N TTL
PCI-7811 R	--	--	160 E/S N TTL
PCI-7830 R	4MC/4DI 200k/s/voie @6bits	4 1Méch/s @16bits	56 E/S N TTL
PCI-7833 R	8MC/8DI 200k/s/voie @16bits	8 1Méch/s @16bits	96 E/S N TTL
PCI-7831 R	8MC/8DI 200k/s/voie @16bits	8 1Méch/s@ 16bits	96 E/S N TTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section cartes de la série R. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

La série S est composée de cartes contenant un convertisseur analogique numérique dédié pour obtenir de grandes performances. Le Tableau 3.4 montre les différentes cartes existantes sur le marché. Cette famille possède beaucoup de fonctions telles que la mémoire, l'échantillonnage simultané, la taille de la mémoire embarquée. Nous utilisons cette famille dans des applications telles que l'analyse transitoire, les mesures par ultrasons, les radars, les sonars, et surtout des applications de 42V pour les automobiles.

Tableau 3.4
Les principales cartes de la série S sur le marché
(Tiré de NI, 2007)

Famille de la série S	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
PCI - 6132	4MC/4 DI 3M/s/voie 14 bits	--	8 E/S@N@TTL
PCI - 6133	8MC/8 DI 3M/s/voie 14 bits	--	8 E/S@N@TTL
PCI - 6123	8MC/8DI 500k/s/voie 16 bits	--	8 E/S@N@TTL
PCI - 6122	4MC/4DI 500k/s/voie 16 bits	--	8 E/S@N@TTL
PCI - 6154	4 DI 250k/s/voie 16 bits	4 250k/s@ 16bits	6DI/4@ DO@TTL
PCI - 6143	8MC/8DI 250k/s/voie 16 bits	--	8 E/S@N@TTL
PCI - 6115	4MC/4DI 10M/s/voie 12 bits	4@4M/s @12bits	8 E/S N@TTL
PCI - 6120	4MC/4DI 1M/s/voie 16 bits	2@4M/@ 16bits	8 E/S N@TTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section cartes de la série S. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Les cartes utilisant le bus PCI Express

Il s'agit d'une technologie très récente. La vitesse initiale de l'horloge des cartes est de 2.5Gb/s. Cette technologie permet d'avoir ainsi une bande passante nominale de 250Mo/s. Cette caractéristique permet ainsi de multiplier par deux à quatre la bande passante du PCI. Ils sont utilisés dans des applications de débit de données et de fréquences d'échantillonnages très élevées. Le Tableau 3.5 montre les différentes cartes existantes sur le marché.

Tableau 3.5

Les principales cartes utilisant le bus PCI Express
(Tiré de NI, 2007)

Famille de la série	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
PCIe-4065	1DI@3000éch/s@22bits	--	--
PCIe-6537	--	--	32E/S N 2,5V, 3,3V
PCIe-6536	--	--	32E/S N 2,5V, 3,3V
PCIe-6259	32MC/16DI@ 1.25M/s @16bits	4 2.86Méch/s@16bits	48E/S N TTL
PCIe-6251	16MC/8DI @1.25M/s @16bits	2 2.86Méch/s@16bits	24E/S N TTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section du bus PCI Express. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Le Firewire

Le Firewire (IEEE 1394 ou encore i Link) a été développé au départ par la compagnie Apple en 1989. Le Tableau 3.6 montre les différentes cartes existantes sur le marché. Il s'agit d'un bus série dont les nouvelles spécifications IEEE 1394b ont des transferts qui dépassent 3.2Gb/s comparativement à l'ancienne génération IEEE 1394a qui possède une vitesse pouvant atteindre 400Mb/s.

Tableau 3.6

Les principales cartes le bus Firewire sur le marché
 (Tiré de NI, 2007)

Fire Wire	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
DaQ Pad-6052 E	16MC/8DI@333K/s @16bits	2 333K/s @16bits	8 E/S N TTL
DaQ Pad-6070 E	16MC/8DI@1.25M/s 12 bits	2 1M/s @12bits	8 E/S N TTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section du bus Firewire. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Le PCMCIA

Le PCMCIA est également appelé PC card. Il s'agit d'une carte d'usage très facile. Elle se retrouve dans beaucoup d'applications telles que l'internet et l'acquisition de données. Ils sont très pratiques pour des applications portables à cause de leurs dimensions. Ils ont des vitesses pouvant aller jusqu'à 20Mb/s. Le Tableau 3.7 montre les différentes cartes existantes sur le marché.

Tableau 3.7

Les principales cartes le bus PCMCIA sur le marché
(Tiré de NI, 2007)

PCMCIA	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
DAQCard-6036 ^E	16MC/8DI@200k/s@16bits	2@1k/s@16bits	8 E/S N TTL
DAQCard-6024 ^E	16MC/8DI@200k/s@12bits	2@1k/s@12bits	8 E/S N TTL
DAQCard-6715	--	8@1M/s@12bits	8 E/S N TTL
DAQCard-6062 ^E	16MC/8DI @500k/s 12bits	2@8.510 ^e 5 éch/s 16bits	8 E/S N TTL
DAQCard-6533	--	--	32E/S N TTL,5V
PCMCIA-4050	1DI 60/s 18 bits	--	--
DAQCard-AO2DC	--	2 @ 12 bits	16 E/S N TTL
DAQCard-DIO-24	--	--	24 E/S N TTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section du bus PCMCIA. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Le compactFlash

L'utilisation pour les faibles facteurs de formes est largement répandue. Nous l'utilisons pour les applications de type PDA ou portable. Le Tableau 3.8 montre les différentes cartes existantes sur le marché. Il constitue l'un des meilleurs choix économiques.

Tableau 3.8

Les principales cartes le bus compactFlash sur le marché
(Tiré de NI, 2007)

CompactFlash	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
CF-6004	4MC 200k/s 14 bits	--	4 E/S N LVTTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section du bus CompactFlash. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

ISA

L'ISA (l'Industry Standard Architecture) est un standard de bus informatique. Le Tableau 3.9 montre les différentes cartes existantes sur le marché.

Tableau 3.9

Les principales cartes le bus ISA sur le marché
(Tiré de NI, 2007)

ISA	Entrée analogique	Sortie analogique	E/S Numérique
AT-MOI-16DE-10	16MC/8DI 100k/s 12bits	2@ 100k/s 12bits	32 E/S N TTL
AT-MOI-16E-10	16MC/8DI 100k/s 12bits	2 @100k/s 12bits	8 E/S N TTL
Lab -PC-1200AI	8MC/4DI 100k/s 12bits	--	24 E/S N TTL
AT-AI-16XE-10	16MC/8DI 100k/s 16bits	--	8 E/S N TTL
Lab-PC-1200	8MC/4DI 100k/s 12bits	2 @12bits	24 E/S N TTL
AT-MOI-16XE-10	16MC/8DI 100k/s 16bits	2@100k/s 16bits	8 E/S N TTL
AT-MOI-16E-1	16MC/8DI 1.25M/s 12bits	2@1M/s 12bits	8 E/S N TTL
AT-MOI-64E-3	64MC/32DI 500k/s 12bits	2@1M/s 12bits	8 E/S N TTL
AT-MOI-16XE-50	16MC/8DI 20k/s 16bits	2@20k/s 12bits	8 E/S N TTL

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section du bus ISA. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

PXI

Ils ont été conçus dès le départ pour permettre un lien entre les systèmes PC de bureau et les systèmes GPIB de pointe et VXI. Ils permettent d'avoir des spécifications de hautes performances. Ils permettent d'augmenter des spécifications telles que la synchronisation, le refroidissement, et les tests d'environnements.

USB

L'Universal Serial Bus est un port série. Les cartes qui se connectent par l'intermédiaire du port USB sont portables. De plus, ils permettent de faire une détection automatique du

matériel. Le Tableau 3.10 montre les différentes vitesses obtenues grâce au port USB. Le Tableau 3.11 représente les caractéristiques générales des types de ports utilisés sur le marché.

Tableau 3.10

Les différentes type de bus USB
(Tiré de Beyond logique, 2007)

Les différents Types de USB	Vitesses
High speed	480Mbits/s
Full Speed	12Mbits/s
Low Speed	1.5Mbits/s

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *Beyond logique* dans la section l'USB en bref, donner un sens au standard USB. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Tableau 3.11

Les caractéristiques générales des bus utilisant les cartes d'acquisition
(Tiré de NI, 2007)

Bus	Débit de transfert	Vitesse d'horloge	Largeur
PCI/PXI express	0,2-3,2 Go/s	2.5GHz	Lignes x1-x16
PCI/PXI	132Mo/s	33MHz	4 Octets
ISA	8Mo/s	8MHz	2 Octets
USB	60Mo/s	N/D	N/D
IEEE(Firewire)	50Mo/s	N/D	N/D
PCMCIA	20Mo/s	10MHz	2 Octets

Source : Ce Tableau a été tiré du site de *National Instrument* dans la section des bus. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Le châssis NI cDAQ-9172 est le meilleur choix parmi les caractéristiques développées comme nous l'expliquerons à la prochaine section.

3.2.2 Description du châssis NIcDAQ 9172

Le compact NIcDAQ 9172 est un châssis qui permet de connecter des cartes de nature différentes. Ce châssis est à bas prix (1,245.00\$ Can). D'une manière générale, notre choix s'est porté sur ce châssis à cause des avantages suivants :

- Vitesse d'acquisition d'un débit maximal de 3.2 Méch/s
- Utilisation du courant alternatif et présence de connexion USB.
- Installation et configuration 'Plug-and-Play'
- Modules détectables et échangeables d'entées sorties auto de types série C
- Connexion de type USB 'high speed' au PC.

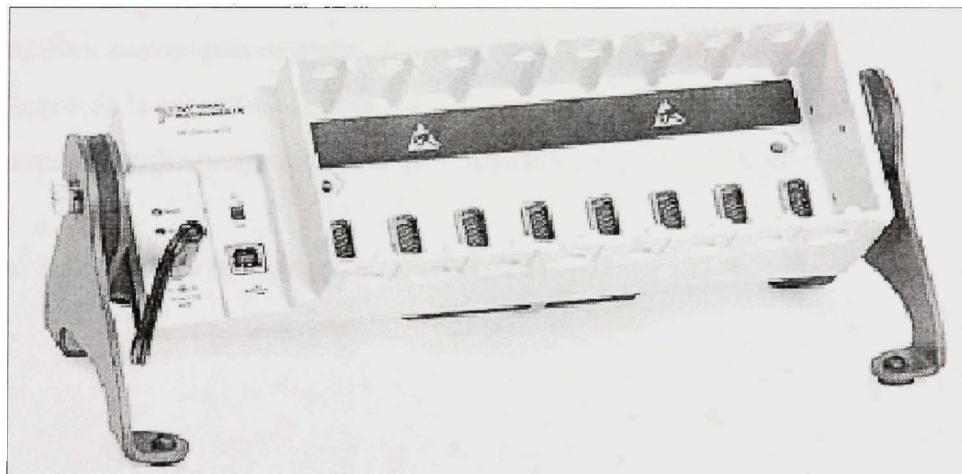


Figure 3.2 Présentation du châssis NIcDAQ-9172.

(Tiré de NI, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du site de *National Instrument* dans la section du châssis NIcDAQ-9172. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

Comme l'indique la section précédente, ce châssis possède un débit de transfert très important. Il répond par conséquent à certains objectifs que nous avons fixés tels que le

temps réel et la configuration ‘plug-and-play’. La Figure 3.2 montre la présentation du module NIcDAQ9172. Il existe donc plusieurs modules d’entrées sorties enfichables sur ce châssis. L’annexe I montre les différents modules enfichables sur ce châssis. Par rapport à toutes ces caractéristiques, nous avons choisi la carte NI 9205.

3.2.3 La carte NI9205

La carte NI9205 est facilement enfichable sur le châssis NIcDAQ-9172. Il est également protégé contre les surtensions et très bien isolé. Cette carte est à bas prix (935.00 \$CAN). D’une manière générale, notre choix s’est porté sur ce châssis à cause des avantages suivants :

- Une résolution de 16 bits et une fréquence d’échantillonnage totale de 250kéch/s
- Une température de fonctionnement de -40 à 70 °C
- 32 entrées analogiques asymétriques (c'est-à-dire 16 différentielles)
- Présence de la connexion D-Sub
- Gamme d’entrées programmables de +/-200 mV, +/-1 V, +/-5V et +/-10 V

La Figure 3.3 montre le module enfichable NI 9205.

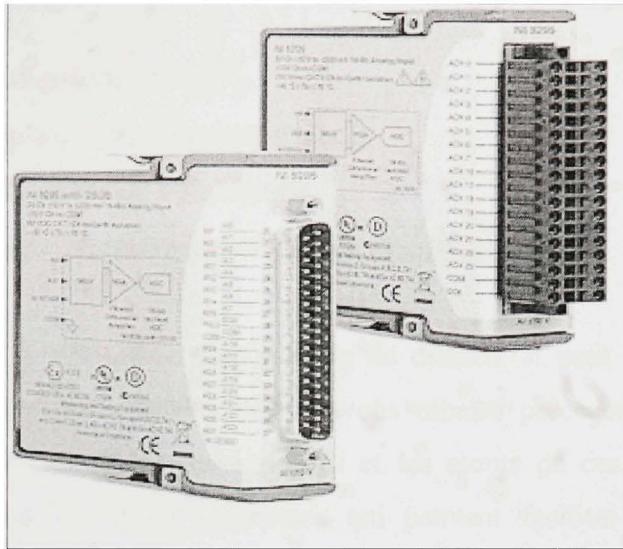


Figure 3.3 Présentation du module NI 9205.

(Tiré de NI, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du site de *National Instrument* dans la section du *module NI-9205*. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

3.3 Récapitulation des logiciels d'acquisition de données

3.3.1 Présentation de Matlab

Matlab est un langage de niveau technique élevé. Il permet la résolution des problèmes de calcul plus rapidement que les logiciels tels que C, C++ et Fortran. Il peut fonctionner dans un environnement interactif pour le développement d'algorithme, le calcul numérique, la visualisation, et l'analyse de données. C'est dans cette optique que Matlab comporte une boîte à outils entièrement dédiée à l'acquisition de donnée. Matlab permet de configurer des adaptateurs fournis par différentes compagnies dans le domaine de l'acquisition de donnée. Parmi ces adaptateurs qui servent d'interfaces, nous distinguons les familles suivantes :

- Advantech
- Carte à son

- Port parallèle
- Cartes de National instrument (NI)
- Carte de Mesurement computing corp ('mcc')
- Cartes de Keithley hardware ('Keithley')
- Cartes de HP/Agilent Technologies/VXITech (hpe1432)

Matlab permet donc la réalisation d'acquisition de donnée. Il peut être compatible avec plusieurs cartes d'acquisition comme nous l'avons montré précédemment. Mais elle ne permet pas l'utilisation de toutes les capacités et les atouts de ces adaptateurs. Elle ne possède pas toutes les interfaces graphiques qui peuvent faciliter la réalisation d'une plateforme d'acquisition de donnée.

3.3.2 Présentation de LabVIEW

LabVIEW est également appelé Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench. Ce logiciel est conçu par la compagnie National Instrument. D'après Mihura (2001), Travis (2002) et (2007), et Johnson (1997), LabVIEW est un logiciel graphique. Il permet de diminuer le temps de programmation parce qu'il possède beaucoup d'interfaces graphiques contrairement à d'autres logiciels. Il contient des applications spécifiques et des librairies de code pour de l'acquisition de données (DAQ). LabVIEW est un logiciel très portable. Il est compatible avec les systèmes d'exploitation. Une plateforme sur Windows peut être implémentée sur Linux. La programmation de LabVIEW consiste en un ou plusieurs VIs (Virtual Instruments). Un VI est un programme, comme le montre Travis (2007). D'une manière générale, un VI est composé de trois parties :

- Un front panel est une interface interactive du VI. Il contient des graphes, des jauge, des boutons booléens et beaucoup d'autres commandes. La Figure 3.4 montre la palette de commandes de la face avant.

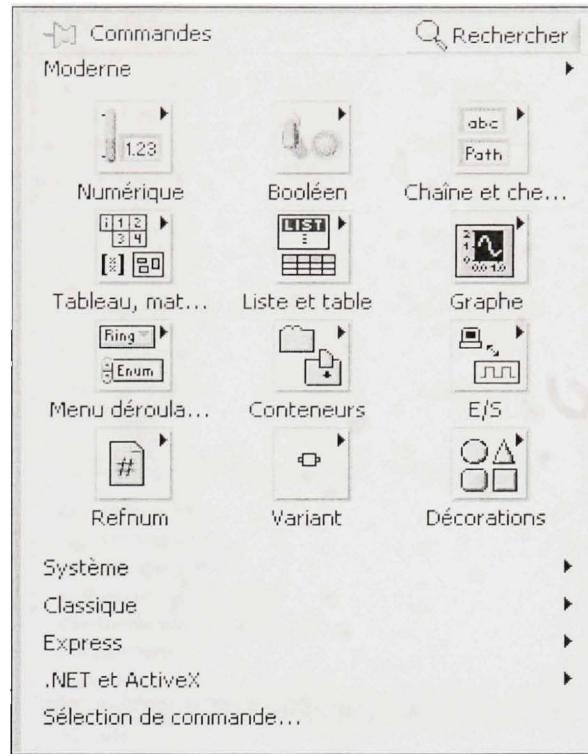


Figure 3.4 Palette de commandes de la face avant.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section de la palette de commandes de la face avant. Le logiciel est de la version 8.0.

- Un bloc de diagramme est le code source du VI. Il est composé du programme exécutable. Il est constitué des différentes interfaces qui permettent la réalisation de la logique du programme. La Figure 3.5 montre la présentation de la palette de commande du bloc de diagramme.

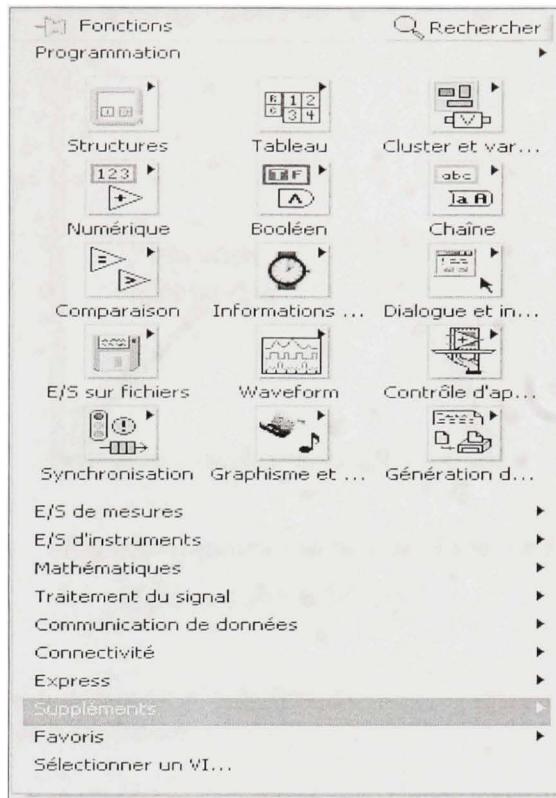


Figure 3.5 Présentation de la Palette de commande du bloc de diagramme.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section de la palette de commandes du bloc de diagramme. Le logiciel est de la version 8.0.

Une icône est un objet qui permet de construire une plateforme. Elle est composée d'une série de logique qui lui permet de réaliser la fonction pour laquelle elle a été conçue. La Figure 3.6 indique la représentation de la boucle While en langage G (graphique). Le Tableau 3.12 montre les différents conventions et termes utilisés en LabVIEW.

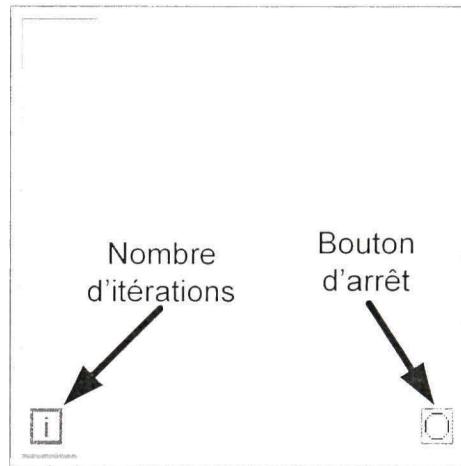


Figure 3.6 Représentation de la boucle While en langage G.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section de la boucle while. Le logiciel est de la version 8.0.

Tableau 3.12

Termes et convention équivalentes dans LabVIEW
(Tiré de Travis, 2007)

Catégorie	Équivalent en langage
VI	Programme
Fonction	Fonction ou méthode
Sub VI	Subroutine, sous-programme, Objet
Front panel	Interface utilisateur
Block diagram	Code de programme
G	C, Java, C++, Pascal, Basic..etc.

Source: Ce Tableau a été tiré de Travis, J. and J. Kring, *LabVIEW for everyone : graphical programming made easy and fun*. 3rd ed. 2007, Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. xli, 981.

LabVIEW est le logiciel qui a été utilisé dans le cas de cette étude pour la création de la plateforme. Notre choix s'est porté sur ce logiciel à cause de sa compatibilité avec notre carte d'acquisition NI9205. D'autres avantages qui ont été stipulés précédemment, justifient ce choix par rapport à Matlab. La version LabVIEW 8.2 est la plus récente. La version 8.0 est celle qui a été utilisée dans le cas de notre étude. Elle est moins complète que la version 8.2. Dans le cas de notre étude, elle constitue une version suffisante et moins coûteuse.

3.4 Spécifications des capteurs utilisés dans le projet

Les spécifications des MEMS ont été tirées de la fiche technique en ANNEXE II. Deux générations de PCB ont été développées dans le cas de cette étude par le Laboratoire CONCAVE. Les PCB sont composés de quatre capteurs (deux capteurs de température et deux capteurs de pression). Comme il a été précisé dans le chapitre précédent, le capteur de pression est constitué d'un transducteur et d'un circuit électrique. Le transducteur est composé d'une membrane dont les vibrations déclenchent un signal électrique. Les ANNEXES II et III indiquent la fiche technique des capteurs de pression.

Le capteur de température est essentiellement composé d'une résistance. Il a la capacité d'augmenter lorsque la température est croissante. L'ANNEXE IV indique la fiche technique du capteur de température. Il possède les caractéristiques suivantes :

- Un coefficient de température positif
- Un temps de réponse très rapide
- Un temps de stabilité très élevé
- Une sortie linéaire
- Une plage de température de -50 à +150 degrés.
- Une résistance à vide ou R₂₅ de 1Kohm.
- Une tolérance de la résistance R₂₅ de $\pm 1\text{ v}$
- Une polarité indépendante à cause de la résistance symétrique.
- Une grande fiabilité qui est due à la construction du capteur à l'aide du silicium.

Le choix des équipements est essentiel à l'acquisition de donnée. Dans ce chapitre, nous avons réalisé une présentation sommaire d'un système d'acquisition. Tout système d'acquisition nécessite tout d'abord des composants matériels. C'est ainsi qu'un état des lieux des cartes d'acquisition et des châssis nous ont permis de réaliser notre choix. La carte NI9205 et le châssis NIcDAQ9172 constituent à notre avis les meilleures options pour la réalisation de nos objectifs. La deuxième étape fut la présentation des différents logiciels d'acquisition de données. Pour certaines raisons qui ont été stipulées, notre choix s'est porté sur LabVIEW. Ce logiciel est compatible avec la carte d'acquisition NI9205. Il existe également d'autres compagnies de carte d'acquisitions. L'ANNEXE VIII montre un exemple de carte d'acquisition. La dernière étape s'est focalisée essentiellement sur la sélection des capteurs. Grâce à leurs formidables caractéristiques, ces capteurs pourront accomplir les exigences de Pratt and Whitney Canada. Le choix des équipements étant réalisé, nous pouvons ainsi avoir la chaîne d'acquisition complète et compatible à l'environnement du moteur. On peut se poser les questions suivantes. Comment peut-on réaliser la prise en main des cartes d'acquisition? Peut-on dire que la chaîne d'acquisition fonctionne correctement lors des essais en laboratoire? C'est à ces questions que nous essayerons de répondre au chapitre suivant.

CHAPITRE 4

TESTS PRÉLIMINAIRES EN LABORATOIRE

Comme il a été démontré dans les chapitres précédents, une chaîne d'acquisition nécessite plusieurs composants matériels et logiciels pour sa réalisation. C'est la juxtaposition de ces composants en respectant une logique semblable à celle des sens de l'homme qui forme la chaîne d'acquisition. Les tests en entreprise ne sont pas indéfiniment réalisables, car ils sont jugés trop couteux. Il fallait donc être certain de la validité de notre plateforme avant d'effectuer les tests chez Pratt and Whitney Canada. C'est dans cette optique que les tests préliminaires ont été réalisés. Ainsi, dans une première étape, nous allons présenter les différentes étapes de configuration de la carte d'acquisition. Cette étape est essentielle, car elle constitue la prise en main de la carte d'acquisition. Elle a pour objectif de connaître la meilleure configuration nécessaire pour les tests en laboratoire. La deuxième étape consistera à décrire l'interface usagée. Cela nous permettra de configurer les différentes étapes des blocs de construction de la plate forme d'acquisition. De même, elle permettra d'exposer les différentes options de plateforme d'acquisition de donnée. Ce chapitre se termine par la présentation des résultats des tests en laboratoire. Les résultats de ces tests se fixent pour objectif de valider notre prototype pour les tests chez Pratt and Whitney Canada. La réalisation de ces tests nous indiquera ainsi les directions à suivre dans le but de faire évoluer le projet.

4.1 Configuration de la carte d'acquisition

La configuration de la carte d'acquisition s'exécute grâce au Data acquisition assistant (DAQ assistant). Cet assistant permet l'édition et le lancement d'une tâche d'acquisition. La Figure 4.1 indique l'icône du DAQ assistant.



Figure 4.1 Icône du DAQ assistant.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section du DAQ assistant. Le logiciel est de la version 8.0.

La configuration du DAQ nécessite la connaissance du nombre de voies virtuelles que l'on veut utiliser. Ces voies peuvent être transformées et même testées. Nous pouvons donc les comparer à des appareils de mesure. Il faut ensuite configurer les tensions d'entrée, car tout appareil de mesure a pour rôle de quantifier une tension. Cette tension se configure à l'aide de la gamme du signal d'entrée. La carte qui a été soumise à notre étude permet d'avoir à notre disposition trois options de configuration des unités. Les unités sont les suivantes :

- Personnalisation
- TEDS
- Volts

La configuration du terminal est nécessaire, car elle permet la connaissance du mode de mesure de cette tension par rapport à la terre. C'est ainsi qu'il existe plusieurs options de configuration telles que :

- Le mode différentiel permet de connecter les deux bornes du capteur aux voies virtuelles du DAQ. La Figure 4.2 montre la configuration du mode différentielle

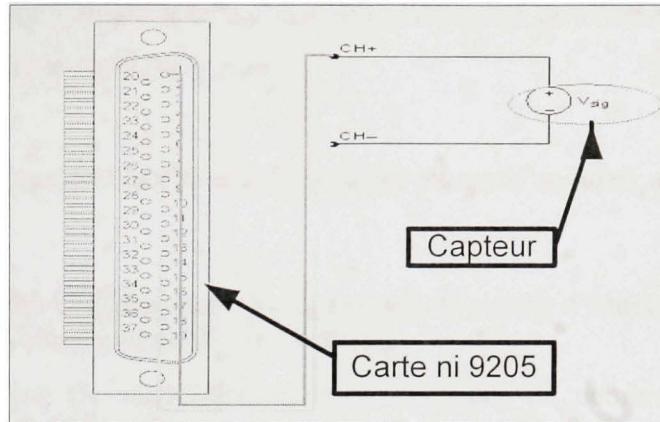


Figure 4.2 Configuration en mode différentielle.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section de la configuration du DAQ assistant. Le logiciel est de la version 8.0.

- RSE (Ground-Referenced Single-Ended) diffère du mode différentiel, car les mesures sont faites par rapport à la terre. L'une des voies virtuelles est donc mise à la terre.
- NRSE (Nonreferenced Single-Ended) diffère du mode RSE, car les mesures sont faites par rapport à AISENSE (Analog Input SENSE).
- Le mode pseudo différentiel diffère du NRSE, car les entrées de la voie physique ont des références par rapport à la masse du système de mesure. Cette configuration se réalise par l'intermédiaire d'impédances différentes. Cette configuration du terminal mesure alors la différence entre les entrées.
- Le mode « Laisser le DAQ choisir » permet de sélectionner les configurations du terminal par rapport aux voies physiques à utiliser. Si nous prenons une voie physique qui supporte le mode différentiel, NI-DAQ sélectionne le mode différentiel. Dans le cas contraire, NI-DAQ sélectionne NRSE. Dans la majorité des cas, cette option n'est pas sélectionnée. Lorsque nous configurons une tâche, l'Assistant DAQ sélectionne automatiquement la valeur de Configuration du terminal.

Il faut ensuite préciser le mode d'échantillonnage. C'est ainsi qu'il existe plusieurs modes de configuration. Ces modes sont les suivants :

- La configuration (1 échantillon sur demande) permet d'acquérir un échantillon avec la tâche.
- La configuration (1 échantillon Horloge matériel) permet d'acquérir un échantillon sur un front de l'horloge matérielle avec la tâche.
- La configuration (N échantillon) permet d'acquérir un nombre fini d'échantillons, défini par Échantillons à lire.
- La configuration (en continu) permet d'acquérir des échantillons jusqu'à ce qu'elle soit arrêtée.

L'échantillonnage peut se réaliser aussi par déclenchement d'une acquisition. Dans le cas de notre étude, nous avons utilisé la configuration volt, différentielle, N échantillons. Nous justifions ces choix parce que les signaux des capteurs de températures et de pressions fournissent à leur sortie des tensions différentielles. La Figure 4.3 montre ces configurations que nous avons effectuées sur le DAQ.

Nous avons choisi une fréquence d'échantillonnage maximale de 250kéch/s ce qui correspond à une bande passante maximale de 125kHz selon le théorème de Shannon.

Ainsi, dans le cas de cette application avec notre carte d'acquisition, on obtient :

$$F_M < F_e \max / 2 = 125\text{kHz} \quad (4.1)$$

Si le nombre de voies correspondant au nombre de capteurs est égal à 8 ($N_{voies} = 8$), alors la fréquence d'échantillonnage disponible par capteur sera :

$$F_e \text{ par voie} = F_e \max / N_{voies} = 31.25\text{kHz} \quad (4.2)$$

Si le nombre de voies est égal à 6, cette fréquence d'échantillonnage disponible pour chaque capteur sera plutôt de :

$$F_e \text{ par voie} = 41.67 \text{ kHz} \quad (4.3)$$

En résumé, le nombre d'échantillons maximal que la carte d'acquisition peut traiter est de 250000 échantillons.

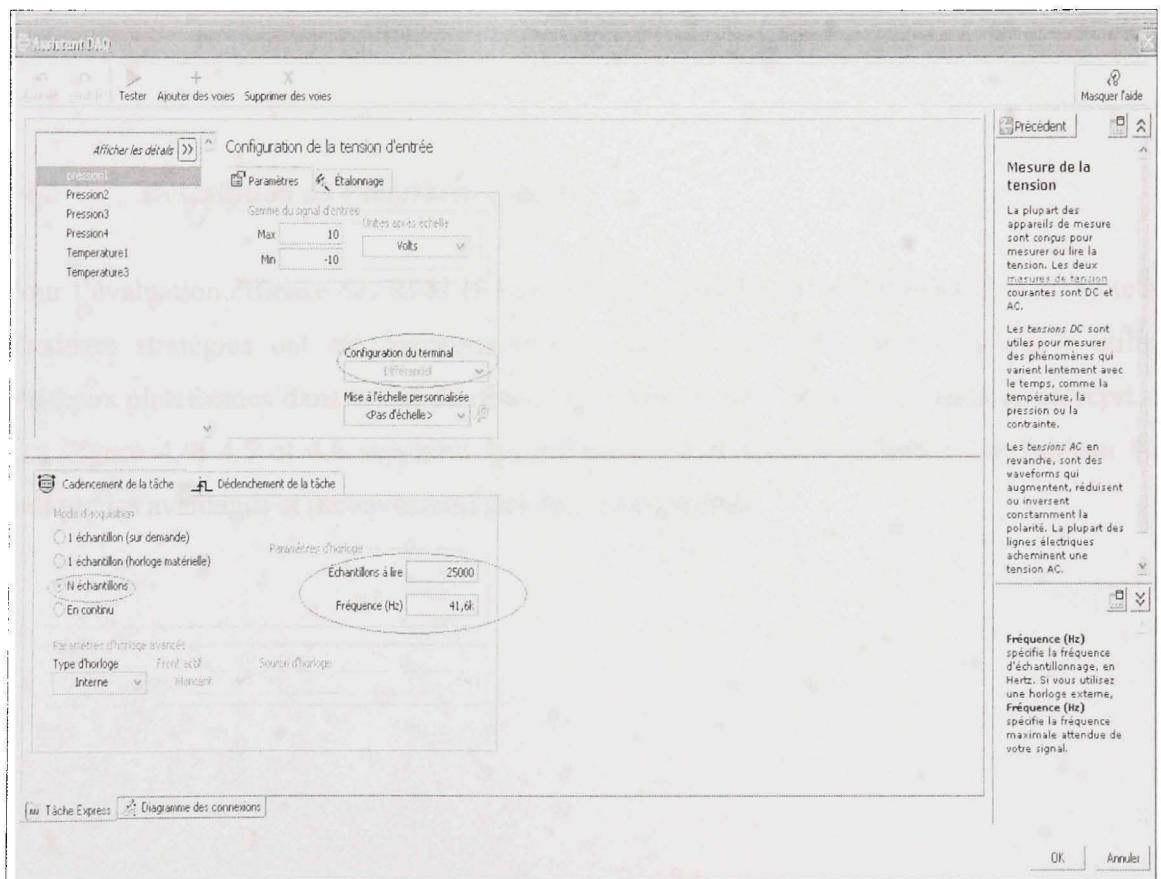


Figure 4.3 Présentation des configurations effectuées sur le DAQ.
(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section de la configuration du DAQ assistant. Le logiciel est de la version 8.0.

Si le nombre de voies correspondant au nombre de capteurs est égal à 16 ($N_{voies} = 16$), alors la fréquence d'échantillonnage disponible par capteur sera :

$$F_e \text{ par voie} = 15.625 \text{ kHz} \quad (4.4)$$

L'utilisation de toutes les entrées enfichables du châssis correspond au nombre de capteurs est égal à 128 ($N_{voies} = 128$). La fréquence d'échantillonnage disponible par capteur sera :

$$F_e \text{ par voie} = 15.625 \text{ kHz} \quad (4.5)$$

4.2 Description de l'interface usagée

Pour l'évaluation efficace des RPM (Révolutions Par Minute) et les températures du moteur, plusieurs stratégies ont été expérimentées en laboratoire. Nous avons conçu et utilisé plusieurs plateformes dans le but de choisir la meilleure pour réaliser les tests en entreprise. Les Figures 4.4, 4.5 et 4.6 montrent les différentes plateformes réalisées. Le Tableau 4.1 indique les avantages et inconvénients des deux plateformes.

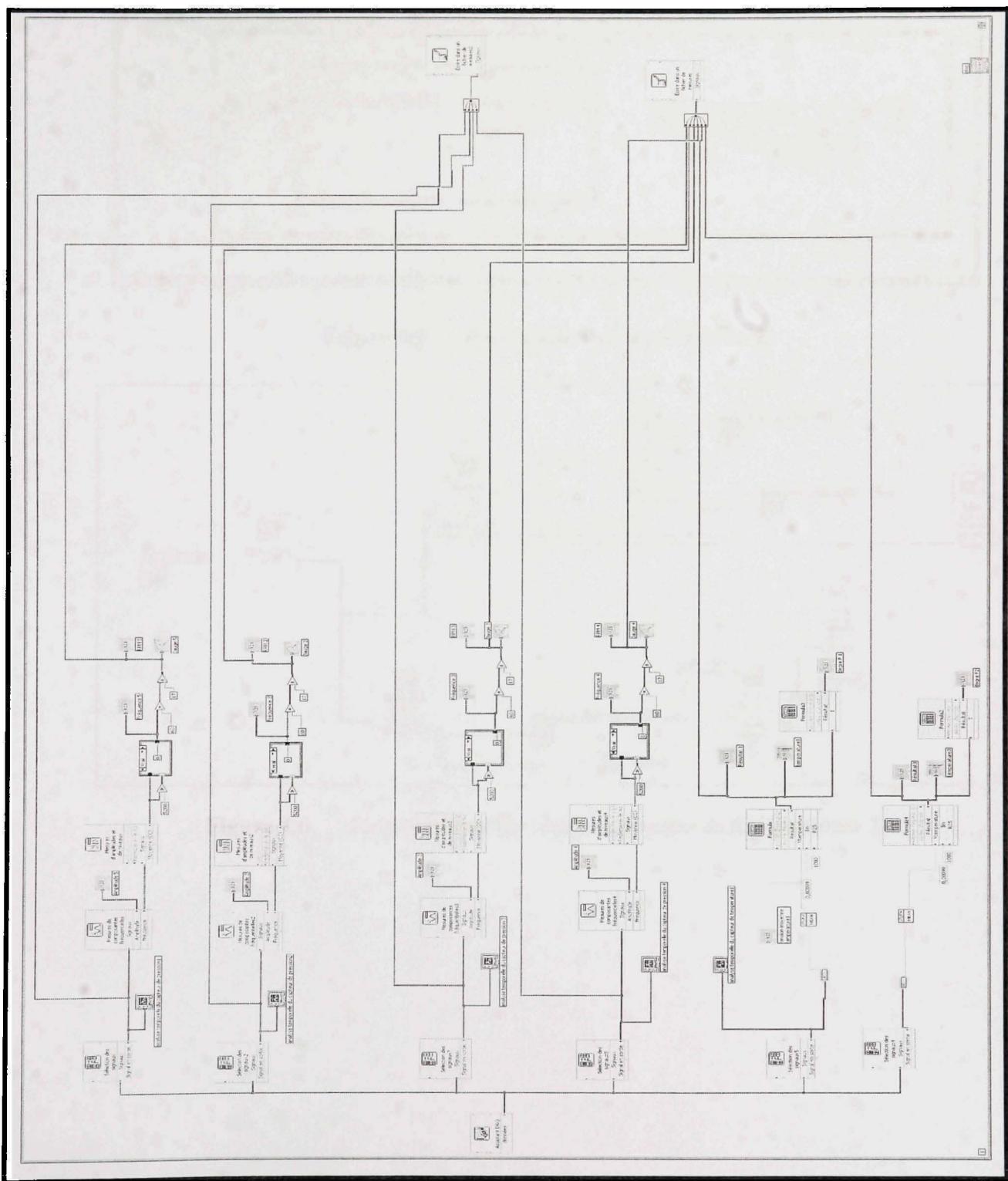


Figure 4.4 Présentation de la plateforme 1.

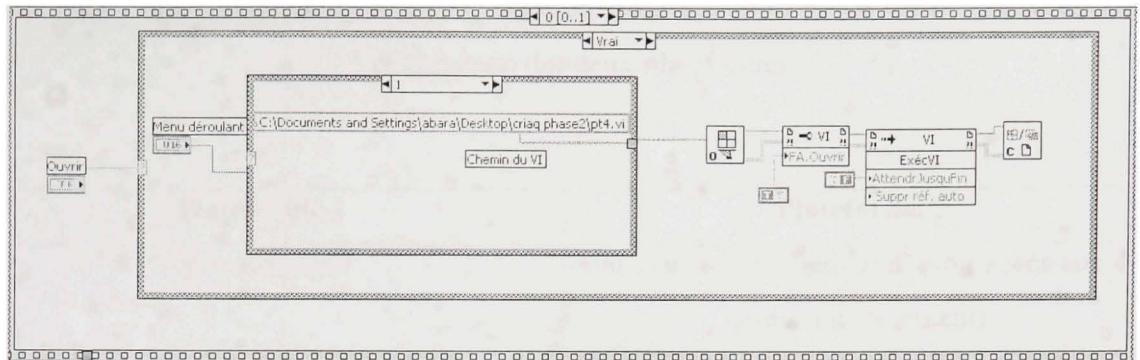


Figure 4.5 Présentation de la plateforme2.

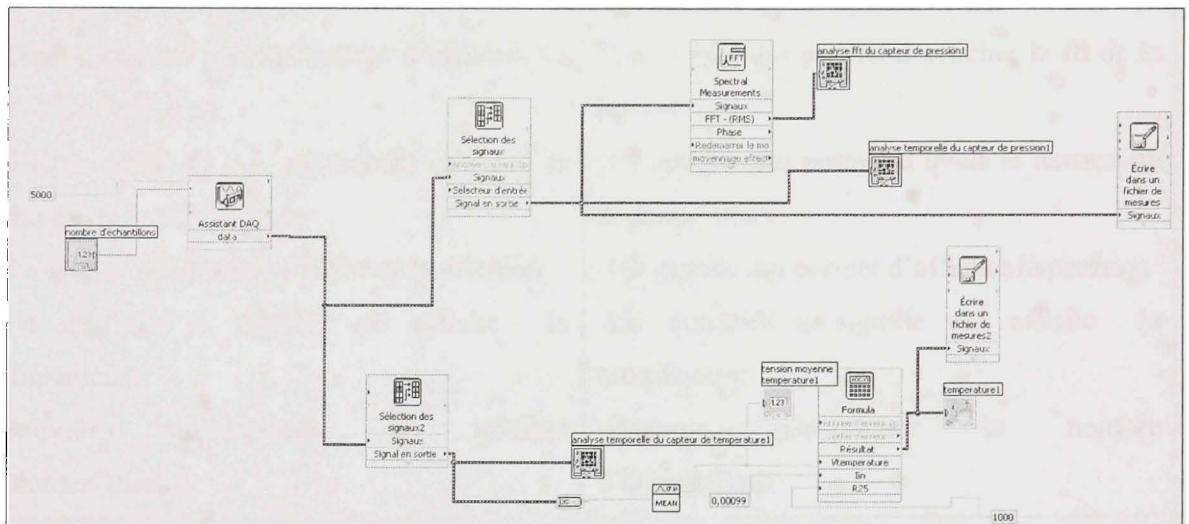


Figure 4.6 Présentation d'un sous programme de la plateforme 2.

Tableau 4.1
Comparaison des deux plateformes

Plateforme 1	Plateforme 2
un vi principal	un vi principal (permet d'avoir accès aux 4 sous vi directement)
Un temps de rafraîchissement beaucoup plus élevé	un temps de rafraîchissement très court pour obtenir une réponse rapide
<p>Le vi principale comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Quatre graphes qui permettent d'afficher les FFT des pressions. -Quatre graphes qui permettent d'avoir la tension de la température -Un graphe qui permet d'afficher la pression -Un quadrant à aiguille qui affiche la température. <p>-Pouvoir sélectionner le nombre d'échantillons</p>	<p>Chaque sous vi comprend :</p> <ul style="list-style-type: none"> -Un graphe qui permet d'afficher la fft de la pression -Un graphe qui permet d'avoir la tension de la température -Un graphe qui permet d'afficher la pression -Un quadrant à aiguille qui affiche la température. <p>-Pouvoir sélectionner le nombre d'échantillons</p>
Cela permet d'avoir 8 graphes simultanément	Cela permet d'avoir 2 graphes simultanément (un graphe de pression et un graphe de température).
Les enregistrements des 4 pressions et 4 températures sont simultanés	Les enregistrements d'une pression et d'une température simultanément.
La fréquence d'échantillonnage est inférieure ou égale à 31.25 kech/s	La fréquence d'échantillonnage est inférieure ou égale à 250kech/s.

4.2.1 La sélection des signaux

Les Figure 4.7 et Figure 4.8 montrent respectivement l'icône de sélection des signaux ainsi que leur configuration. Cette icône permet de sélectionner un signal choisi parmi plusieurs signaux en entrée.



Figure 4.7 Icône de la sélection des signaux.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section de la sélection des signaux. Le logiciel est de la version 8.0.

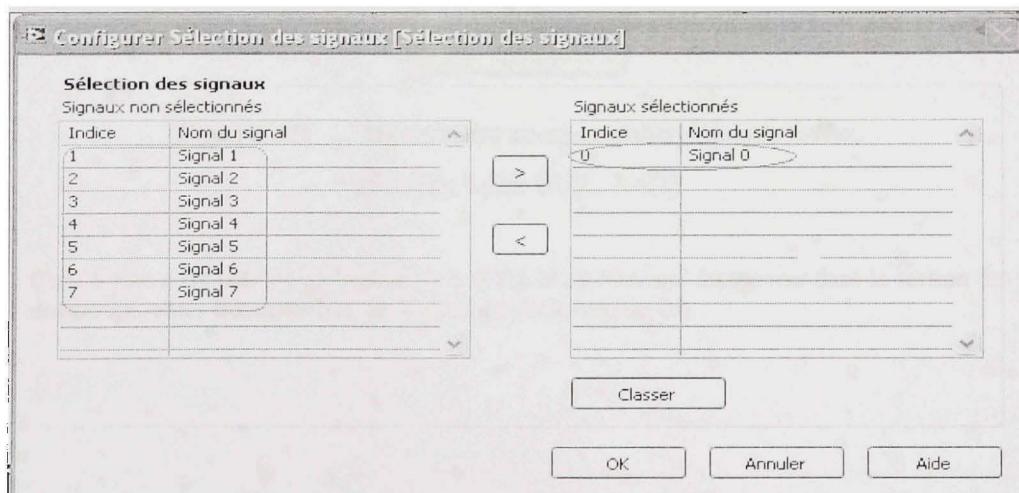


Figure 4.8 Configuration de la sélection des signaux.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section de la sélection des signaux. Le logiciel est de la version 8.0.

4.2.2 Mesure des composantes fréquentielles

La mesure des composantes fréquentielles permet d'obtenir des informations sur un signal. Nous utilisons donc un signal en entrée. Les Figure 4.9 et Figure 4.10 montrent l'icône et la configuration de la mesure des composantes fréquentielles. Nous obtenons à la sortie les informations suivantes :

- La fréquence du signal
- L'amplitude du signal
- La phase.

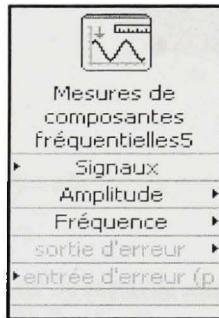


Figure 4.9 Mesure des composantes fréquentielles.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section des mesures des composantes fréquentielles. Le logiciel est de la version 8.0.

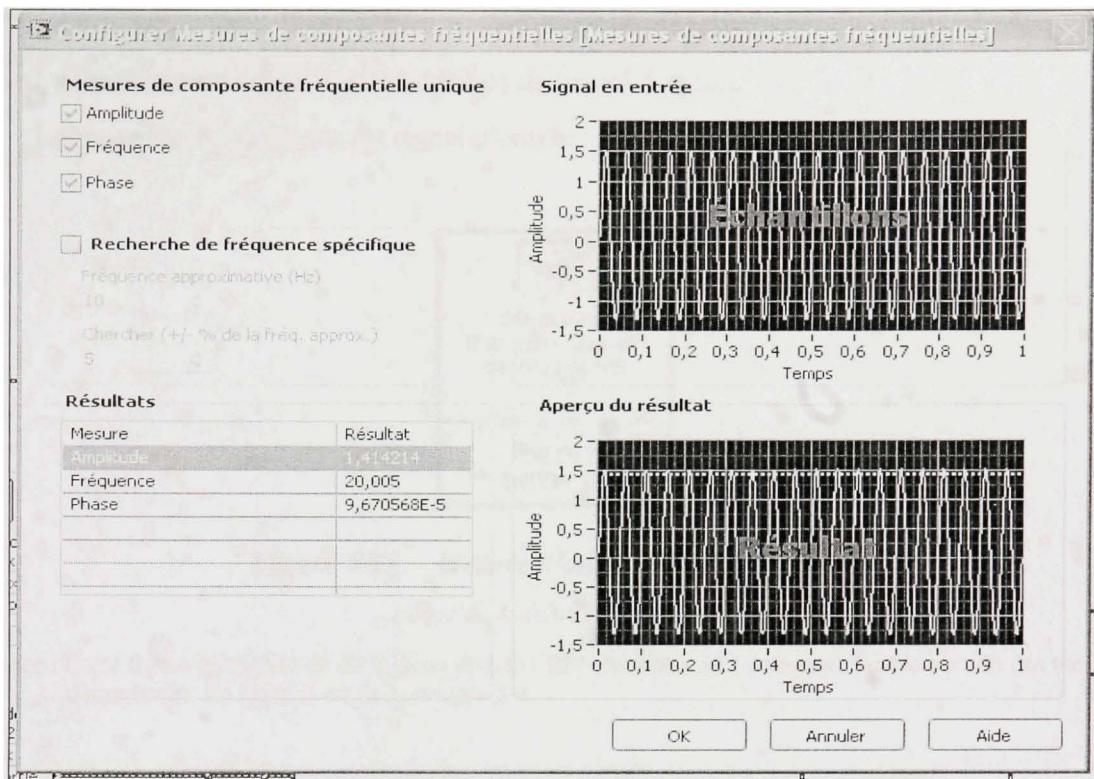


Figure 4.10 Configuration de la mesure des composantes fréquentielles.
(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section des mesures des composantes fréquentielles. Le logiciel est de la version 8.0.

Mesure d'amplitude de niveau

La mesure d'amplitude de niveau permet d'obtenir des informations sur les composantes d'un signal. Les Figure 4.11 et Figure 4.12 montrent respectivement l'icône représentant la mesure d'amplitude de niveau et les configurations effectuées. Ces informations peuvent être :

- La moyenne quadratique RMS
- La mesure CC du signal
- Le pic le plus positif du signal
- Le pic le plus négatif du signal

- La différence entre le pic le plus positif et le plus négatif
- La moyenne du signal sur une période du signal d'entrée
- La moyenne quadratique du signal d'entrée

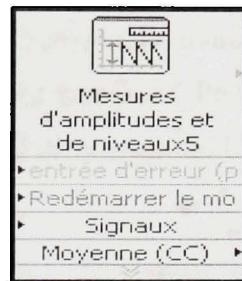


Figure 4.11 Mesure d'amplitude et de niveau.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section des mesures d'amplitude. Le logiciel est de la version 8.0.

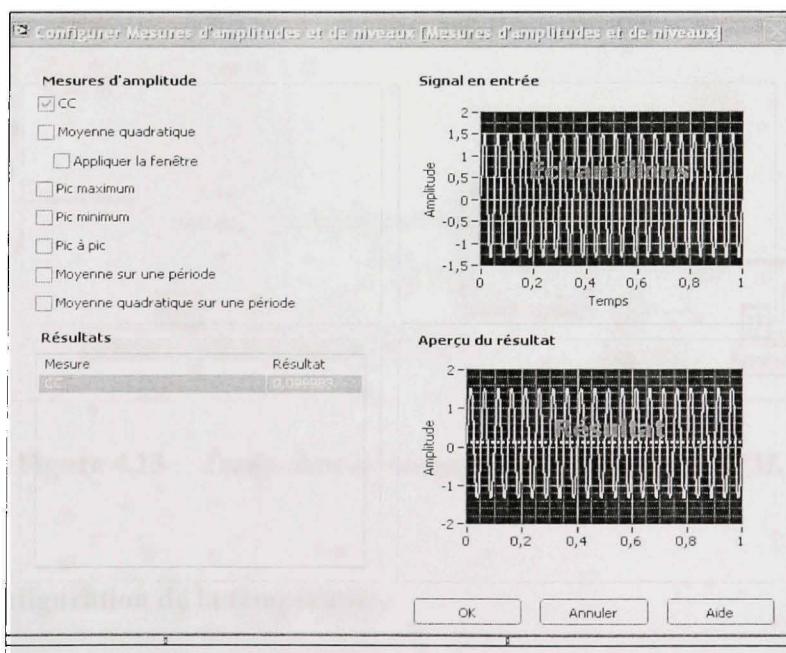


Figure 4.12 Configuration des mesures d'amplitude et de niveau.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section des mesures d'amplitude. Le logiciel est de la version 8.0.

4.2.3 Calcul du nombre de RPM

Le RPM (la révolution par minute) est une unité désignant la vitesse de rotation. Dans le cas de notre étude, cette information nous est nécessaire, car elle nous permet de connaître la vitesse du moteur. La Figure 4.13 indique la traduction de cette équation en langage LabVIEW. Le langage G est le langage graphique. Pour cela, nous avons à notre disposition les informations sur la forme du signal de la pression. Le calcul du nombre de RPM se réalise par la formule suivante :

$$RPM = \frac{\text{fréquence} * 60}{N_{\text{pales}}} \quad (4.6)$$

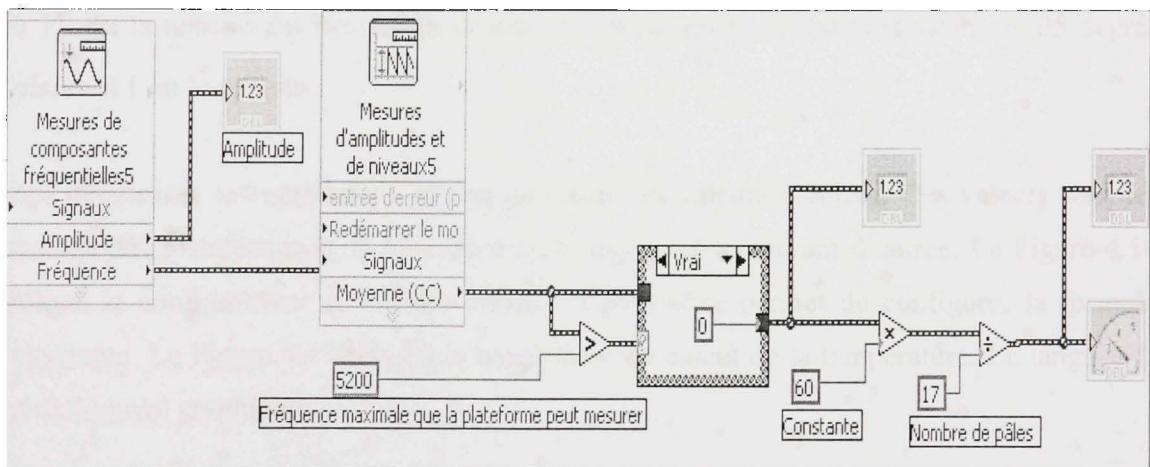


Figure 4.13 Traduction en langage G du calcul du RPM.

4.2.4 Configuration de la température

La réalisation de la plateforme nécessite la connaissance du paramètre de la température. Cette information est nécessaire dans le cas d'un moteur d'avion défectueux. Pour simplifier le calcul de la température, nous changeons les données dynamiques en données numériques.

Nous effectuons ensuite la moyenne de ces valeurs. Cette moyenne est calculée en utilisant la formule suivante :

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \quad (4.7)$$

De façon à déterminer ensuite la température exacte, on utilise la formule provenant de l'ANNEXE IV suivante

$$T = 25 + \sqrt{\left[\frac{0.00788 * 2 - 4 * 1.937 * e^{-5} * \frac{V_T}{I} - 0.00788}{\frac{R_{25}}{(2 * 1.937 * e^{-5})}} \right]} \quad (4.8)$$

où V_T est la tension aux bornes du capteur de température, R_{25} est la résistance à 25 degrés Celsius et I est le courant

Pour déterminer la température, il faut connaître les valeurs d'entrée. Ces valeurs sont les tensions des thermistances, la résistance à 25 degrés, et le courant d'entrée. La Figure 4.14 indique la configuration de l'icône formula. Cette icône permet de configurer la formule précédente. La Figure 4.15 montre le diagramme du calcul de la température. Le langage G est un logiciel graphique.

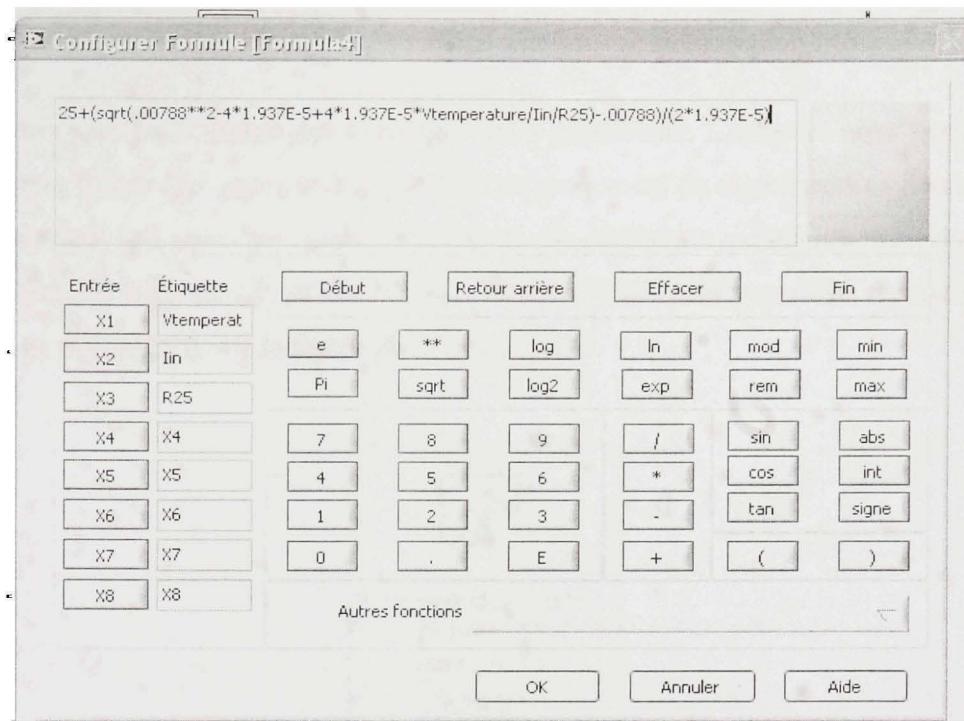


Figure 4.14 Configuration de l'icône Formula.

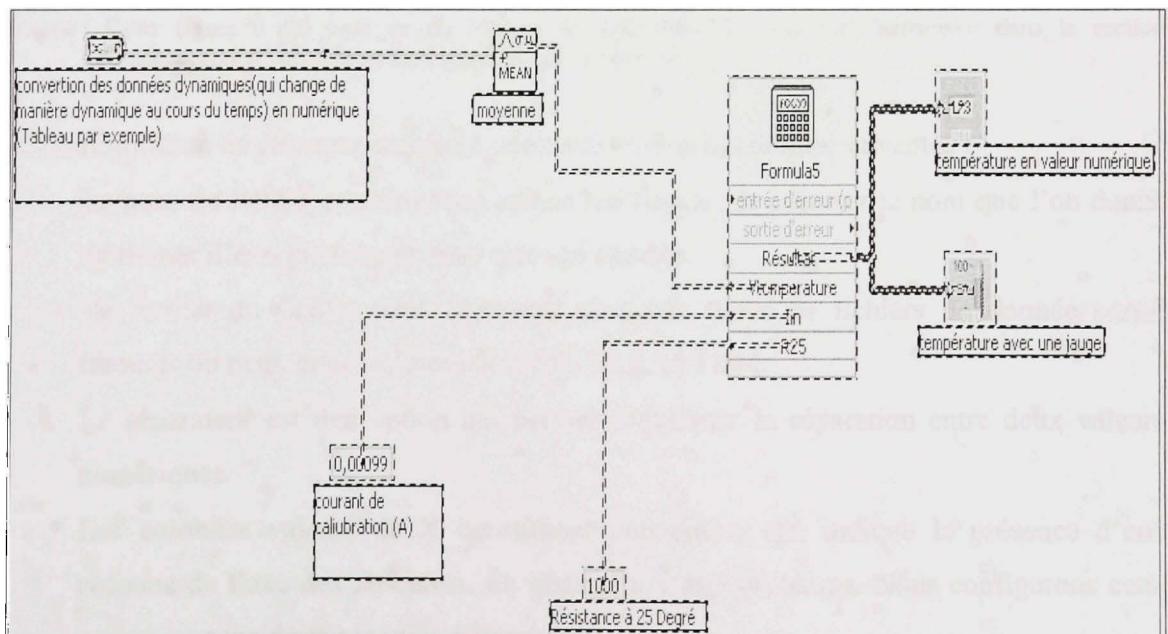


Figure 4.15 Traduction en langage G du calcul de la température.

4.2.5 Écriture d'un fichier de donnée

Elle constitue un autre aspect des avantages de la plateforme. L'écriture nous permet ainsi d'analyser la forme des ondes et donc de faire du traitement du signal sur ces données. Ces enregistrements ont pour but aussi de localiser les différents problèmes qui peuvent se produire lors des tests chez Pratt and Whitney Canada. LabVIEW permet de répondre à cette exigence en utilisant l'icône indiquée par la Figure 4.16.



Figure 4.16 Icône d'enregistrement d'un fichier de mesure.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de National Instrument dans la section d'enregistrement de fichier. Le logiciel est de la version 8.0.

La configuration de cet enregistrement nécessite les configurations suivantes :

- Le nom du fichier constitue une option qui permet de préciser le nom que l'on donne au fichier d'enregistrement ainsi que son chemin.
- Le format du fichier peut supporter plusieurs types de fichiers de donnée parmi lesquels on peut citer les formats LVM, XLS, et TDM.
- Le séparateur est une option qui permet d'indiquer la séparation entre deux valeurs numériques.
- Les colonnes valeurs de X constituent une option qui indique la présence d'une colonne de l'axe des abscisses. En général il s'agit du temps. Nous configurons cette option en considérant le taux d'acquisition.
- L'en-tête de segment est configuré suivant la taille du fichier d'enregistrements. Il existe un seul ou plusieurs segments par voie d'enregistrements. La Figure 4.17 montre

la configuration de l'écriture d'un fichier de mesure dans LabVIEW. Nous configurons cette option en fonction du taux d'acquisition. Elle s'effectue également lorsque la liste des signaux diffère au cours du temps.

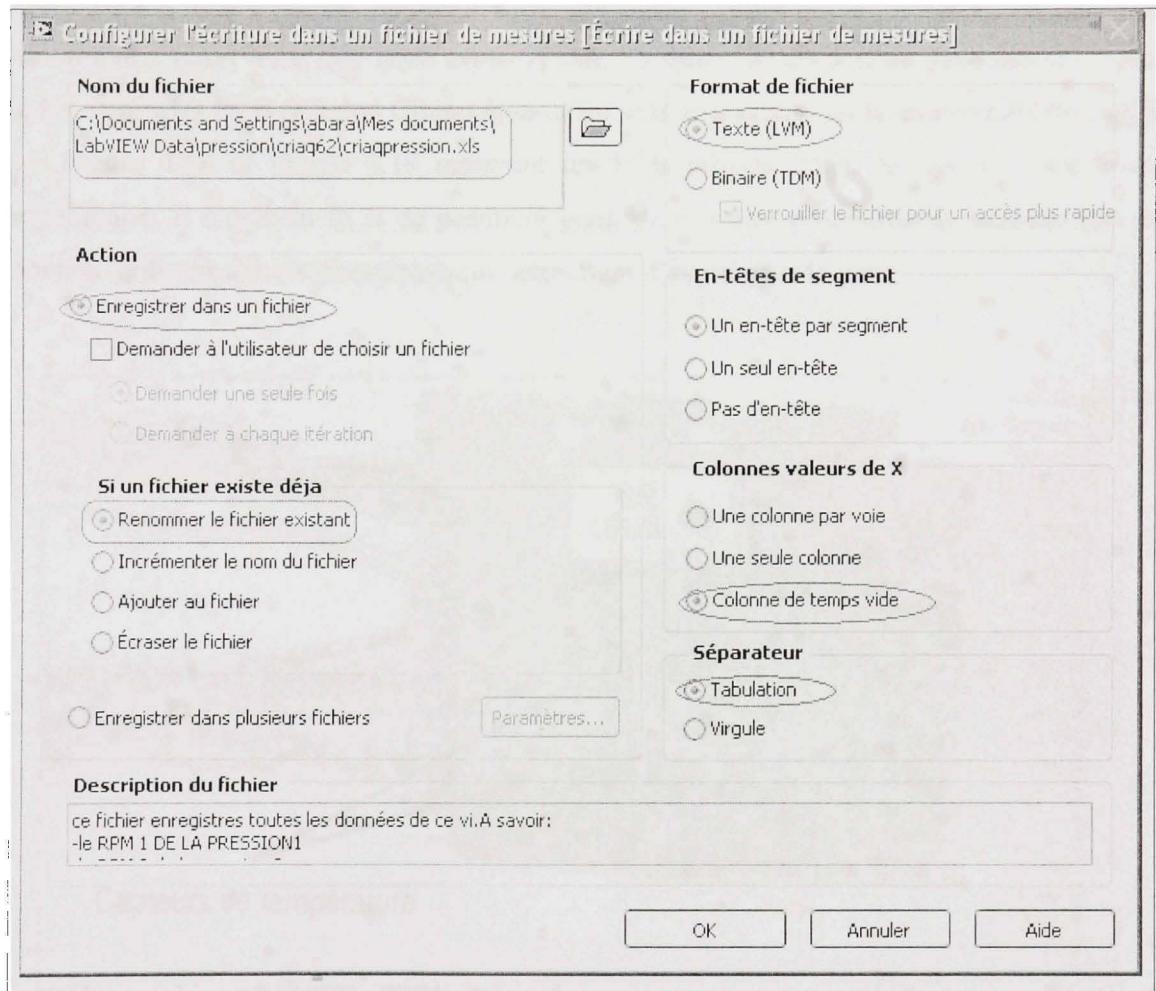


Figure 4.17 Configuration du fichier d'enregistrement.

(Tiré de LabVIEW, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du logiciel de LabVIEW de *National Instrument* dans la section d'enregistrement de fichier. Le logiciel est de la version 8.0.

4.3 Présentation des résultats effectués en laboratoire

4.3.1 Description du montage réalisé

Pour réaliser les tests en laboratoire, il est donc primordial d'effectuer un montage préliminaire. C'est ainsi que nous avons réalisé l'acquisition de donnée des capteurs. Nous avons utilisé les PCB (Printed Circuit Board) qui ont été réalisés au laboratoire CONCAVE. Les Figure 4.18 et Figure 4.19 montrent les PCB utilisés. Dans le cas de notre étude préliminaire, il s'agit du PCB de première génération. Cette génération ne possède pas de montage utilisant des condensateurs qui permettent d'augmenter le gain.

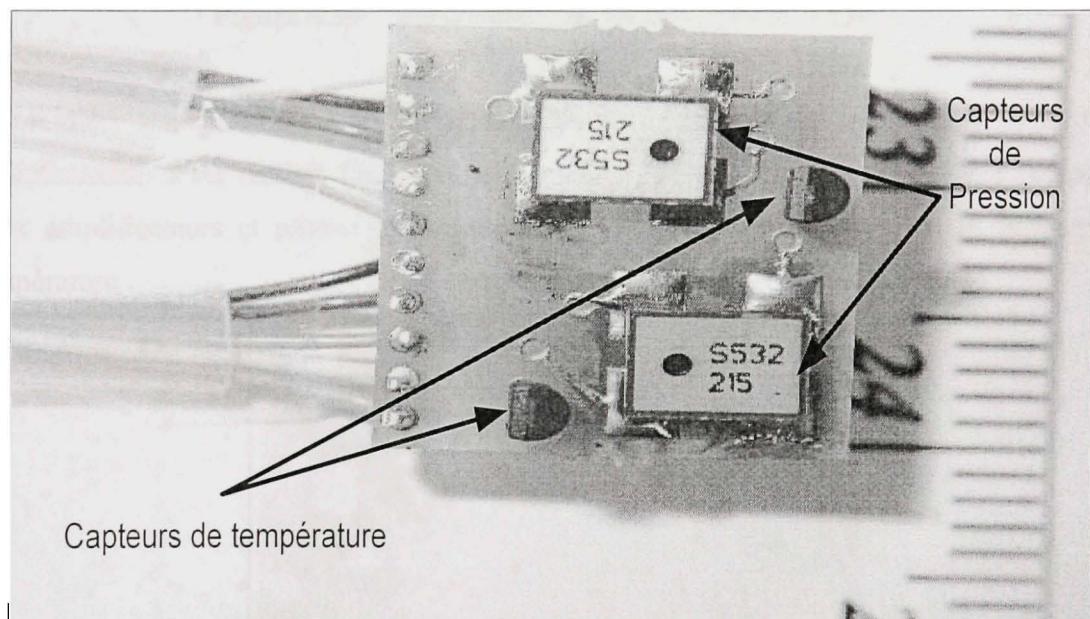


Figure 4.18 Présentation du PCB en vue de face.



Figure 4.19 Présentation du PCB en vue de profile.

La première étape consiste à alimenter les capteurs. C'est ainsi qu'un prototype de la carte d'alimentation a été réalisé. La Figure 4.20 indique la carte d'alimentation. Elle comporte deux amplificateurs et permet ainsi d'alimenter un capteur de pression et un capteur de température.



Figure 4.20 Carte d'alimentation.

La deuxième étape consiste à utiliser une carte qui permet d'alimenter simultanément deux PCB, c'est-à-dire quatre capteurs de températures et quatre capteurs de pressions. La Figure 4.21 montre la deuxième version de la carte d'alimentation. Cette carte est composée de régulateurs et d'amplificateurs. Les composants permettent d'alimenter respectivement les

capteurs de pression et de température. La carte d'alimentation possède ainsi des potentiomètres qui permettent d'ajuster le gain des capteurs de pression et de température. Le dispositif de protection est composé de diodes. Ce dispositif permet la protection de la carte lorsqu'elle est soumise à une surtension.

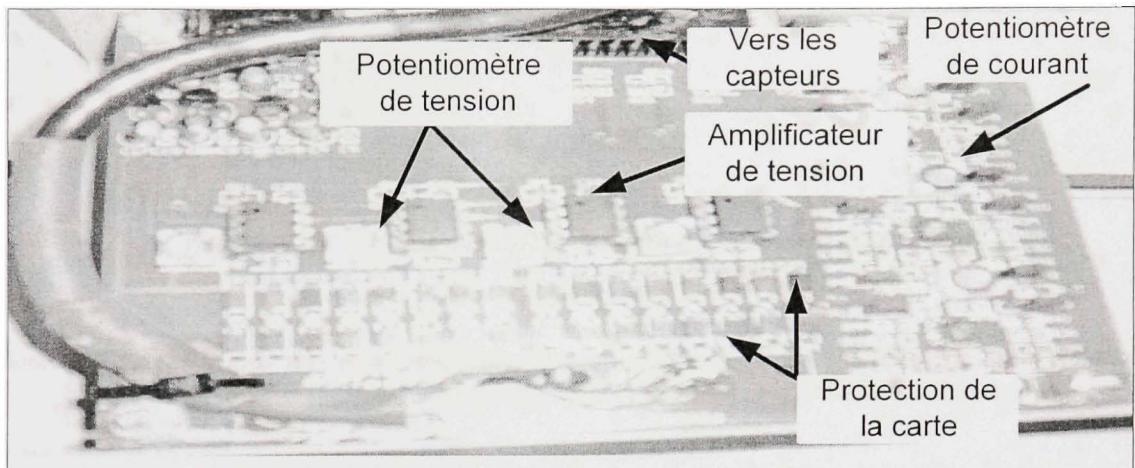


Figure 4.21 Deuxième version de la carte d'alimentation.

Ce dispositif permet l'alimentation de quatre capteurs de température. La Figure 4.22 montre la présentation du schéma de la source de courant. Une expression mathématique du gain provient des équations suivantes :

$$V_a = (R_5 + R_6)I_1 \quad (4.9)$$

$$V_s = V_a + R_{charge}I_1 \quad (4.10)$$

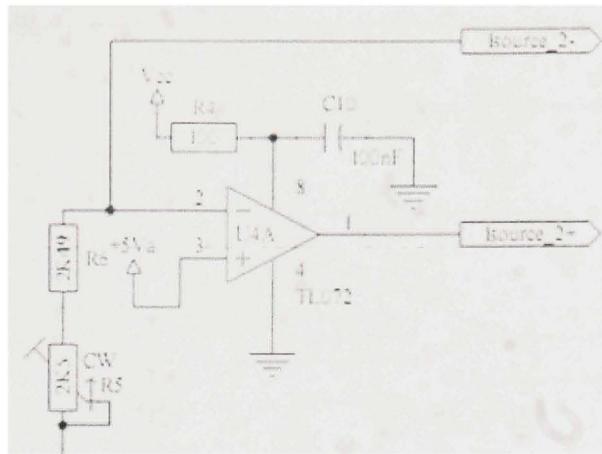


Figure 4.22 Présentation du schéma de la source de courant.

(Tiré de Jean Caron, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de M. Jean Caron, *Carte conditionneur Grintonnier du projet CRIAQ6.2* page2.
La démonstration a été présentée à Montréal dans le cadre du projet CRIAQ 6.2 génie de l'École de technologie supérieure.

$$\frac{V_s}{V_a} = 1 + \frac{R_{charge}}{R_5 + R_6} = gain \quad (4.11)$$

L'amplificateur a une tension d'alimentation de 18volts.

$$1 + \frac{R_{charge}}{R_5 + R_6} = \frac{18Volts}{5Volts} \quad (4.12)$$

Alors on en déduit que :

$$R_{charge} = 2.6 * (R_5 + R_6) \quad (4.13)$$

Le montage peut donc supporter une charge maximale de 12,974 KOhms. Le courant fourni par la source est supérieur ou égal à 1mA. La Figure 4.23 montre la présentation du schéma de la source de tension.

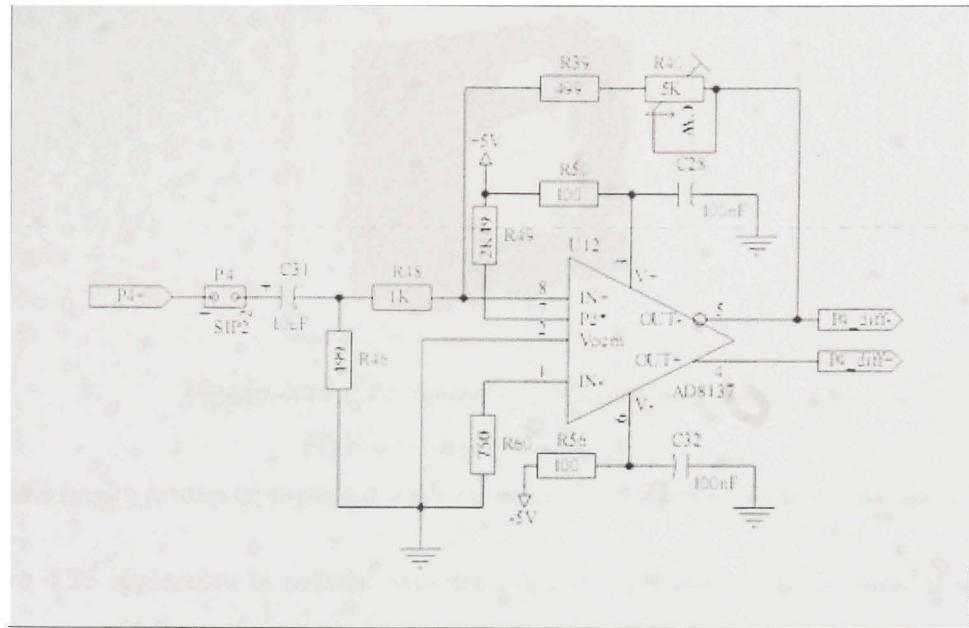


Figure 4.23 Présentation du schéma de la source de tension.

(Tiré de Jean Caron, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de M. Jean Caron, *Carte conditionneur Grintonnier du projet CRIAQ6.2* page2.
La démonstration a été présentée à Montréal dans le cadre du projet CRIAQ 6.2 génie de l'École de technologie supérieure.

La vérification des spécifications en Annexe V montre que la source de tension permet d'obtenir une tension d'alimentation de 5volts.

Le laboratoire ne possède pas des moteurs de taille similaire à ceux de Pratt and Whitney Canada. Pour valider le montage d'acquisition de donnée, nous avons utilisé un ventilateur d'expérimentation. La Figure 4.24 illustre ce ventilateur d'expérimentation. Ce ventilateur comprend 12 pales équidistantes. Le ventilateur est de type axial. Il est de faible coût et il permet de supporter des tensions de 12volt. Cette tension correspond à 3000 tours par minute. Un trou est réalisé au-dessus du ventilateur pour que le capteur de pression puisse mieux capter la pression provenant des pâles. Le ventilateur peut atteindre une vitesse comprise entre 2200RPM et 3800RPM lorsque la température est comprise entre 15 et 45 degré Celsius. Le bruit généré est compris entre 19 et 26 dBA.

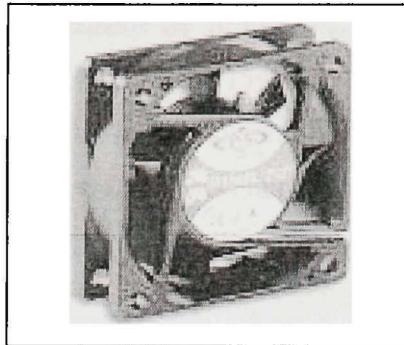


Figure 4.24 Le ventilateur d'expérimentation.

(Tiré de Google image, 2007)

Source : Cette figure a été tirée de du site de *Google image*. Le site internet a été visité le 2 Mai 2007.

La Figure 4.25 représente la mesure expérimentale de la pression sur le ventilateur. Cette disposition permet le contact entre le capteur et le souffle d'air causé par la rotation des lames. C'est ainsi que l'on peut avoir la valeur exacte de la pression.

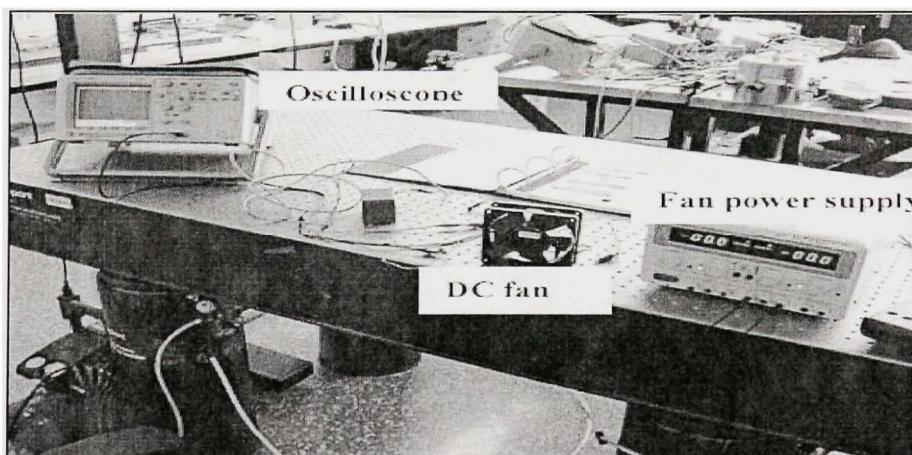


Figure 4.25 Mesure expérimentale de la pression à l'aide du ventilateur.

4.3.2 Résultat des tests préliminaires

Les tests de la carte d'alimentation fournissent des résultats excellents. Nous avons indiqué dans la section précédente, la carte est composée de connecteurs femelles. Ces connecteurs permettent de réaliser la jonction avec les capteurs. Le connecteur DB25 fournit les signaux à

la carte d'acquisition. Pour des raisons de protections, la carte d'alimentation peut être alimentée avec des tensions de +/- 8volt à +/- 15volt. D'une manière générale, la forme des graphes des pressions est triangulaire. La température est constante. La Figure 4.26 illustre les résultats obtenus en ce qui touche les tests préliminaires en laboratoire. Comme on peut le constater, la forme des graphes des températures est constante. Nous observons quelques variations infinitésimales des graphes de température. Ces variations occasionnent l'évolution de la température autour de 25degré Celsius. Les variations des pressions sont triangulaires. Cette distorsion provient de la position du capteur qui n'est pas toujours fixe sur le trou du ventilateur. Nous remarquons une différence entre les pressions 1 et 4. Le signal de la pression 1 est plus robuste que celui de la pression 4. Ces pressions proviennent de deux PCB différents. Le PCB1 fournit la pression 1. Le PCB2 fournit la pression 4. Le PCB1 possède un gain supérieur au PCB2. Ce signal permet ainsi d'afficher la valeur exacte du nombre de RPM. La mise en place d'un gain sur le PCB délivre des résultats encourageants. La deuxième génération du PCB constitue le meilleur prototype à utiliser pour réaliser les tests sur le moteur P&WC. Cette particularité des PCB a été précisée dans les sections antérieures. Le même phénomène s'observe entre les pressions 2 et 3.

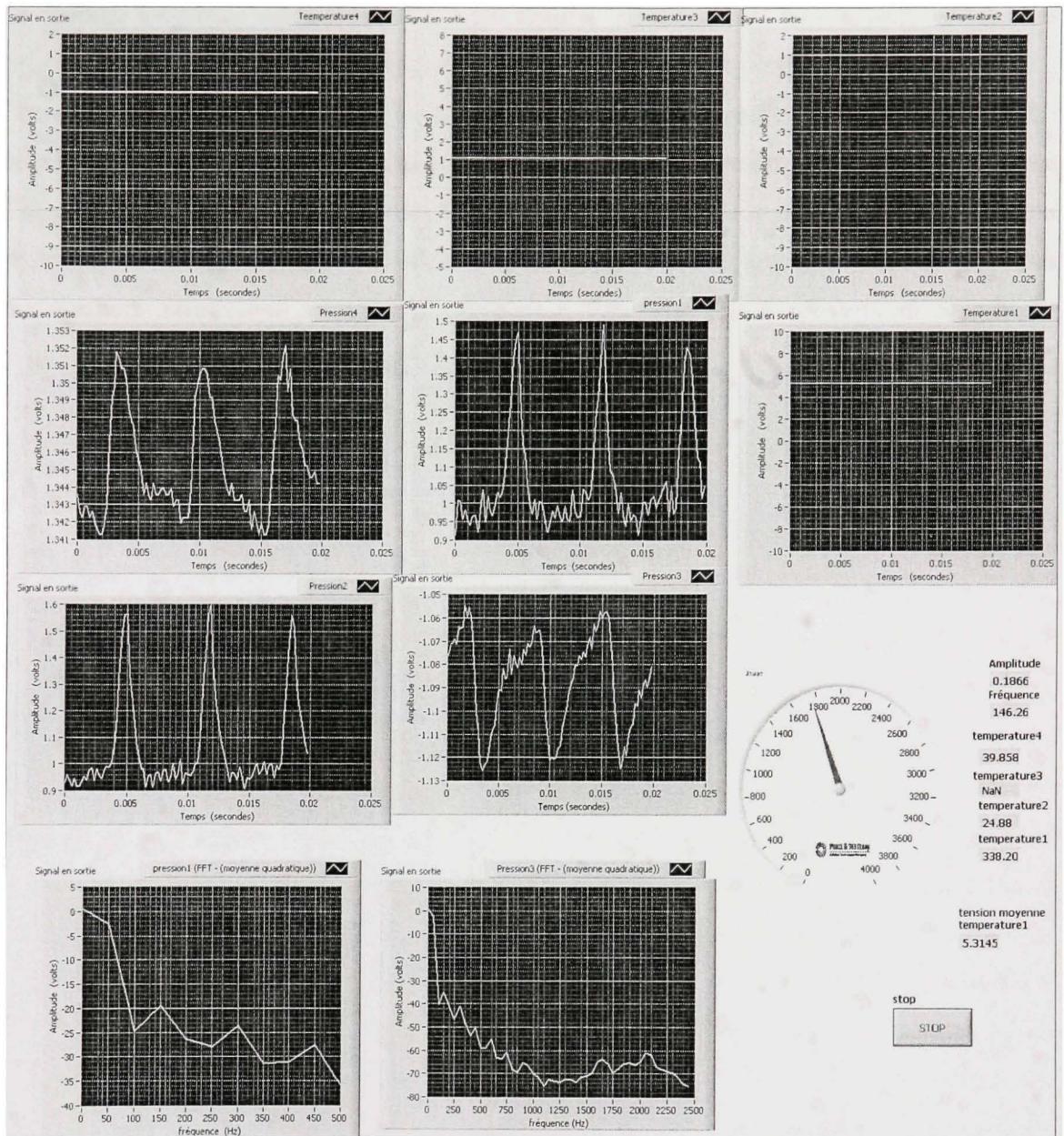


Figure 4.26 Présentation des résultats préliminaires.

Ce chapitre s'est basé sur la présentation des résultats en laboratoire. Les étapes préliminaires de configuration de la plateforme ont été introduites. Ces étapes consistent donc à l'explication de la configuration du DAQ ainsi que les différentes options associées. La deuxième étape a permis de configurer les différents blocs de construction de la plateforme d'acquisition ainsi que les différentes options qui nous permettent de faire cette acquisition de donnée. Ce chapitre a prouvé finalement que les tests en laboratoires sont excellents. Tous ces résultats introduisent les tests en entreprises. Ces tests seront couverts au chapitre 5.

CHAPITRE 5

TEST CHEZ PRATT AND WHITNEY

Dans le même ordre d'idée que le chapitre précédent, les tests en entreprise sont la suite logique des tests en laboratoire. Ce chapitre regroupe les tests chez P&WC. La première étape de ce chapitre traite de la présentation de l'environnement chez P&WC. Il s'agit ensuite de faire un traitement du montage du système d'acquisition de donnée chez P&WC. Ce chapitre se terminera enfin par la présentation des résultats chez P&WC qui indiquera les directions à suivre pour l'avenir.

5.1 Présentation de l'environnement chez Pratt and Whitney

Nous avons effectué les tests chez P&WC à Longueuil, le 25 juillet 2007. Dans le passé, nous avons réalisé plusieurs visites en entreprise. Ces visites ont eu pour objectifs de nous familiariser avec l'environnement du moteur. P&WC s'est dotée en effet de plusieurs bancs de tests. Cette abondance facilite la réalisation de test sur des moteurs différents. Chaque banc de test se compose de la chambre du moteur et celle de contrôle. La Figure 5.1 montre la chambre du moteur. Nous remarquons que la position du moteur est en arrière. La cloche permet d'éviter la propagation d'un incendie dans la salle du moteur. La combustion se fait alors dans un environnement hermétique. Le moteur reçoit ainsi du carburant par injection par l'intermédiaire de câbles. La présence des câbles et autres équipements permet donc le démarrage et la réalisation des tests. Ces actions constituent les principales tâches des ingénieurs de la salle de contrôle. Ces visites nous ont permis d'améliorer notre système d'acquisition de donnée pour qu'il devienne opérationnel.

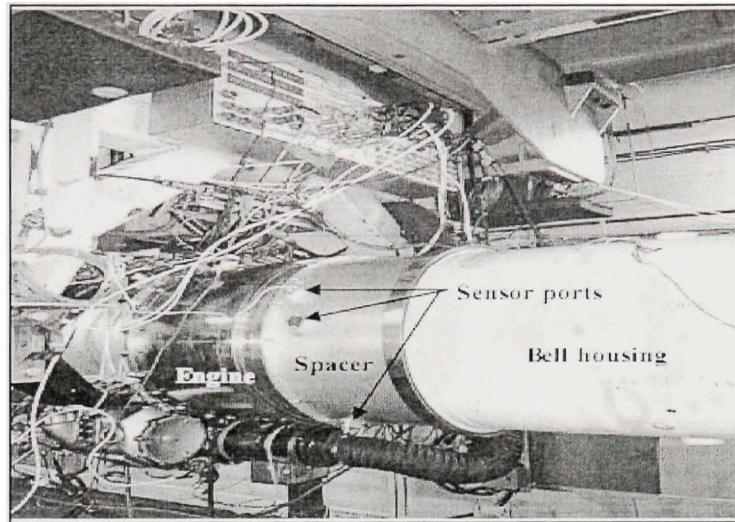


Figure 5.1 *Présentation de l'environnement chez Pratt and Whitney.*

5.2 Montage du système d'acquisition sur le moteur

La Figure 5.1 montre le positionnement de nos capteurs sur le moteur. C'est ainsi que le laboratoire CONCAVE s'est occupé de la modification des capteurs. Cela se traduit par l'utilisation d'un conditionnement (packaging) compatible avec les positions des capteurs sur le moteur. De la résine a été ajoutée sur le conditionnement. Cette modification permet ainsi de fixer le capteur sur les ouvertures du moteur de manière efficace. Par conséquent, nous obtenons un signal beaucoup plus précis sur LabVIEW. Nous avons ainsi pu résoudre le phénomène que nous avons observé pendant les tests en laboratoire. La Figure 5.2 montre la nouvelle présentation du PCB. L'empaquetage et l'ajout de résine sur les capteurs permettent de réaliser la compatibilité avec les ports des capteurs indiqués à la Figure 5.1.

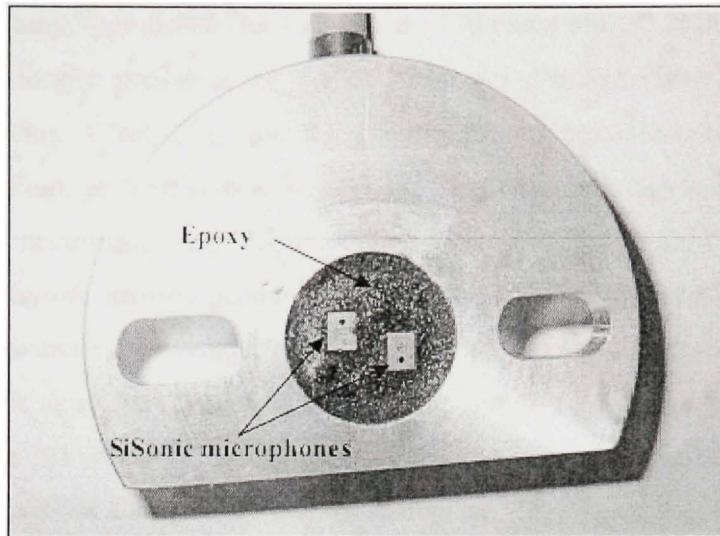


Figure 5.2 Nouvelle présentation du PCB.

Le moteur présente un environnement corrosif et de hautes températures. Cet environnement nécessite le changement des connecteurs. C'est ainsi que les anciens connecteurs ont été remplacés par les connecteurs militaires. La Figure 5.3 montre le nouveau connecteur militaire associé au système d'acquisition. Ce sont des connecteurs beaucoup plus robustes. Ils sont composés de 10 broches.

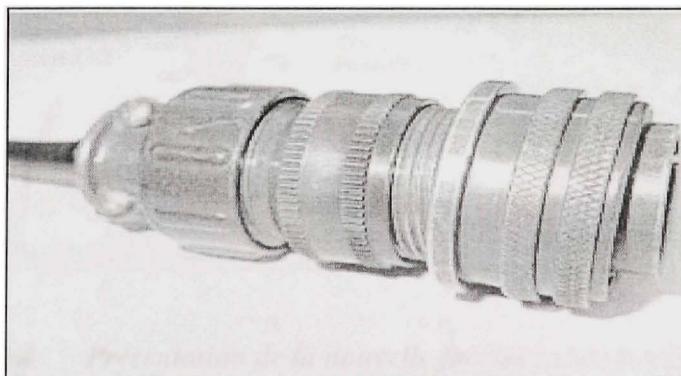


Figure 5.3 Connecteur militaire utilisé pour les tests chez P&WC.

Pour acquérir les informations du moteur depuis la salle de contrôle, il faut donc utiliser des câbles spéciaux. Ces câbles permettent l'alimentation en tension et le transfert des données

du moteur. C'est ainsi que des câbles robustes de 150 pieds ont été choisis. La plateforme d'acquisition de donnée présentait au départ beaucoup d'informations sur la forme des signaux des capteurs. C'est ainsi que les graphiques ont été remplacés par des jauge indiquant la pression et la température. P&WC demande que les informations sur les pressions soient prioritaires. La Figure 5.4 montre la face avant de la plateforme d'acquisition de donnée utilisée pendant les tests chez P&WC. Nous avons supprimé des informations redondantes provenant de la plateforme. La configuration nouvelle de la plateforme possède ainsi deux jauge de température comparativement à l'ancienne qui en a quatre. La Figure 5.5 suivante montre la configuration du système d'acquisition. Cette configuration du système a amorcé les tests en entreprise.

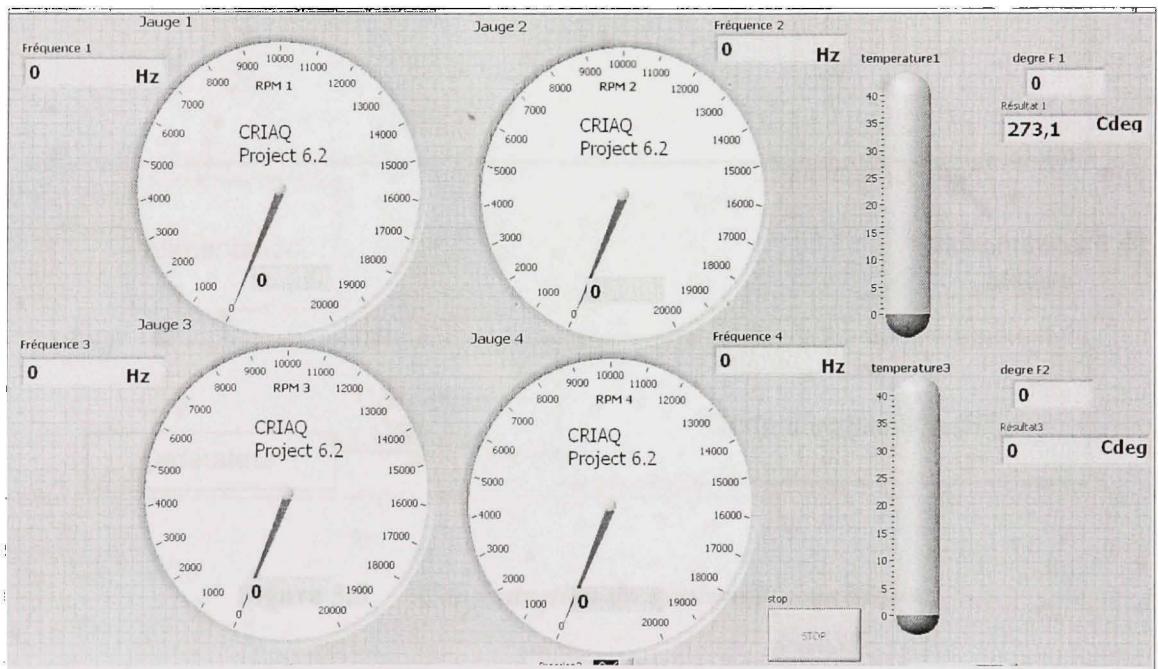


Figure 5.4 Présentation de la nouvelle face avant de la plateforme.

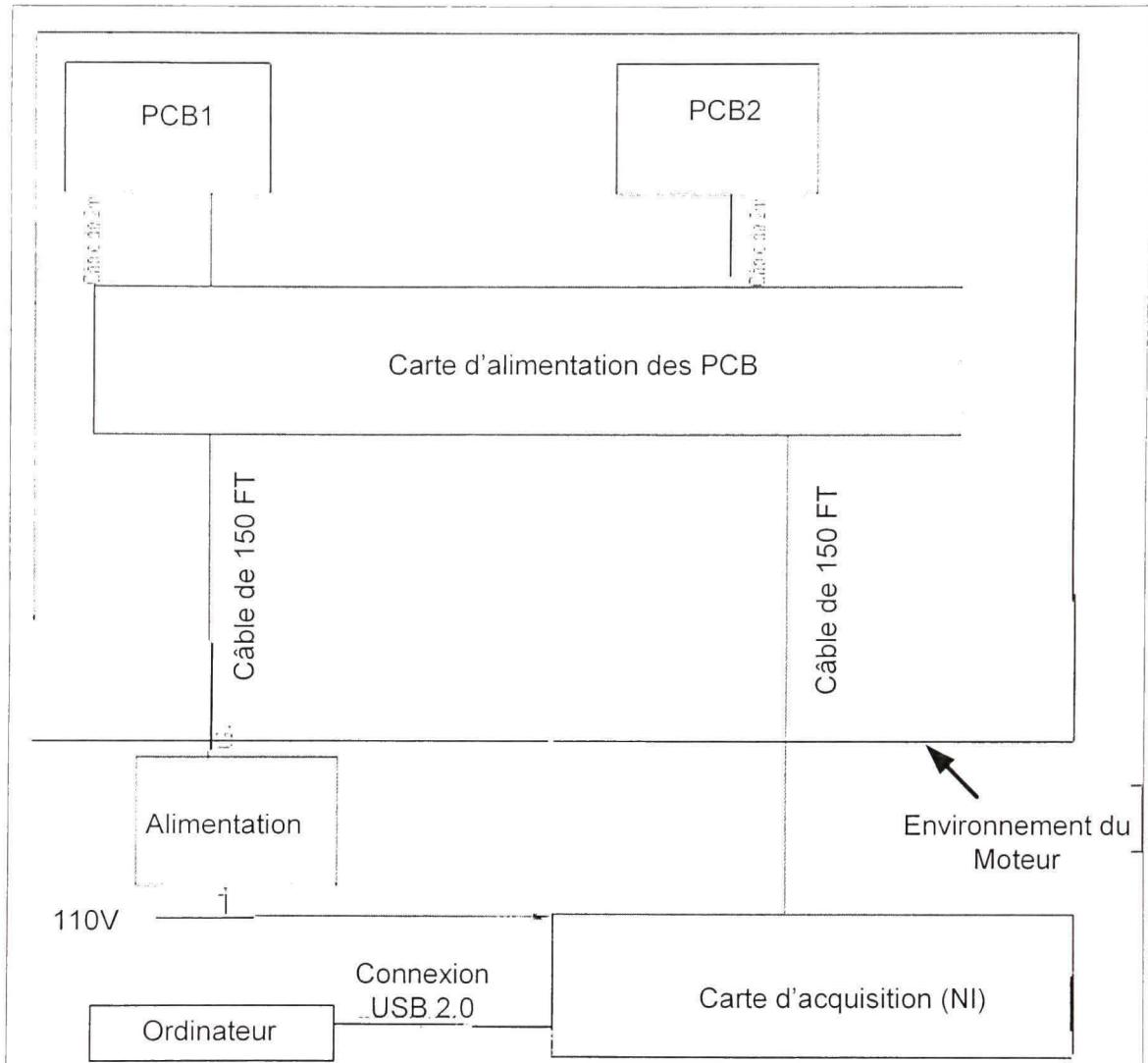


Figure 5.5 Configuration du système d'acquisition.

5.3 Présentation des résultats obtenus chez Pratt and Whitney

Les tests chez P&WC ont abouti à l'enregistrement d'une masse considérable de données. Les informations recueillies sont composées de plusieurs blocs. Les enregistrements utilisés

dans le cadre de cette section couvrent un cycle de fonctionnement du moteur. Un cycle se décompose en trois phases :

- Régime de saturation (Vitesse élevée)
- Décélération
- Fonctionnement de faibles RPM

À cet effet, le logiciel Diadem a été utilisé pour étudier ces régimes. C'est un logiciel de la compagnie National Instrument. Il est compatible avec LabVIEW. C'est un logiciel qui permet d'analyser une masse de données considérable. Il est facile à utiliser. La Figure 5.6 montre les 25000 premiers échantillons d'un cycle.

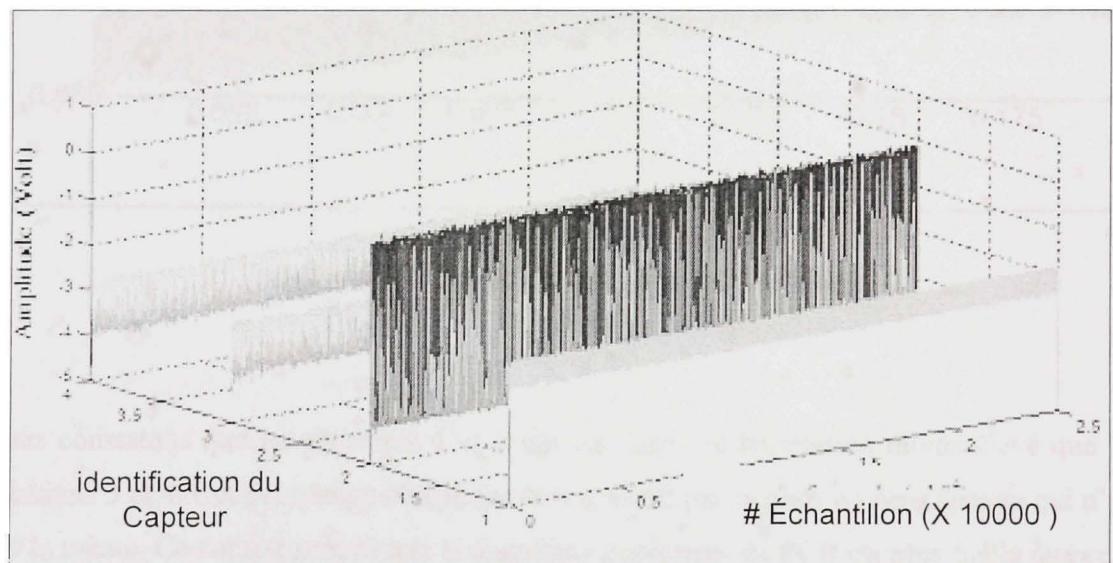


Figure 5.6 25000 premiers échantillons des capteurs de pressions.

Nous remarquons que les pressions 1 et 2 ont des formes semblables. Il en est de même pour les pressions 3 et 4. Cette ressemblance peut se traduire mathématiquement par le degré d'auto corrélation du signal. La Figure 5.7 montre le degré de corrélation entre les pressions 1 et 2 et celle entre les pressions 3 et 4.

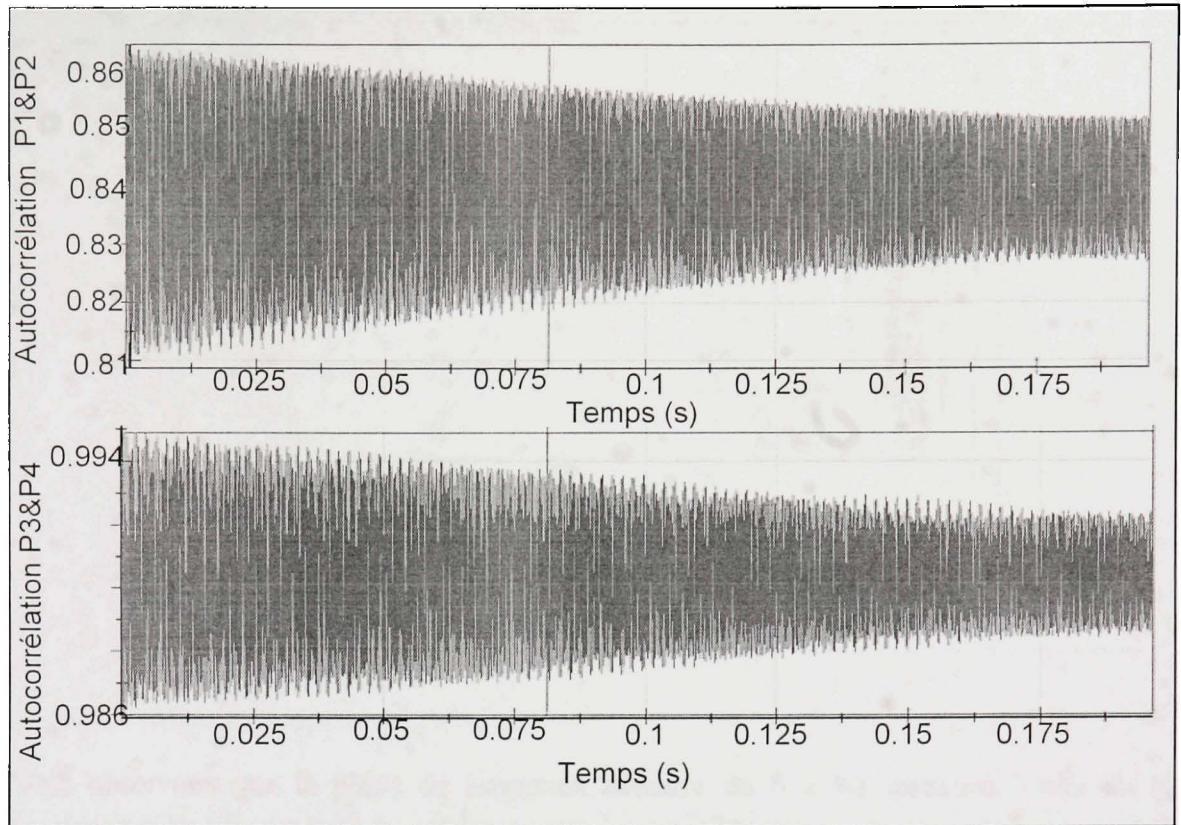


Figure 5.7 Autocréation entre les pressions.

Nous constatons que les pressions 1 et 2 ont un degré de corrélation moins élevé que les pressions 3 et 4. Cet événement s'explique tout d'abord par la position des capteurs qui n'est pas la même. Ce constat prouve que la deuxième génération de PCB est plus fiable que celle de la première génération. Dans la suite de notre étude, nous avons choisi l'étude de la pression 1. La Figure 5.8 indique l'évolution d'un cycle du moteur de la pression1. Cette pression traduit les phénomènes que nous avons observés pendant nos tests chez Pratt and Whitney Canada.

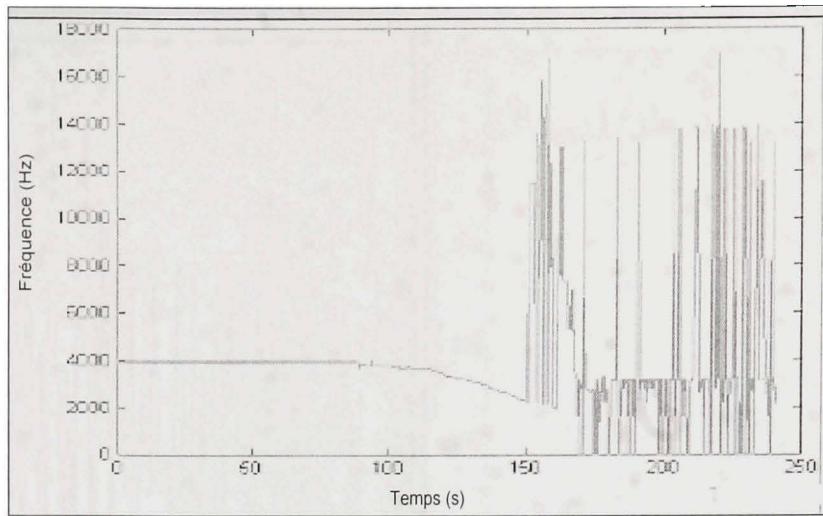


Figure 5.8 Présentation d'un cycle du moteur.

Nous observons que la phase de saturation démarre de 0 à 90 secondes. Celle de la décélération couvre l'intervalle allant de 90 secondes à 150 secondes. La dernière phase correspond à celle des fonctionnements à de faibles fréquences. Elle occupe l'intervalle allant de 150 secondes à 250 secondes. La Figure 5.9 montre l'évolution des fréquences fondamentales et leurs amplitudes pendant la phase de saturation. La fréquence maximale des pales du moteur est environ de 4200 Hz. Cette fréquence correspond à environ 14824 RPM. Dans le cas des tests, cette fréquence n'a jamais été atteinte.

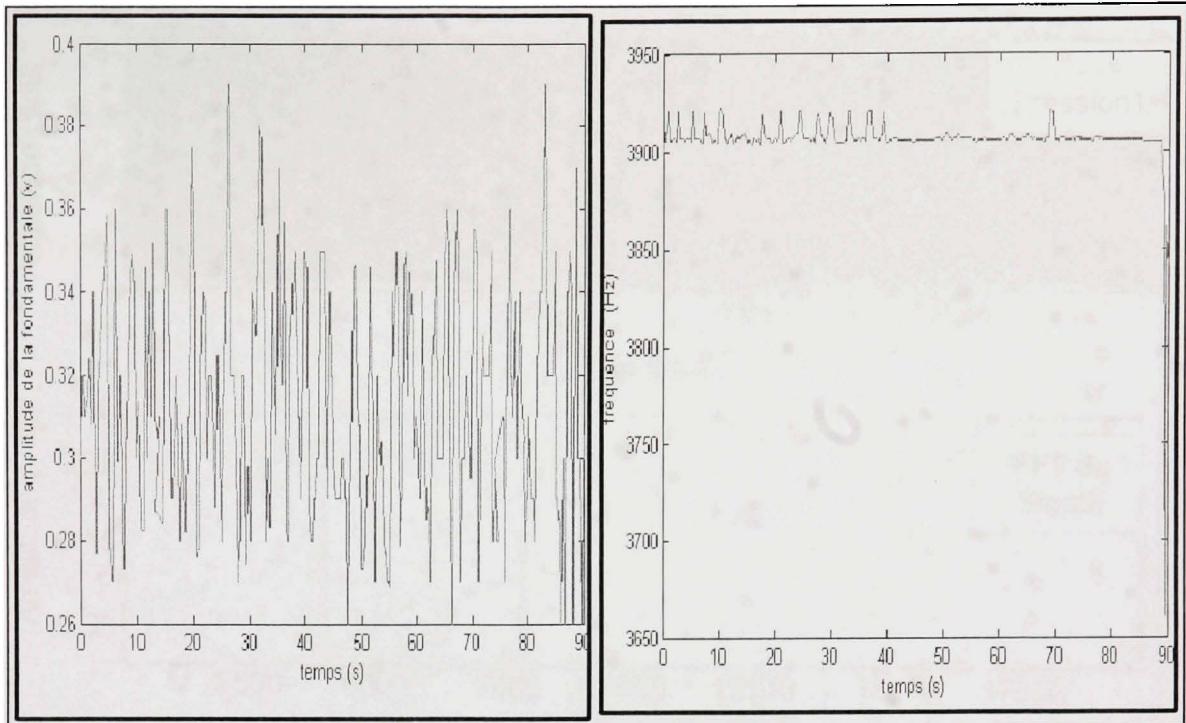


Figure 5.9 Évolution des fréquences fondamentales et leurs amplitudes pendant la phase de saturation.

Cette figure indique que les fréquences varient entre 3921 Hz et 3900 Hz. Ces fréquences correspondent à des fondamentales variant de 0,39 à 0,26 volt. Une FFT du signal au début du régime de saturation montre que la fondamentale est supérieure aux autres harmoniques. La Figure 5.10 indique le signal associé à cette FFT. Cette précision du signal entraîne un affichage exact du nombre de RPM sur le cadran de LabVIEW. La Figure 5.9 illustre cette remarque en montrant l'évolution des RPM affichés par le cadran pendant la phase de saturation.

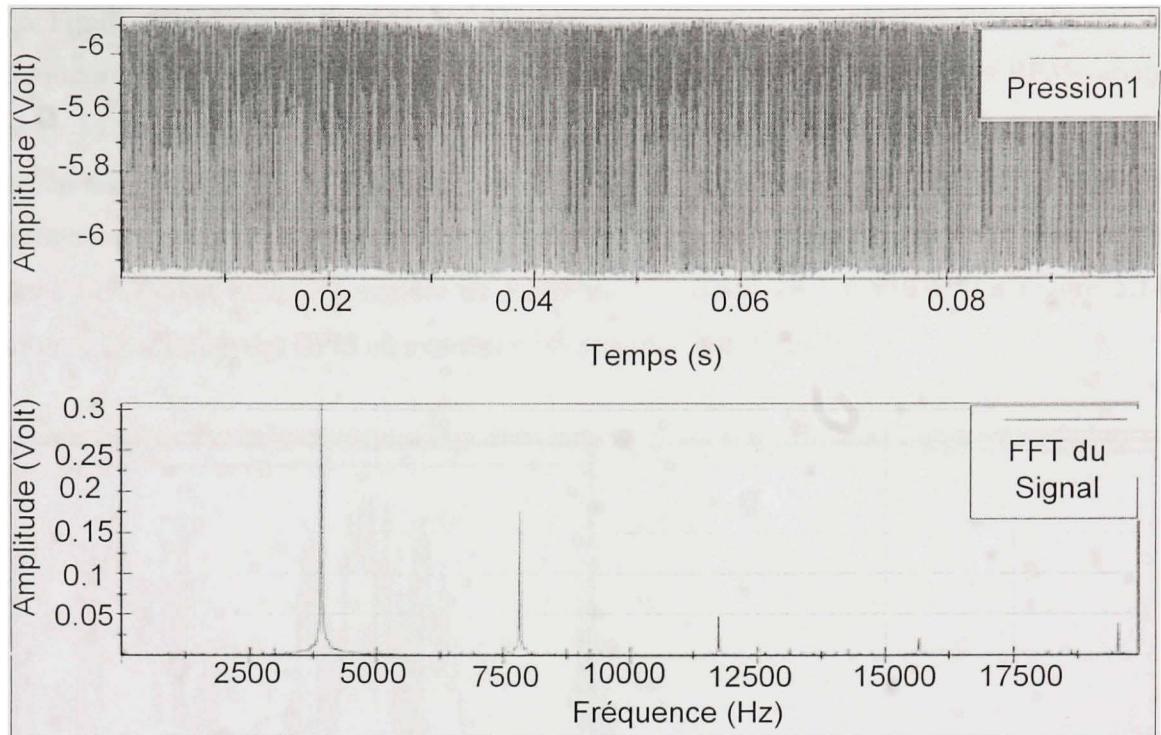


Figure 5.10 *Signal associé à sa FFT.*

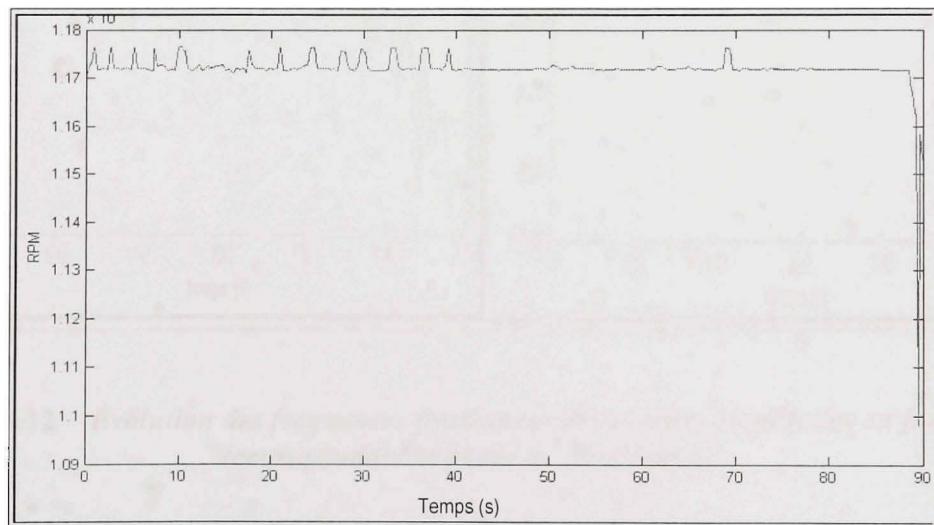


Figure 5.11 *Évolution des RPM pendant la phase de saturation.*

La Figure 5.12 indique la phase de décélération du moteur. Ces figures montrent que la fréquence varie entre 3900 Hz et 2300 Hz. Ces fréquences correspondent à des RPM variant entre 13764 et 8117. Une FFT au début de la décélération du moteur (c'est-à-dire vers 121 secondes) montre que la fondamentale se trouve à la fréquence de 3400 Hz. Les autres harmoniques sont rejetés à partir de 6700 Hz. La Figure 5.13 illustre cette FFT. Nous avons donc un résultat exact du nombre de RPM sur le cadran de LabVIEW. La Figure 5.14 montre l'évolution des RPM au moment de la phase de décélération.

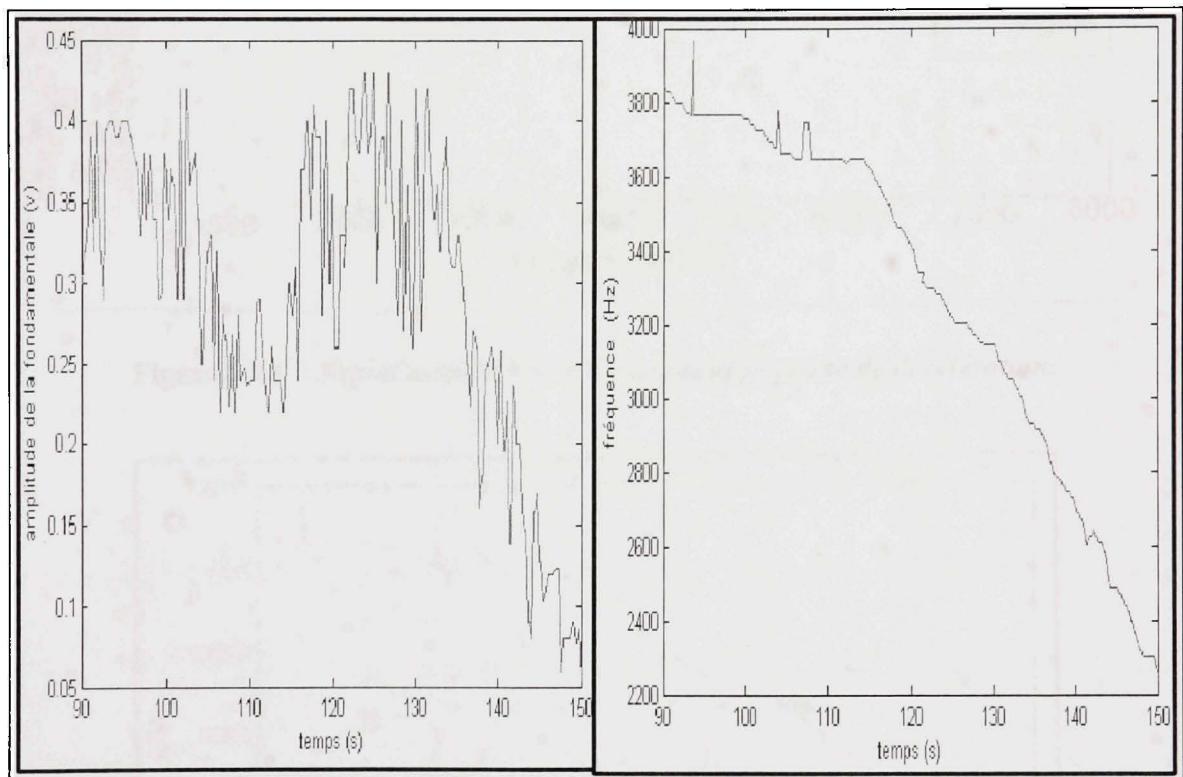


Figure 5.12 Évolution des fréquences fondamentales et leurs amplitudes en fonction du temps pendant la phase de décélération.

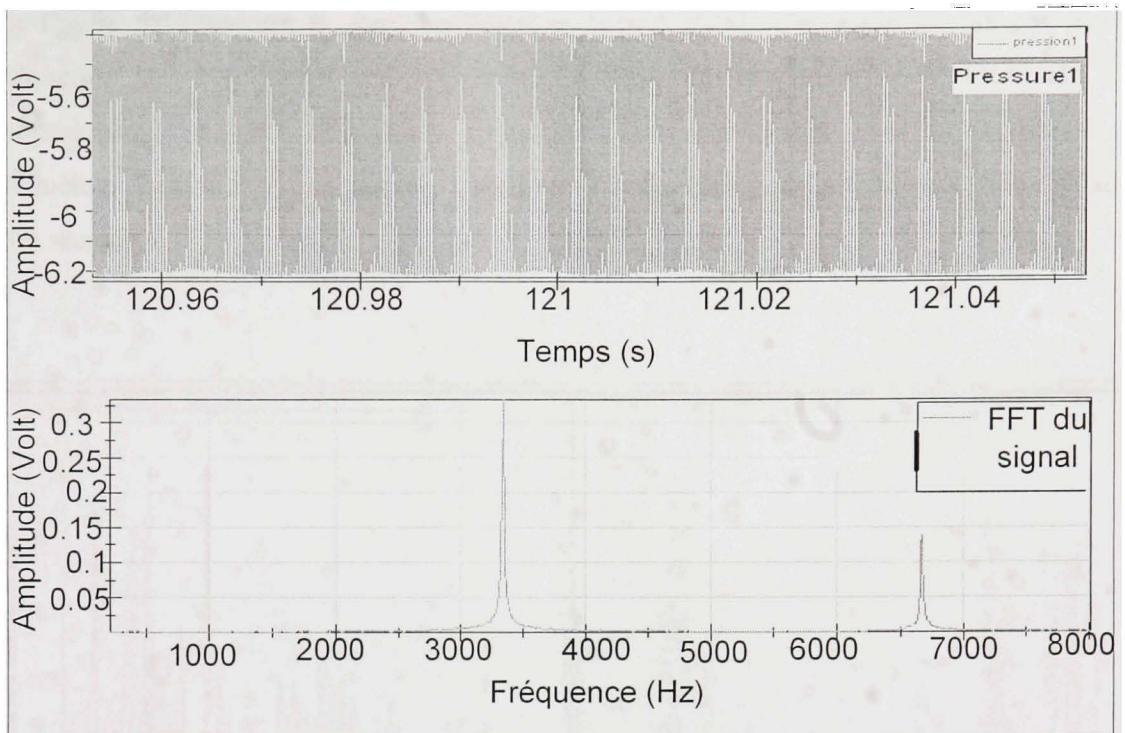


Figure 5.13 Signal associé à sa FFT pendant la phase de décélération.

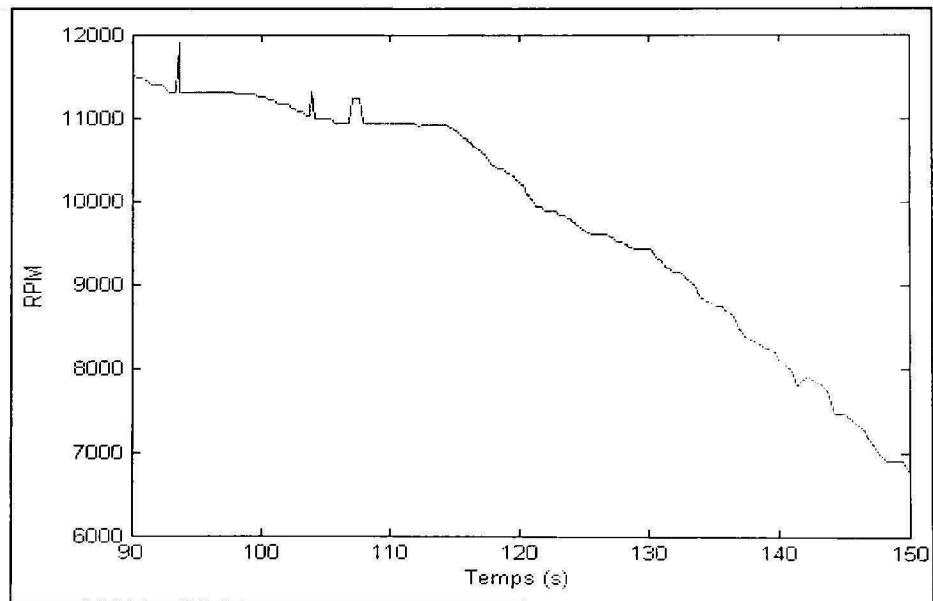


Figure 5.14 Évolution des RPM pendant la phase de décélération.

La Figure 5.15 montre le fonctionnement à faibles RPM. Ces figures montrent que les fréquences ont des valeurs non constantes. La fréquence maximale est de 17000 Hz. Ceci montre que ces valeurs ne sont pas conformes à la réalité lorsque nous les comparons aux fréquences délivrées par le moteur. La Figure 5.16 montre une FFT du signal au niveau de 200 secondes.

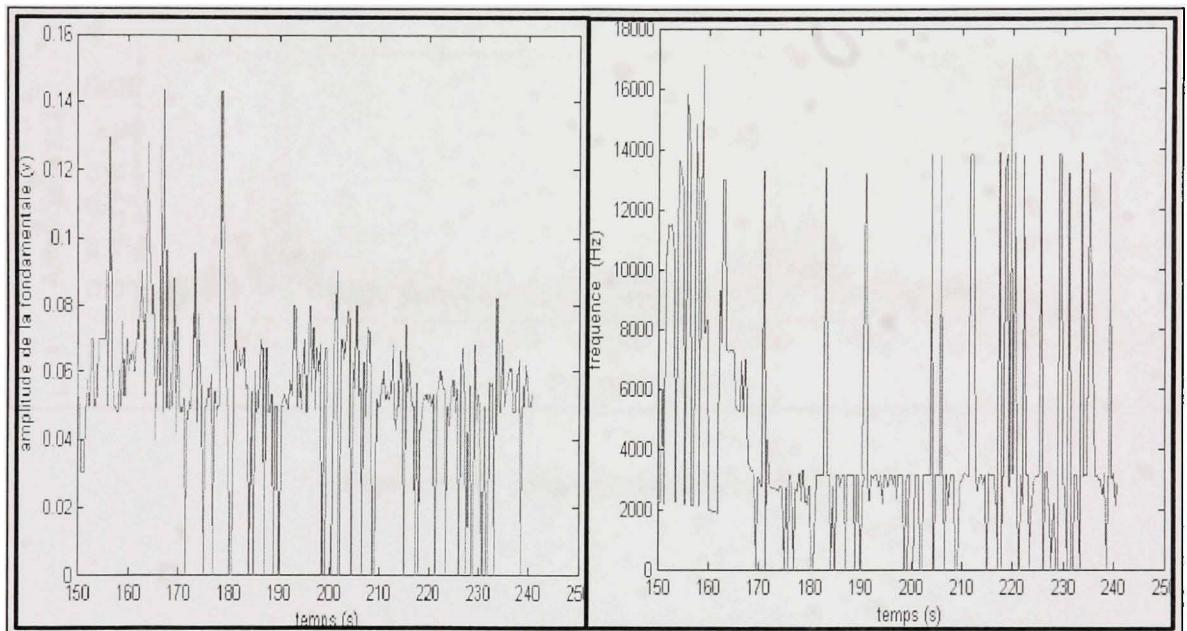


Figure 5.15 *Évolution des fréquences fondamentales et leurs amplitudes en fonction du temps pendant la phase à faible RPM.*

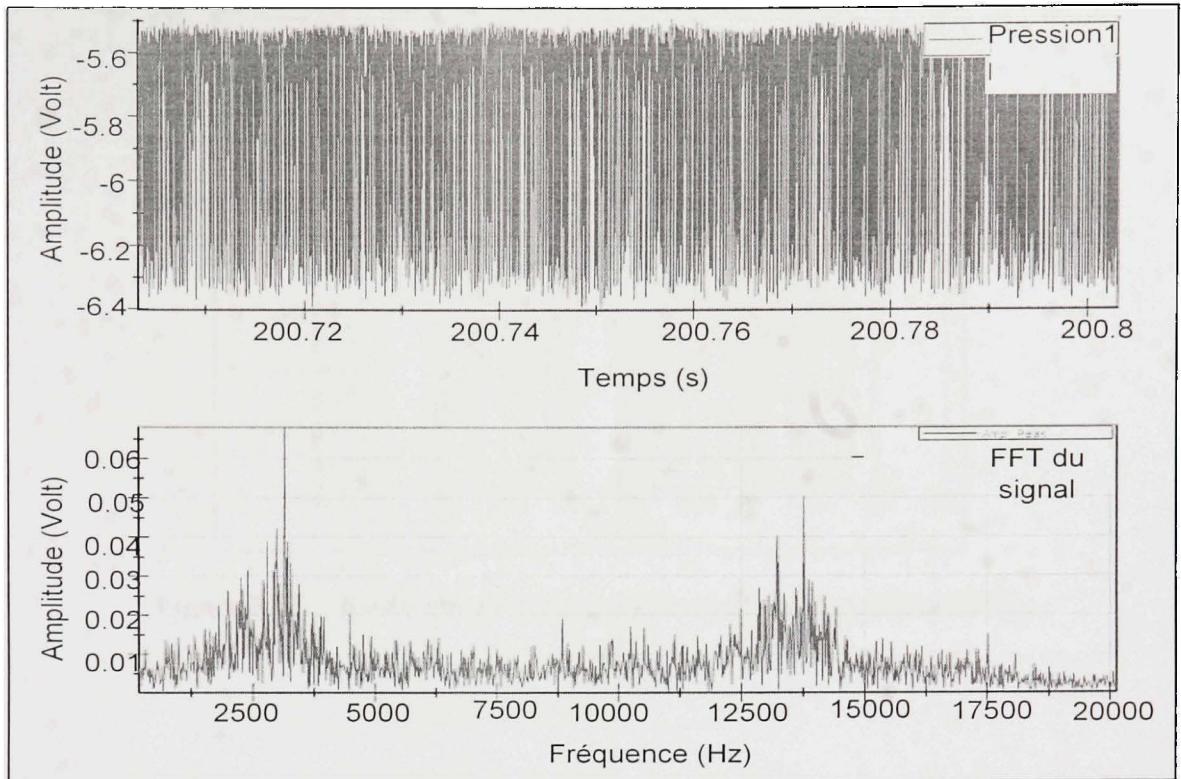


Figure 5.16 *Signal associé à sa FFT.*

La valeur maximale de l'amplitude du signal est de 0,06 volt. La fréquence est de 3500 Hz. Le signal est donc imprécis, car la fréquence de la fondamentale devrait être inférieure à 2500 Hz. Cette imprécision entraîne l'affichage erroné de RPM. La Figure 5.17 montre les RPM de ce régime.

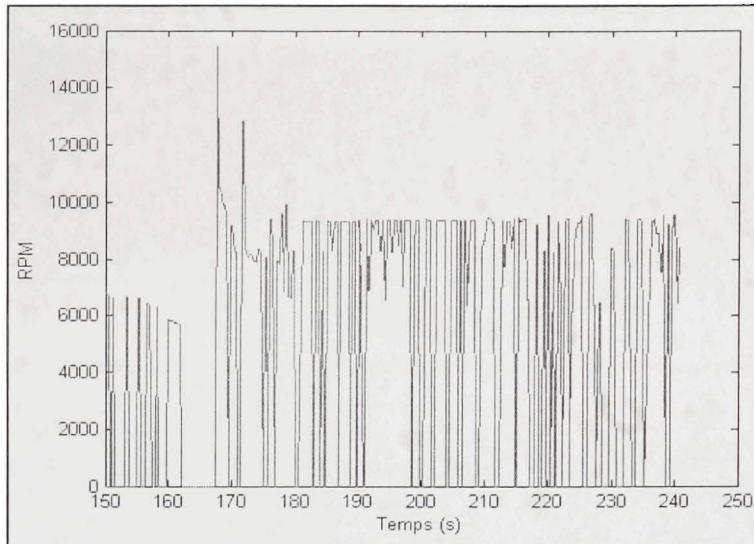


Figure 5.17 Évolution du cycle pendant la phase des faibles RPM.

Nous constatons que plusieurs RPM sont nuls sur des intervalles alors que les fréquences sont non nulles. Ce phénomène provient de l'élimination systématique des fréquences supérieures à 5200 Hz dans LabVIEW.

Notre étude s'est ensuite focalisée vers la transition entre la phase de décélération et celle de faible RPM du moteur. Les Figure 5.18 et Figure 5.19 illustrent respectivement deux sélections de 25000 échantillons aux alentours de 150 secondes. Nous pouvons remarquer la période de transition entre le régime de décélération et le fonctionnement à faibles RPM. Au-delà de la période de 146.2 secondes, la fréquence du signal n'est plus garantie. Pour éviter ce phénomène, une simulation d'un filtre sur la période des faibles RPM a été réalisée.

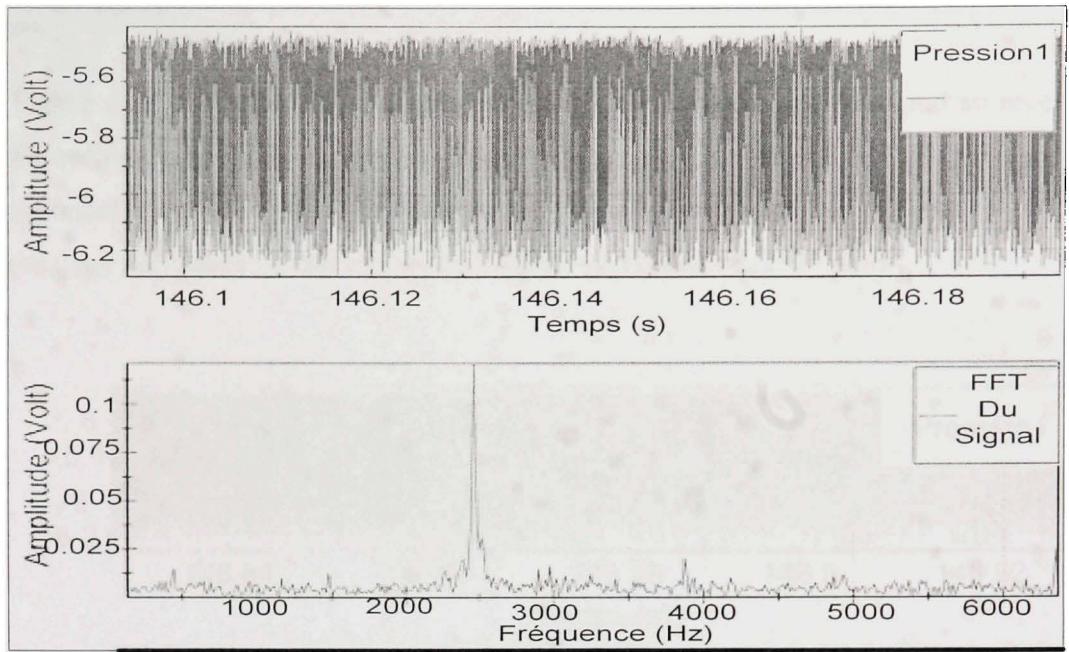


Figure 5.18 Réponse fréquentielle en dessous de 150 secondes.

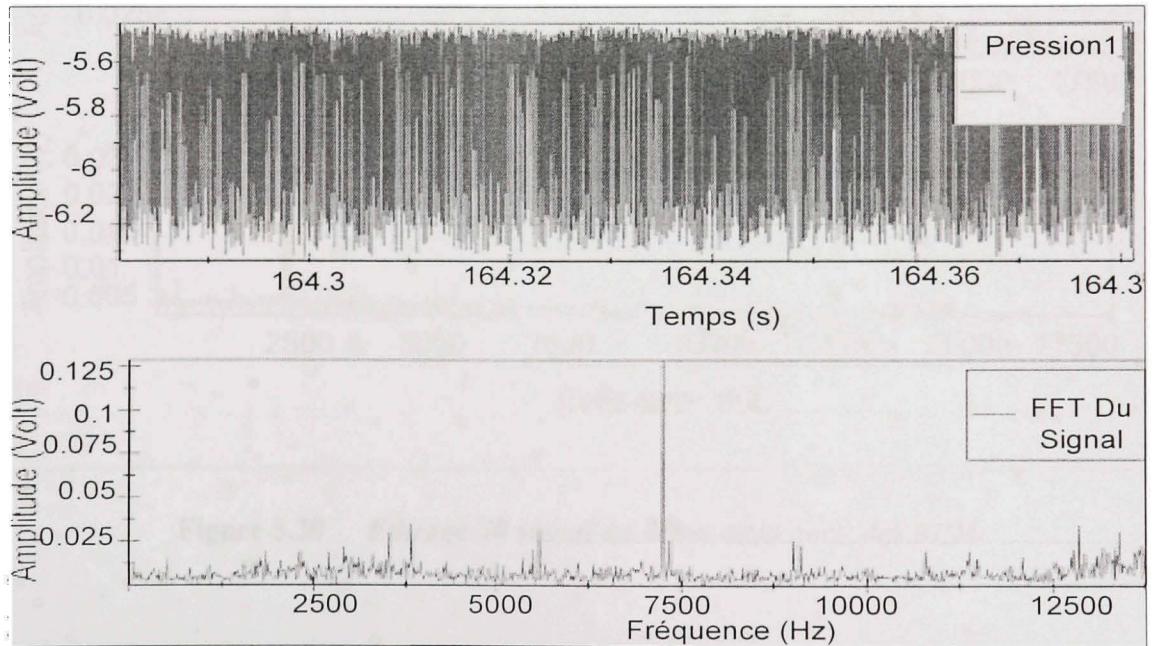


Figure 5.19 Réponse fréquentielle au-delà de 150 secondes.

Les Figure 5.20 et Figure 5.21 indiquent respectivement un filtrage du signal au niveau de 146.84 secondes et 152.66 secondes. Nous utilisons un filtre digital RIF (Filtre à réponse impulsionnelle finie). Le filtre est un passe bas qui possède une fréquence limite de 2600 Hz. Pour réaliser ce filtrage, il faut utiliser une fenêtre de Hamming de 25 points.

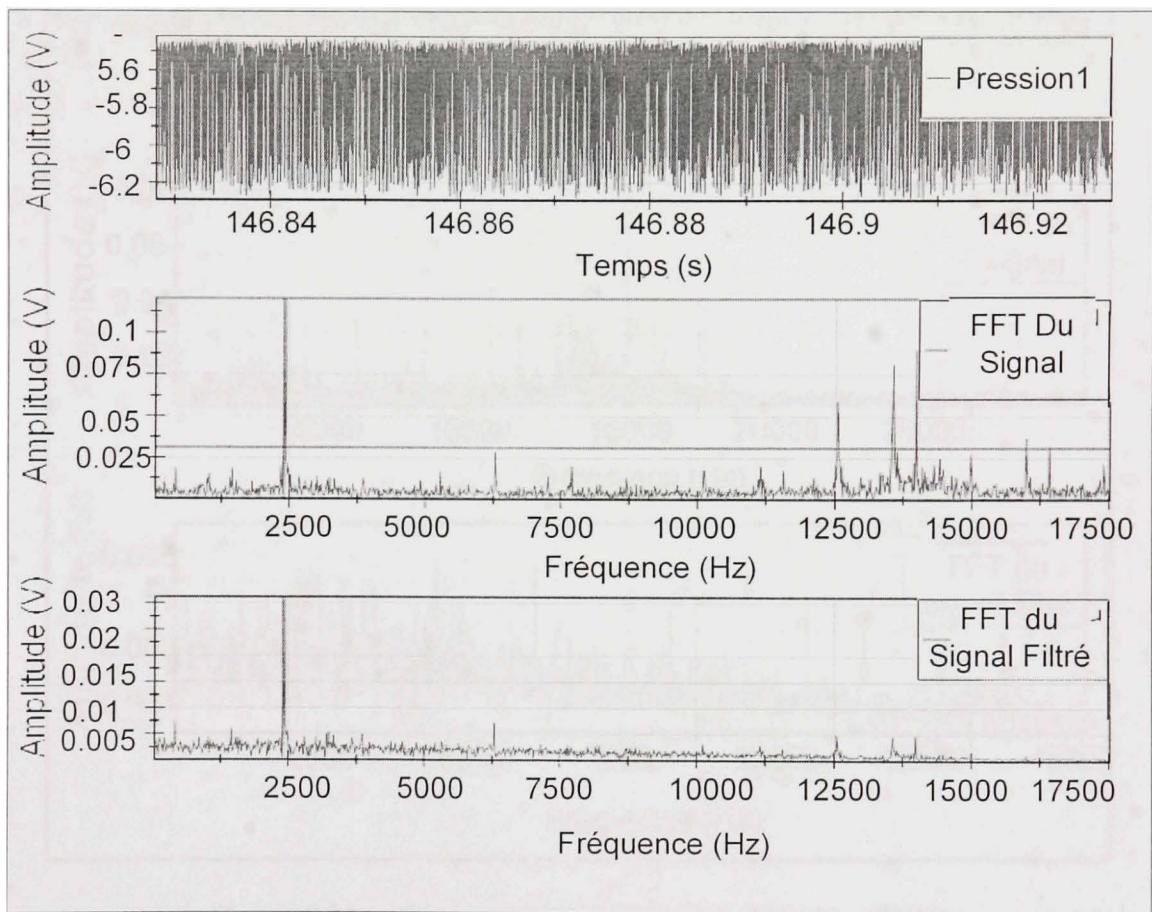


Figure 5.20 Filtrage du signal au début de la perte des RPM.

Comme le montre la Figure 5.20, il est facile de retrouver la fondamentale lorsque le signal se situe vers 146.84 secondes. Le filtrage permet de rejeter les harmoniques et de conserver

la fondamentale à 2500 Hz. Cette disposition montre qu'il est possible d'éliminer les turbulences créées lors de faibles RPM.

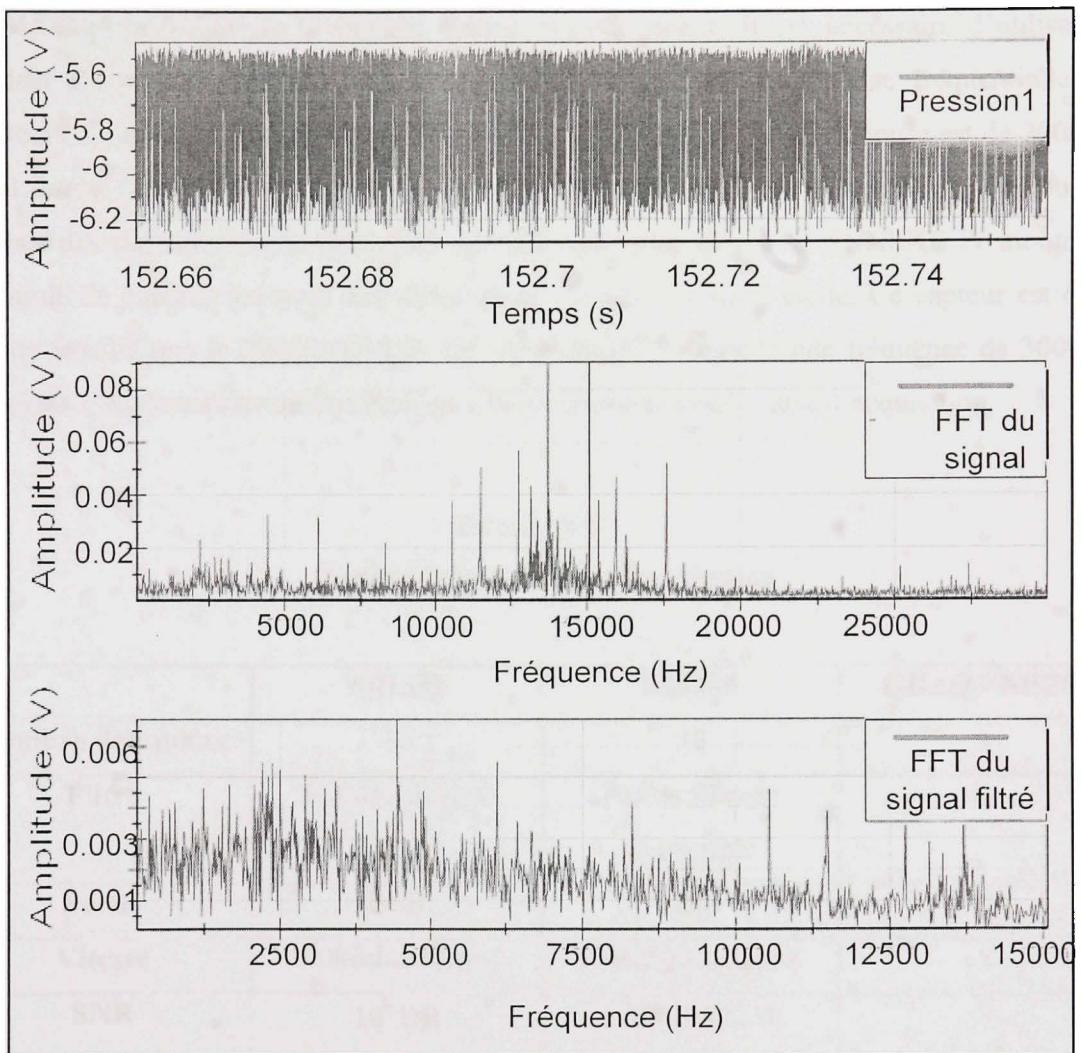


Figure 5.21 Filtrage du signal (période de faibles RPM).

Comme le montre la Figure 5.21, il devient difficile de retrouver la fondamentale lorsque le signal se situe vers 152.66 secondes. La fondamentale du signal se retrouve au alentour de 5000 Hz. Cette fréquence ne correspond pas à l'état du moteur. La fréquence fondamentale est supérieure à celle du filtre. Un filtrage n'est donc pas la solution efficace. Pour éviter ce

phénomène pendant les tests, il faudra agir à plusieurs niveaux. Il sera nécessaire d'augmenter le gain des capteurs. Cette disposition permettra d'augmenter la sensibilité et la détection des faibles RPM. Nous allons ainsi éliminer les turbulences créées lors de faibles RPM. Comme l'indique le filtrage réalisé précédemment, il est nécessaire d'utiliser un capteur de pression robuste. Il est nécessaire d'augmenter la réponse fréquentielle des capteurs. Comme le montre les ANNEXES II et III, la fréquence de coupure est de 2000Hz. La Tableau 5.1 présente la comparaison entre les différentes cartes d'acquisition. Il faudrait utiliser des capteurs de pression ayant une fréquence plus élevée. L'ANNEXE IV montre un exemple de capteur qui peut être utilisé dans le cadre de notre étude. Ce capteur est de la même famille que le SPM0102ND3. Le SPM0205HD4 possède une fréquence de 3000Hz. De même, les tests peuvent être réalisés à l'aide d'une nouvelle carte d'acquisition.

Tableau 5.1
Comparaison des cartes d'acquisition

	QDAQ	NI9205	QDAQ > Ni9205
Nombre de canaux	16	32	-
Filtre	Filtrage intégré	Pas de filtrage disponible	+
Sortie	USB	USB	=
Vitesse	100kéchantillon/s	250kéchantillon/s	+
SNR	10^6 DB	CMRR(DC to 60Hz..100 DB)	+

La présence d'un filtre intégré en amont de la chaîne d'acquisition nous permettra d'améliorer le signal obtenu sur l'ordinateur. Les capteurs de températures sont des résistances R25. L'ANNEXE II indique les caractéristiques de ce capteur. La Figure 5.22 indique l'évolution de la température pendant un cycle. Nous constatons un fonctionnement

normal de la température pendant ce cycle. Cette évolution se traduit par une évolution similaire de la température des deux PCB. Les températures varient entre 29 et 33 degrés.

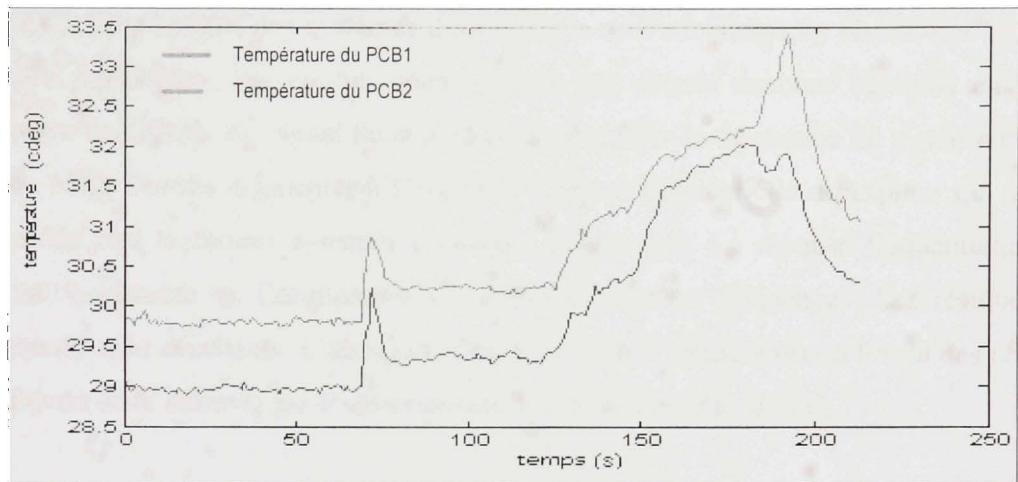


Figure 5.22 Évolution de la température pendant le cycle.

Ces variations de la température proviennent de la situation du régime du moteur. Ces températures sont similaires à l'évolution de la température dans la chambre du moteur. L'évolution des températures montre que nous avons une variation de température équivalente à un changement de régime. Pendant la phase des régimes de saturation, la température est pratiquement constante. Pendant la phase de décélération, nous assistons à une évolution croissante de la température. Par contre dans la phase des faibles RPM, il se produit une chute des températures. Nous pouvons conclure donc que l'acquisition de données de la température fournie des résultats équivalents à nos attentes.

Les essais réalisés en entreprise nous ont permis de vérifier la validité de notre système. Nous avons obtenu des avancés considérables pendant les tests. Nous avons réussi à atteindre la majorité des objectifs que nous nous sommes fixés. La plateforme réalisée en LabVIEW fourni des résultats excellents. Le système d'acquisition est compatible avec l'environnement de P&WC. Les résultats des systèmes d'acquisition sont excellents au niveau des hautes et moyennes fréquences. Par contre, nous n'avons pas obtenu de bons résultats en basses fréquences. Le filtrage du signal nous permet de récupérer la fréquence du signal autour de 2200Hz. Nous devons augmenter à l'avenir la réponse fréquentielle du capteur qui à notre avis semble être le facteur essentiel sur lequel il faut agir. La réponse fréquentielle nous permettra la réussite de l'acquisition au niveau des basses fréquences. Les résultats des températures sont excellents. L'acquisition de données des températures a fourni des résultats semblables à ceux détectés par les instruments des ingénieurs de P&WC.

CONCLUSION

L'acquisition de donnée est un domaine très populaire en industrie. Elle est nécessaire, car son but est de connaître et d'acquérir des informations en particulier dans des endroits où nous avons des difficultés d'accès. Ce domaine est en pleine mutation. Le but de notre étude était de concevoir une plateforme d'acquisition de donnée pour les moteurs de P&WC. Cette plateforme d'acquisition de donnée permettra d'acquérir des informations sur la pression et la température. Cette plateforme nécessite des outils sur les logiciels et matériels.

Le chapitre 2 a permis la présentation des technologies de capteurs. C'est ainsi qu'une attention a été apportée à son principe de fonctionnement. Suivant les fonctions, les choix des capteurs peuvent être différents. Il existe donc une multitude de capteurs qui peuvent se configurer différemment. Il existe également plusieurs familles de capteurs provenant de différentes technologies. Nous avons plusieurs critères de différenciation des capteurs. Ces critères traduisent la performance de ces capteurs. Ces derniers permettent de choisir le meilleur capteur ainsi que la meilleure technologie nécessaire pour l'application que nous voulons réaliser. C'est ainsi qu'une nouvelle technologie a été choisie, il s'agit des MEMS. Les principaux avantages des MEMS sont leur prix, leur taille, mais aussi leur facilité d'utilisation. Cette phase de conception des capteurs MEMS fut confiée au laboratoire CONCAVE de l'université Concordia.

Un inventaire des éléments nécessaires pour l'acquisition de donnée a été réalisé. Au chapitre 3, nous retrouvons la description des choix des équipements. C'est dans cette optique qu'une définition des matériels et logiciels a été réalisée dans ce chapitre. Suivant la description des matériels, un choix parmi les cartes d'acquisition de donnée a été réalisé. La carte NI9205 est la meilleure pour la réalisation de l'acquisition de donnée. Cette carte nécessite l'utilisation du châssis NI Cdaq-9172. Une description sommaire des principaux logiciels permettant l'acquisition de donnée a été réalisée. Notre choix s'est donc porté sur LabVIEW. Nous retrouvons également la description des capteurs de pression et de température. Cette

description des capteurs répond à la présentation des technologies au chapitre 2. Nous nous sommes ensuite basés sur ces acquis pour présenter les résultats en laboratoire au chapitre 4.

Le chapitre 4 présente d'abord une description des principales étapes et configuration de la carte d'acquisition. C'est ainsi qu'une présentation des différentes plateformes d'acquisition de donnée a été réalisée. Nous avons donc fait un choix de la plateforme qui peut être compatible à nos besoins en laboratoire. La suite logique de ce choix consiste à la description des modules de cette plateforme. Nous avons réalisé une présentation des PCB ainsi que les différentes versions des cartes d'alimentation. Le prototype ainsi réalisé nécessite donc une vérification de sa fonctionnalité. De nombreuses simulations ont été réalisées sur un ventilateur. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Les pressions donnent des résultats conformes aux attentes. Elle doit être idéalement fixée sur le ventilateur pour une meilleure précision.
- Les tests des capteurs de température fournissent des résultats excellents.
- L'affichage de la pression donne des résultats conformes, surtout pendant le régime de saturation du ventilateur.

Le chapitre 5 débute par la présentation de l'environnement chez P&WC. Il s'en suit une présentation des différents aménagements du système d'acquisition de donnée pour répondre aux exigences de cet environnement. C'est dans cette optique qu'une présentation des connecteurs militaires ainsi que celle du PCB a été réalisée. Les simulations chez P&WC nous ont ainsi permis d'obtenir les conclusions suivantes :

- Le régime de saturation fourni de la pression est conforme à ceux obtenus par les ingénieurs de Pratt and Whitney Canada.
- Le régime de décélération fourni de la pression est conforme à ceux obtenus par les ingénieurs de Pratt and Whitney Canada.
- Le régime du fonctionnement de faible pression fourni des RPM non conforme à ceux obtenus par les ingénieurs de Pratt and Whitney Canada.
- Les températures obtenues sont conformes à ceux obtenus par les ingénieurs de Pratt and Whitney Canada.

- La température augmente lorsque le nombre de RPM augmente.
- Le signal de la pression se sature très rapidement.

L'acquisition de donnée effectuée sur le moteur de P&WC constitue une avancée importante. Le prix de ce système, sa facilité de configuration ainsi que sa portabilité constituent les principaux avantages par rapport aux systèmes d'acquisition de P&WC. Ces avantages montrent que la plateforme réalisée a un avenir prometteur chez Pratt and Whitney.

RECOMMANDATIONS

Les principaux objectifs de ce mémoire ont été réalisés. Les tests des faibles RPM n'ont pas fourni les résultats espérés. À l'avenir, il serait souhaitable de faire plus de tests en entreprises pour pouvoir ainsi apporter les modifications nécessaires. Face à ce problème des basses fréquences (faibles RPM), plusieurs hypothèses ont été échafaudées. Ces hypothèses sont les suivantes :

- La réponse fréquentielle du capteur de pression (voir ANNEXE II) est peut-être la cause de la perte des RPM. Cette réponse fréquentielle donne une sensibilité élevée à partir de 2000 Hz.
- La carte d'acquisition NI9205 possède toutes les caractéristiques pour effectuer la redondance des capteurs. Le châssis NICDAQ9172 comporte 8 entrées. Ces entrées peuvent recevoir une carte NI9205. On en déduit alors que le châssis permet la configuration de 128 voies différentielles. Ce châssis ne possède pas toutes les ressources nécessaires pour éliminer le bruit du moteur. Elle ne possède pas un filtre analogique incorporé et sa vitesse maximale est de 250 kéchantillons/seconde. Une nouvelle carte d'acquisition possédant ces fonctions est nécessaire pour faire les tests. Une carte présentant ces caractéristiques a été précisée dans l'annexe.
- La réalisation d'un filtre analogique pourrait annuler les effets du bruit, car la réalisation d'un filtrage sur LabVIEW est inefficace.
- La position des différents capteurs pourrait être modifiée. On pourrait ainsi positionner les capteurs de pression sur les lames du moteur ou les résultats sont meilleurs.
- Il se peut que la présence de la saturation soit due à alimentation des PCB. Le PCB est alimenté par une tension de 5v. La plage d'alimentation montre que les spécifications sont comprises entre 1,5 et 5,5 volts. Nous pouvons réduire cette tension à deux volts par exemple.

À l'avenir, les tests sur des équipements sans fil sont souhaitables dans le cas de l'implémentation du système. Ces tests devraient permettre d'éliminer les fils qui occupent pour l'instant un espace très important dans le dispositif de l'acquisition de donnée.

ANNEXE I

LES DIFFÉRENTS MODULES ENFICHABLES SUR LE CHÂSSIS NICDAQ-9172

	Modèle	Voies	Gamme	Résolution	Description	Fréquence d'échantillonnage
Entrée analogique	NI 9201	8	± 10 V	12 bits	Solutions économiques	500 kéch./s
	NI 9203	8	± 20 mA	16 bits	Courant	200 kéch./s
	NI 9205	32	± 10 V	16 bits	Multiplexé	250 kéch./s
	NI 9206	16	± 10 V	16 bits	Isolation 500 V	250 kéch./s
	NI 9211	4	± 80 mV	24 bits	Thermocouple	14 éch./s
	NI 9215	4	± 10 V	16 bits	Simultané	100 kéch./s/voie
	NI 9217	4	100 Ω	16 bits	RTD	400 éch./s
	NI 9219	4	Divers	24 bits	Isolation universelle, voie-à-voie	100 éch./s/voie ?
	NI 9221	8	± 60 V	12 bits	Haute tension	800 kéch./s
	NI 9229	4	± 60 V	24 bits	Isolation voie-à-voie	50 kéch./s/voie
Sortie analogique	NI 9233	4	± 5 V	24 bits	Capteurs IEPE	50 kéch./s/voie
	NI 9237	4	± 25 mV/V	24 bits	Contrainte/pont	50 kéch./s/voie
	NI 9239	4	± 20 V	24 bits	Isolation voie-à-voie	50 kéch./s/voie
	NI 9264	16	± 10 V	16 bits	SA de tension	25 kéch./s/voie
	NI 9263	4	± 10 V	16 bits	SA de tension	100 kéch./s/voie
	NI 9265	4	0 à 20 mA	16 bits	SA de courant	100 kéch./s/voie
	NI 9403	32	5 V TTL	-	E/S N	100 kHz

Numérique	NI 9401	8	5 V TTL	-	E/S N	10 MHz
	NI 9411	6	5 à 24 V	-	EN	2 MHz
	NI 9421	8	24 V	-	EN (courant entrant)	10 kHz
	NI 9422	8	24 à 60 V	-	EN (courant entrant/courant sortant)	4 kHz
	NI 9423	8	24 à 30 V	-	EN (courant entrant)	1 MHz
	NI 9225	32	12 à 24 V	-	EN (courant entrant)	140 kHz
	NI 9235	4	5 à 250 V	-	Universel	333 Hz
	NI 9472	8	24 V	-	SN (courant sortant)	10 kHz
	NI 9474	8	5 à 30 V	-	SN (courant sortant)	1 MHz
	NI 9476	32	6 à 36 V	-	SN (courant sortant)	2 kHz
Relais	NI 9477	32	5 à 60 V	-	SN (courant entrant)	125 kHz
	NI 9481	4	250 Vac	-	Relais statiques	50 Hz
	NI 9485	8	±60 V	-	Relais statiques	50 Hz

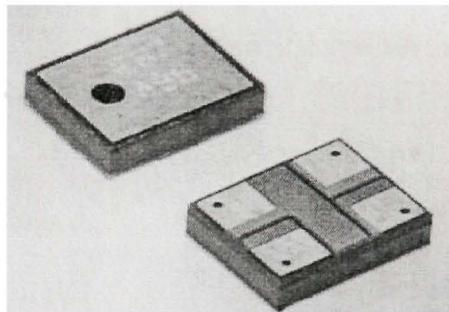
ANNEXE II

PRÉSENTATION DE LA FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR DE PRESSION SPM0102ND3-C



SPM0102ND3

"Mini" SiSonic™ Microphone Specification



Knowles Acoustics
1151 Maplewood Drive
Itasca, IL 60143

Si sonic

Knowles Acoustics, a division of Knowles
Electronics, LLC.

Revision: C
1 of 10



SPM0102ND3

1. DESCRIPTION AND APPLICATION

1.1 Description

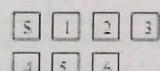
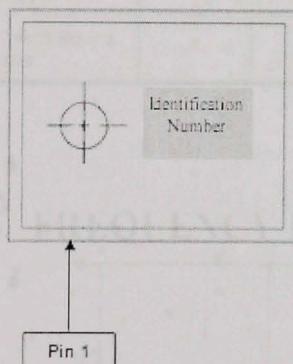
"Mini" Surface Mount Silicon Microphone
with standard RF Protection

1.2 Application

Hand held telecommunication devices

2. PART MARKING

Identification Number Convention



S: Manufacturing Location
"S" – Knowles Electronics Suzhou
Suzhou, China

"No Alpha Character" – Knowles Electronics Itasca
Itasca, IL, USA

"E" – Engineering Samples

Digits 1 – 6: Job Identification Number

3. TEMPERATURE RANGE

3.1 Operating Temperature Range: -40°C to +100°C

3.2 Storage Temperature Range: -40°C to +100°C

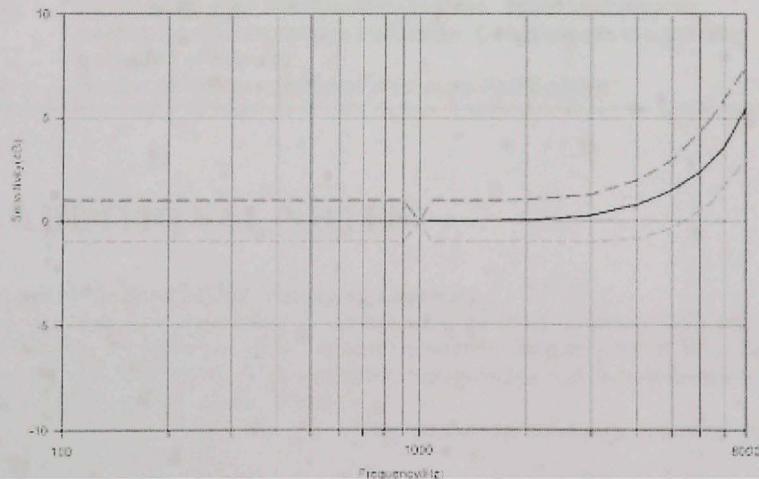


SPM0102ND3

4. ACOUSTIC & ELECTRICAL SPECIFICATIONS

	Symbol	Condition	Limits			Unit
			Min.	Nom.	Max.	
Directivity		Omnidirectional				
Sensitivity	S	@ 1kHz (0dB=1V/Pa)	-48	-42	-38	dB
Output Impedance	Z _{out}	@ 1kHz (0dB=1V/Pa)	n/a	n/a	100	Ω
Current Consumption	I _{dc}	across 1.5 to 5.5 volts	0.100	n/a	0.250	mA
Signal to Noise Ratio	S/N	@ 1kHz (0dB=1V/Pa)	65	69	n/a	dB
Supply Voltage	V _s		1.5	n/a	5.5	V
Typical Input Referred Noise	ENL	A-weighted	n/a	35	n/a	dBA SPL
Sensitivity Loss across Voltage		Change in sensitivity over 5.5v to 1.5v	No Change Across Voltage Range			dB
Maximum Input Sound Level			At 100dB SPL, THD < 1% At 115dB SPL, THD = < 10%			dB

5. FREQUENCY RESPONSE CURVE



SiSonic

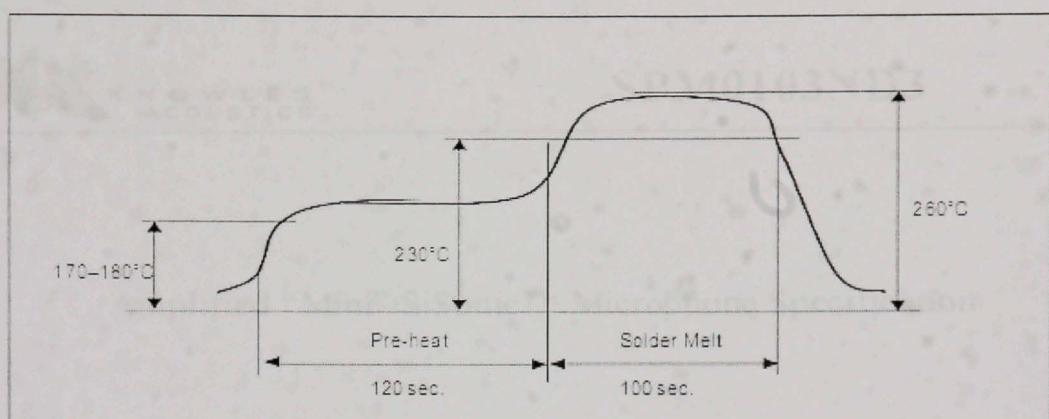
Knowles Acoustics, a division of Knowles
Electronics, LLC.

Revision: C
3 of 10



SPM0102ND3

11. SOLDER REFLOW PROFILE



<u>Stage</u>	<u>Temperature Profile</u>	<u>Time (maximum)</u>
Pre-heat	170 ~ 180 C	120 sec.
Solder Melt	Above 230 C	100 sec.
Peak	260 C maximum	30 sec.

Notes:

1. Do not pull a vacuum over the port hole of the microphone. Pulling a vacuum over the port hole can damage the device.
2. Do not board wash after the reflow process. Board washing and cleaning agents can damage the device. Do not expose to ultrasonic processing or cleaning.
3. Number of Reflow = recommend no more than 3 cycles.

12. ADDITIONAL NOTES

- (A) Packaging (reference SiSonic_Packaging_Spec.pdf)
- (B) Shelf life: Twelve (12) months when devices are to be stored in factory supplied, unopened ESD moisture sensitive bag under maximum environmental conditions of 30°C, 70% R.H.
- (C) Exposure: Devices should not be exposed to high humidity, high temperature environment. MSL (moisture sensitivity level) Class 2A.
- (D) Out of bag: Maximum of 90 days out of ESD moisture sensitive bag, assuming maximum conditions of 30°C/70% R.H.

SiSonic

Knowles Acoustics, a division of Knowles
Electronics, LLCRevision: C
6 of 10

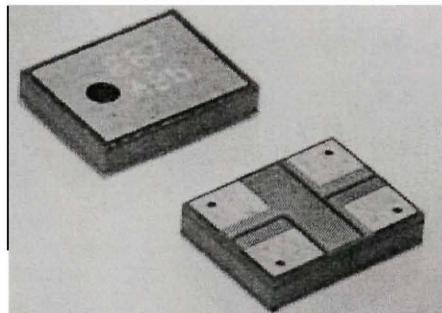
ANNEXE III

PRÉSENTATION DE LA FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR DE PRESSION SPM0103ND3



SPM0103ND3

Amplified "Mini" SiSonic™ Microphone Specification



Knowles Acoustics
1151 Maplewood Drive
Itasca, IL 60143

Si

Knowles Acoustics,
a division of Knowles Electronics, LLC.

Revision: C
1 of 10



KNOWLES
ACOUSTICS

SPM0103ND3

1. DESCRIPTION AND APPLICATION

1.1 Description

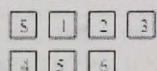
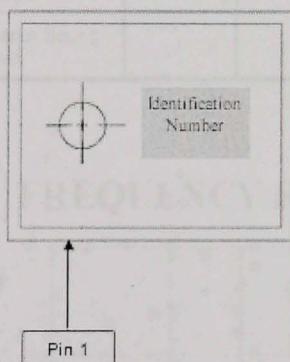
Amplified "Mini" Surface Mount Silicon Microphone
with standard RF Protection

1.2 Application

Hand held telecommunication devices

2. PART MARKING

Identification Number Convention



S: Manufacturing Location
"S" – Knowles Electronics Suzhou
Suzhou, China

"N" – Alpha Character – Knowles Electronics Itasca
Itasca, IL USA

"E" – Engineering Samples

Digits 1 – 6: Job Identification Number

3. TEMPERATURE RANGE

3.1 Operating Temperature Range: -40°C to +100°C

3.2 Storage Temperature Range: -40°C to +100°C

Si

Knowles Acoustics,
a division of Knowles Electronics, LLC.

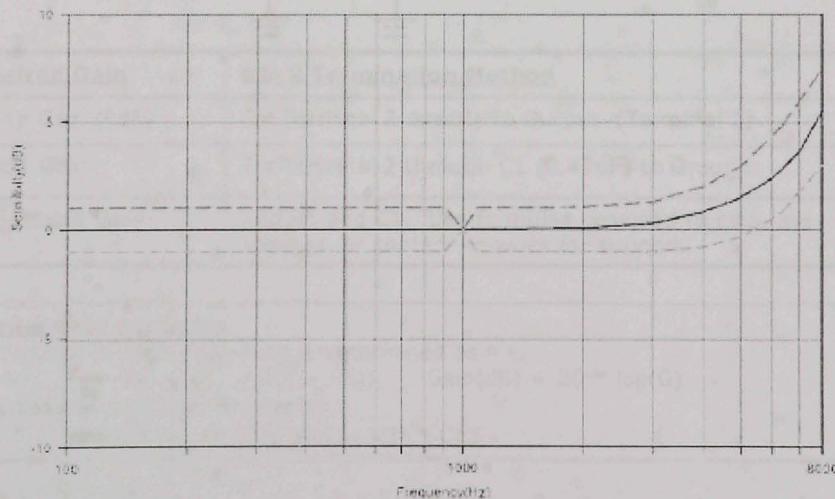
Revision C
2 of 10


SPM0103ND3

4. ACOUSTIC & ELECTRICAL SPECIFICATIONS

	Symbol	Condition	Limits			Unit
			Min.	Nom.	Max.	
Directivity		Omnidirectional				
Sensitivity	S	@ 1kHz (0dB=1V/Pa)	-28	-22	-18	dB
Output Impedance	Z _{out}	@ 1kHz (0dB=1V/Pa)	n/a	n/a	100	Ω
Current Consumption	I _{dc}	across 1.5 to 5.5 volts	0.100	n/a	0.350	mA
Signal to Noise Ratio	S/N	@ 1kHz (0dB=1V/Pa)	55	59	n/a	dB
Supply Voltage	V _s		1.5	n/a	5.5	V
Typical Input Referred Noise	ENL	A-weighted	n/a	35	n/a	dBA SPL
Sensitivity Loss across Voltage		Change in sensitivity over 5.5v to 1.5v	No Change Across Voltage Range			dB
Maximum Input Sound Level		At 100dB SPL, THD < 1% At 115dB SPL, THD = < 10%				dB

5. FREQUENCY RESPONSE CURVE



Si

 Knowles Acoustics,
 a division of Knowles Electronics, LLC

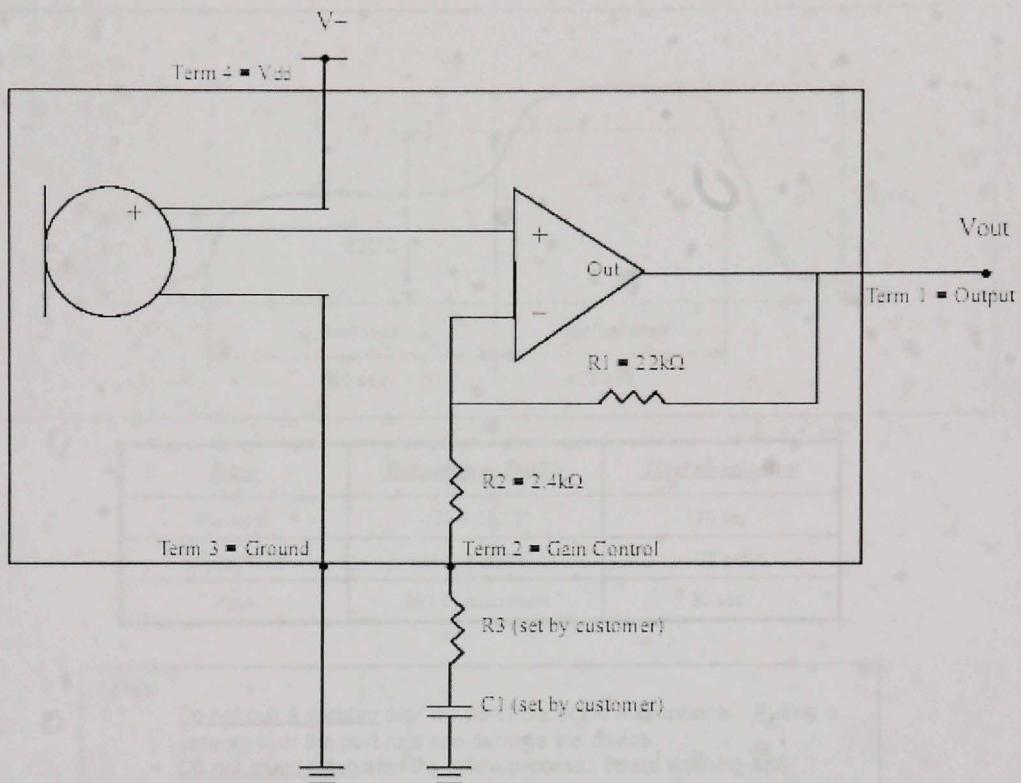
 Revision: C
 5 of 10



**KNOWLES
ACOUSTICS**

SPM0103ND3

9. RECOMMENDED INTERFACE CIRCUIT



Desired Gain	Pin 2 Termination Method
Unity Gain (0dB)	Tie Terminal 2 directly to Output (Terminal 1).
20dB Gain	Tie Terminal 2 through C1 (0.47μF) to Ground.
Adjustable Gain	Add R3 and C1. Use formulas provided to calculate settings, or contact Knowles for support.

Setting Gain Formulas:

Gain of non-inverting Op-Amp is determined as:

$$\rightarrow G=1-\{R_1 / (R_2 + R_3)\}$$

High-pass-filter Corner Frequency:

$$\rightarrow C.F. = 1 / \{2\pi(R_2 + R_3) * C1\}$$

Si



Knowles Acoustics,
a division of Knowles Electronics, LLC.

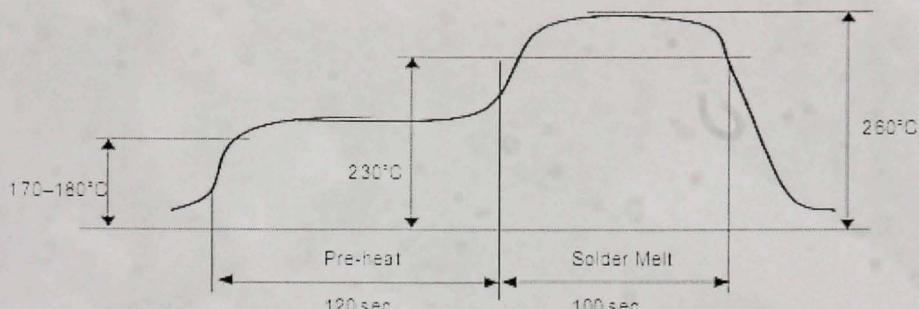
Revision: C
6 of 10



**KNOWLES
ACOUSTICS**

SPM0103ND3

11. SOLDER REFLOW PROFILE



<u>Stage</u>	<u>Temperature Profile</u>	<u>Time (maximum)</u>
Pre-heat	170 ~ 180 °C	120 sec.
Solder Melt	Above 230 °C	100 sec.
Peak	260 °C maximum	30 sec.

Notes:

1. Do not pull a vacuum over the port hole of the microphone. Pulling a vacuum over the port hole can damage the device.
2. Do not board wash after the reflow process. Board washing and cleaning agents can damage the device. Do not expose to ultrasonic processing or cleaning.
3. Number of Reflow = recommend no more than 3 cycles.

12. ADDITIONAL NOTES

- (A) Packaging (reference SiSonic_Packaging_Spec.pdf)
- (B) Shelf life: Twelve (12) months when devices are to be stored in factory supplied, unopened ESD moisture sensitive bag, under maximum environmental conditions of 30°C, 70% R.H.
- (C) Exposure: Devices should not be exposed to high humidity, high temperature environment. MSL (moisture sensitivity level) Class 2A.
- (D) Out of bag: Maximum of 90 days out of ESD moisture sensitive bag, assuming maximum conditions of 30°C/70% R.H.

Si

Knowles Acoustics,
a division of Knowles Electronics, LLC

Revision: C
8 of 10

ANNEXE IV

PRÉSENTATION DE LA FICHE TECHNIQUE DU CAPTEUR DE TEMPÉRATURE

PRODUCT BRIEF



The alternative Temperature Measurement

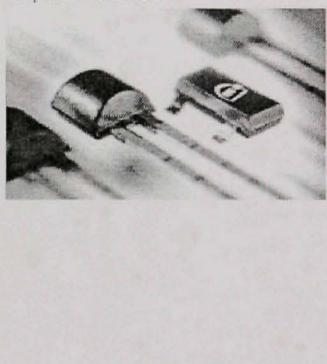
Applications

- Automotive
 - Dashboard
 - Airconditioner
- Home Appliances
 - Watertemperature in Washing Machines, Dish Washer
 - Fridges, Freezers
- Airconditioner
 - System and Room Temperature
- Communications
 - Ink Jet Printer: Print Head Temperature
 - Fan Control
- Industry
 - Power Supply
 - OverTemperature Protection
 - Temperature Compensation

Features

- Silicon based temperature sensitive resistor with positive temperature coefficient
- Fast response
- Excellent long time stability
- Linear output
- High reliability due to silicon based construction
- Polarity independent due to symmetrical construction
- $\pm 1\%$ and $\pm 3\%$ resistance tolerance R_{25}
- Temperature range -50 to +150°C (60 to 300°F)
- Two resistance types:
 $R_{25} = 1\text{ K}\Omega$ and $2\text{ K}\Omega$

KT/KTY-Series



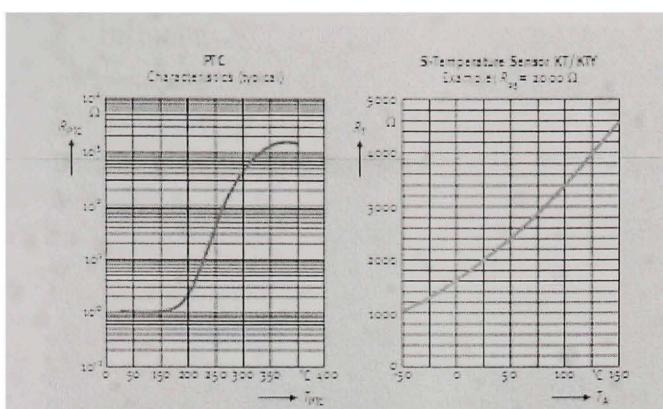
K T / K T Y - S e r i e s

Miniature Silicon based
Temperature Sensors



Never stop thinking.

PRODUCT BRIEF



Silicon Based Temperature Sensors Vs. Thermistors

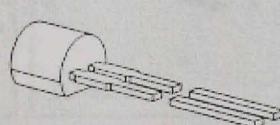
Why not Silicon Sensors instead of PTC Thermistors? Quite simple, KT-Series sensors have excellent long-term stability, have a linear characteristic, have a resistance tolerance at 25°C of ±1% or ±3% and are available as a leaded or as an SMD component! Due to their small size they are space saving and have a fast response time. Not only are they technologically superior devices, but they are semiconductor devices sharing production synergies with standard electronic components, giving true low-cost benefits to the user!

Resistance	Tolerance	SOT-23	Sales Code	TO-92 Mini	Sales Code
1970	±1%	KTY13-5	Q62705-K249	KTY11-5	Q62705-K246
2000	±1%	KTY13-6	Q62705-K250	KTY11-6	Q62705-K246
2030	±1%	KTY13-7	Q62705-K251	KTY11-7	Q62705-K247
270	±1%	KTY23-5	Q62705-K252	KTY21-5	Q62705-K258
1000	±1%	KTY23-6	Q62705-K253	KTY21-6	Q62705-K259
1030	±1%	KTY23-7	Q62705-K254	KTY21-7	Q62705-K260
2000	±3%	KT130	Q62705-K333	KT110	Q62705-K332
1000	±3%	KT230	Q62705-K335	KT210	Q62705-K334

TO-92 Mini is a package specially designed for our KT-Series Temperature sensors. Its compact size results in a significantly lower thermal mass which gives a greatly improved response time. As a leaded component it lends itself ideally for further fabrication into temperature sensor probes of greatly reduced diameter, so sensor housings can be made physically smaller, again improving the thermal response time.



SOT-23



TO-92 Mini

Temperature sensing has in the past predominantly been the domain of PTC Thermistors. Infineon Technologies offers with the KT-Series Silicon Temperature Sensors a cost competitive alternative.

How to reach us:

<http://www.infineon.com>

Infineon Technologies AG
Richard-Dausen-Strasse 70
8173 München
Tel. (+49) 89-5 40 85
Fax. (+49) 89-5 40 87

Infineon Technologies (AP) Ltd.
85 New Industrial Road
Singapore 555211
Tel. (+65) 456-02-91
Fax. (+65) 456-02-91

Infineon Technologies Inc., Corp.
Silicon & Sensors Marketing Group
2125 East Franklin Rd.
Northvale, NJ 07647
Tel. (+1) 201-74-23-22
Fax. (+1) 201-74-23-21

Published by
Infineon Technologies AG,
St. Martin-Strasse 70
8173 München
© Infineon Technologies AG 2001. All Rights Reserved.

Attention please:
The information given is believed to be accurate in compliance
with our present knowledge and is given without guarantee or obligation.
Terms of delivery and rights to technical changes reserved.
We reserve the right to amend any and all information, including but
not limited to the contents of this information, without prior notice regarding
public, descriptive and/or related material.
Infineon Technologies AG is an approved CEC manufacturer.

Information:
For further information on technical, delivery terms and
conditions and other questions please contact your nearest
Infineon Technologies office in Germany or our
Infineon Technologies Representative worldwide.

Warning:
Our electrical lead terminals contain tin-lead solder.
Please observe the following safety instructions:
Contact your nearest Infineon Technologies office.

Infineon Technologies Components may only be used in life-
support devices or systems if a written agreement has been
reached between Infineon Technologies and the customer.
Infineon Technologies reserves the right to discontinue or modify
any products at any time without notice. Infineon Technologies
and its suppliers are not liable for damages resulting from
the use of any products described herein. Infineon Technologies
makes no warranties regarding the use in life-support applications
of any products. It is the responsibility of the customer to make
its own determination as to whether a particular product
is suitable for a particular application.



Silicon Temperature Sensors

KT 100	KTY 10-x
KT 110	KTY 11-x
KT 130	KTY 13-x
KT 210	KTY 21-x
KT 230	KTY 23-x
KTY 16-6	KTY 19-6

Features

- Temperature dependent resistor with positive temperature coefficient
- Temperature range – 50 °C to + 150 °C (– 60 F to 300 F)
- Available in SMD or leaded or customized packages
- Linear output
- Excellent longterm stability
- Polarity independent due to symmetrical construction
- Fast response time
- Resistance tolerances (R_{25}) of $\pm 3\%$ or $\pm 1\%$



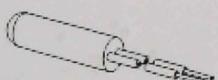
Modified TO-92



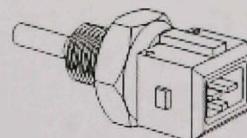
TO-92 Mini



SOT-23



KTY 16-6



KTY 19-6



KT- and KTY-Series Temperature Sensors

General Technical Data: KT- and KTY-Series Temperature Sensors

These temperature sensors are designed for the measurement, control and regulation of air, gases and liquids within the temperature range of -50°C to $+150^{\circ}\text{C}$. The temperature sensing element is an n-conducting silicon crystal in planar technology. The gentle curvature of the characteristic, $R_T = f(T_A)$, is described as a regression parabola in the following expressions.

The resistance of the sensor can be calculated for various temperatures from the following second order equation, valid over the temperature range -30°C to $+130^{\circ}\text{C}$.

$$R_T = R_{25} \times (1 + \alpha \times \Delta T_A + \beta \times \Delta T_A^2) = f(T_A)$$

with: $\alpha = 7.88 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$; $\beta = 1.937 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-2}$

The temperature factor k_T can be derived from this:

$$k_T = \frac{R_T}{R_{25}} = 1 + \alpha \times \Delta T_A + \beta \times \Delta T_A^2 = f(T_A)$$

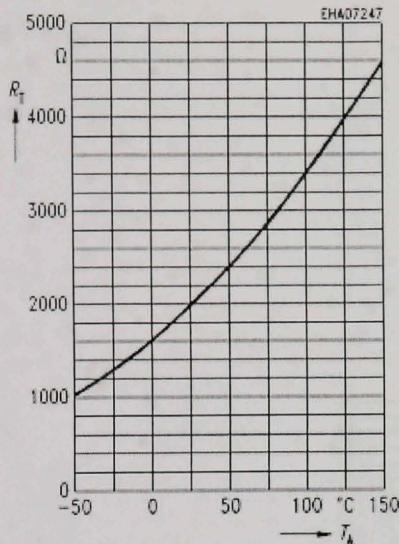
The temperature at the sensor can be calculated from the change in the sensors resistance from the following equation, which approximates the characteristic curve.

$$T = \left(25 + \frac{\sqrt{\alpha^2 - 4 \times \beta - 4 \times \beta \times k_T} - \alpha}{2 \times \beta} \right) \text{ C}$$



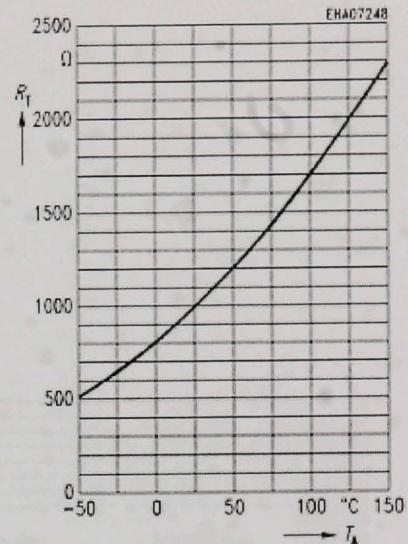
KT- and KTY-Series Temperature Sensors

Sensor Resistance $R_T = k_+ \times R_{25} = f(T_A)$
 $I_B = 1 \text{ mA}$; Example: $R_{25} = 2000 \Omega$

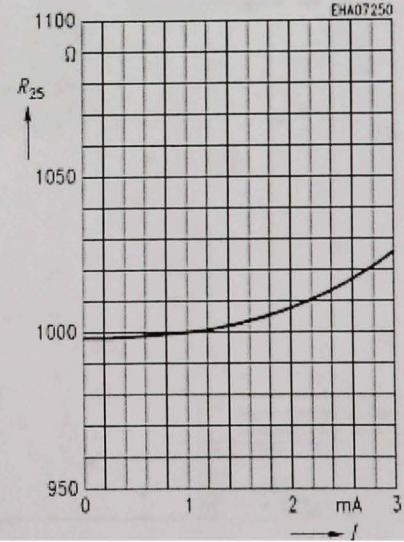
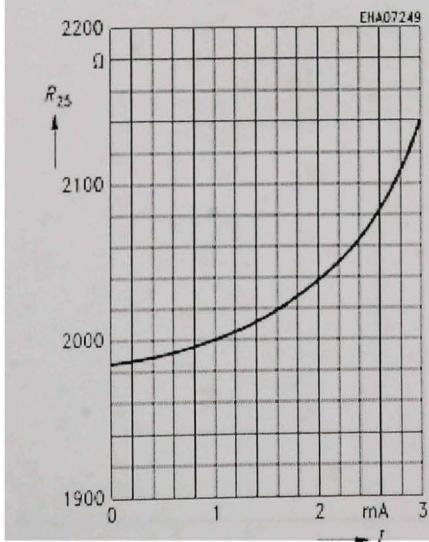


Typical Dependence of Sensor Resistance on Supply Current
Example: KTY 10-6 in oil at $T_A = 25^\circ\text{C}$

Sensor Resistance $R_T = k_+ \times R_{25} = f(T_A)$
 $I_B = 1 \text{ mA}$; Example: $R_{25} = 1000 \Omega$

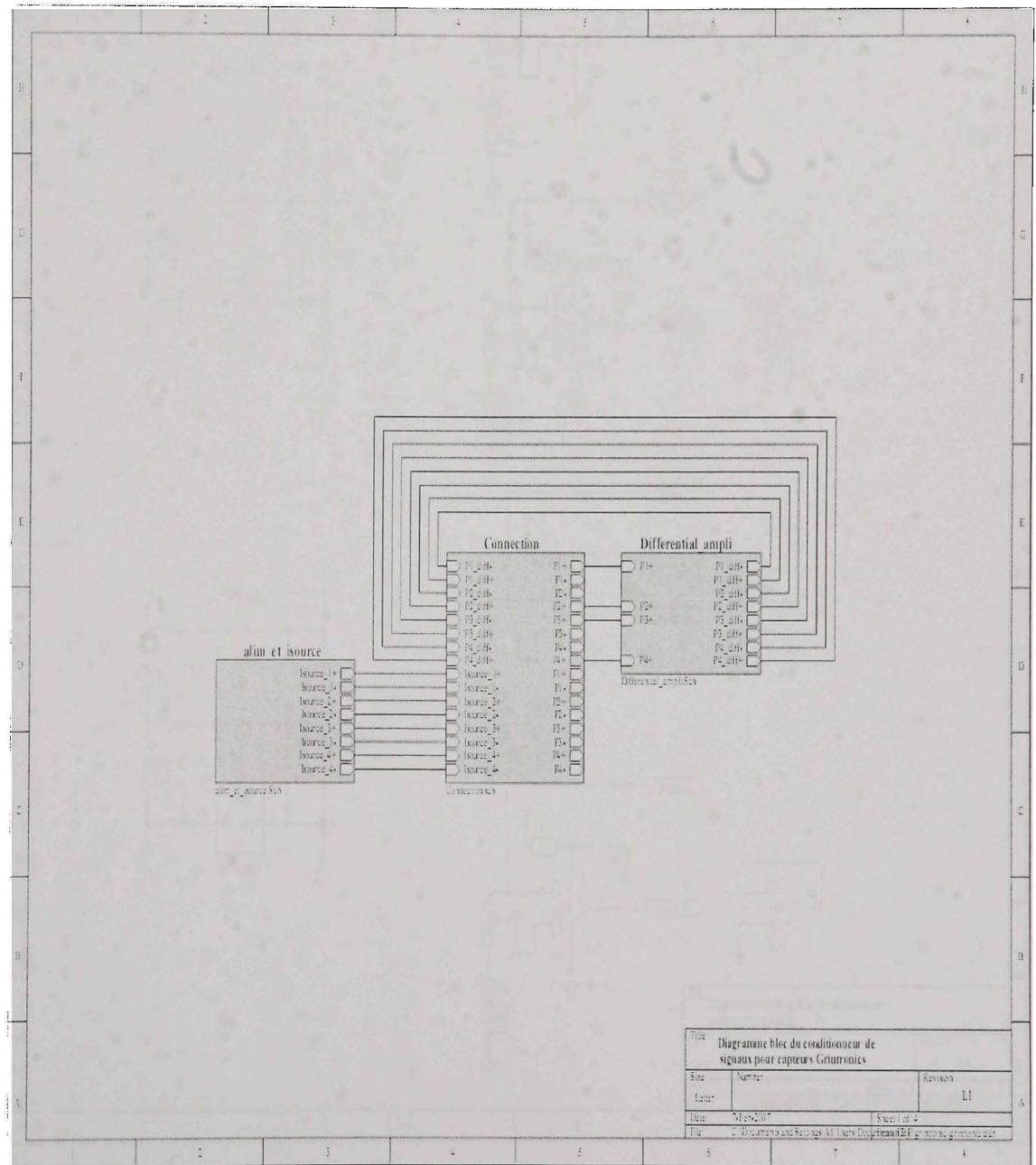


Typical Dependence of Sensor Resistance on Supply Current
Example: KTY 21-6 in oil at $T_A = 25^\circ\text{C}$



ANNEXE V

PRÉSENTATION DE LA CARTE D'ALIMENTATION



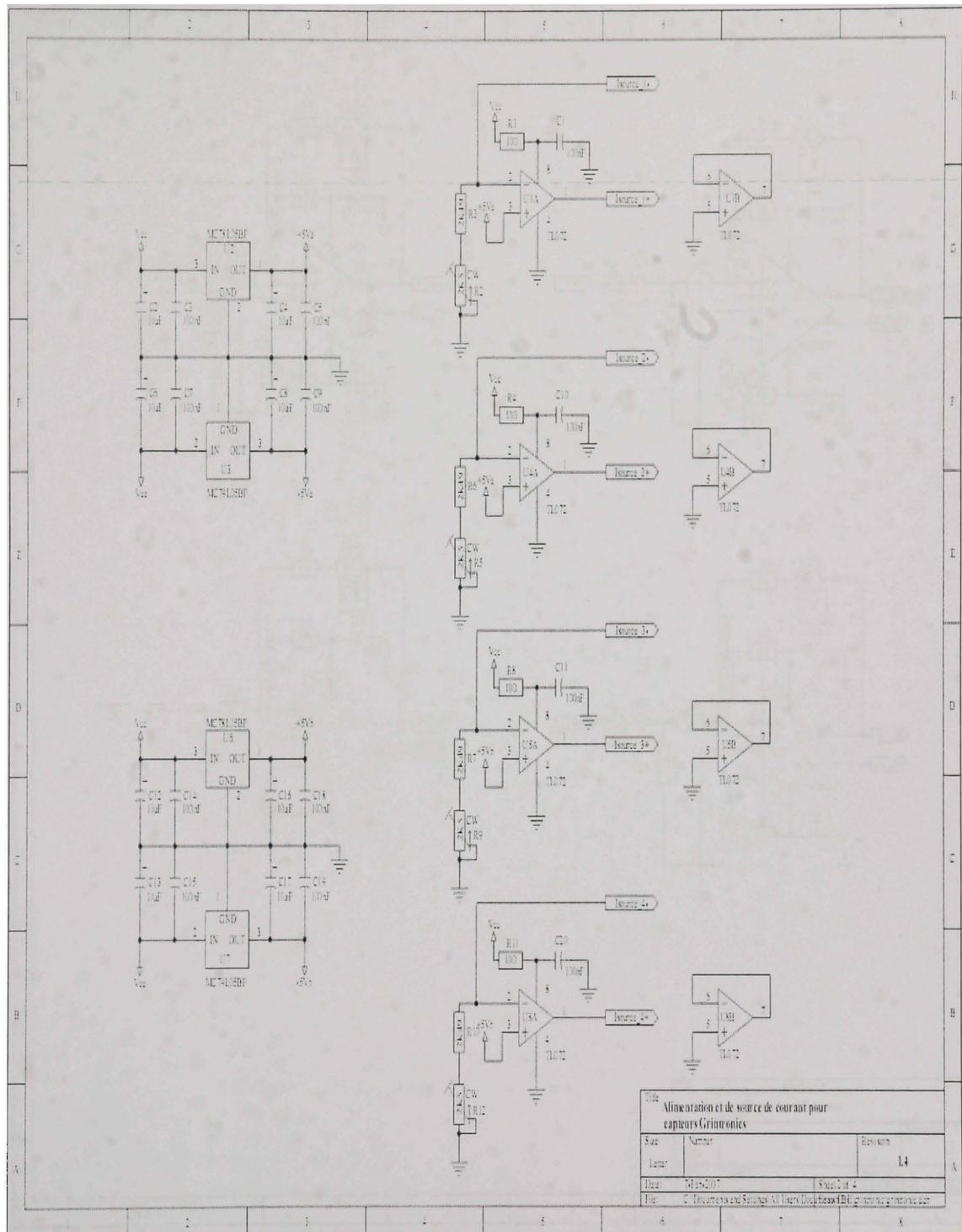
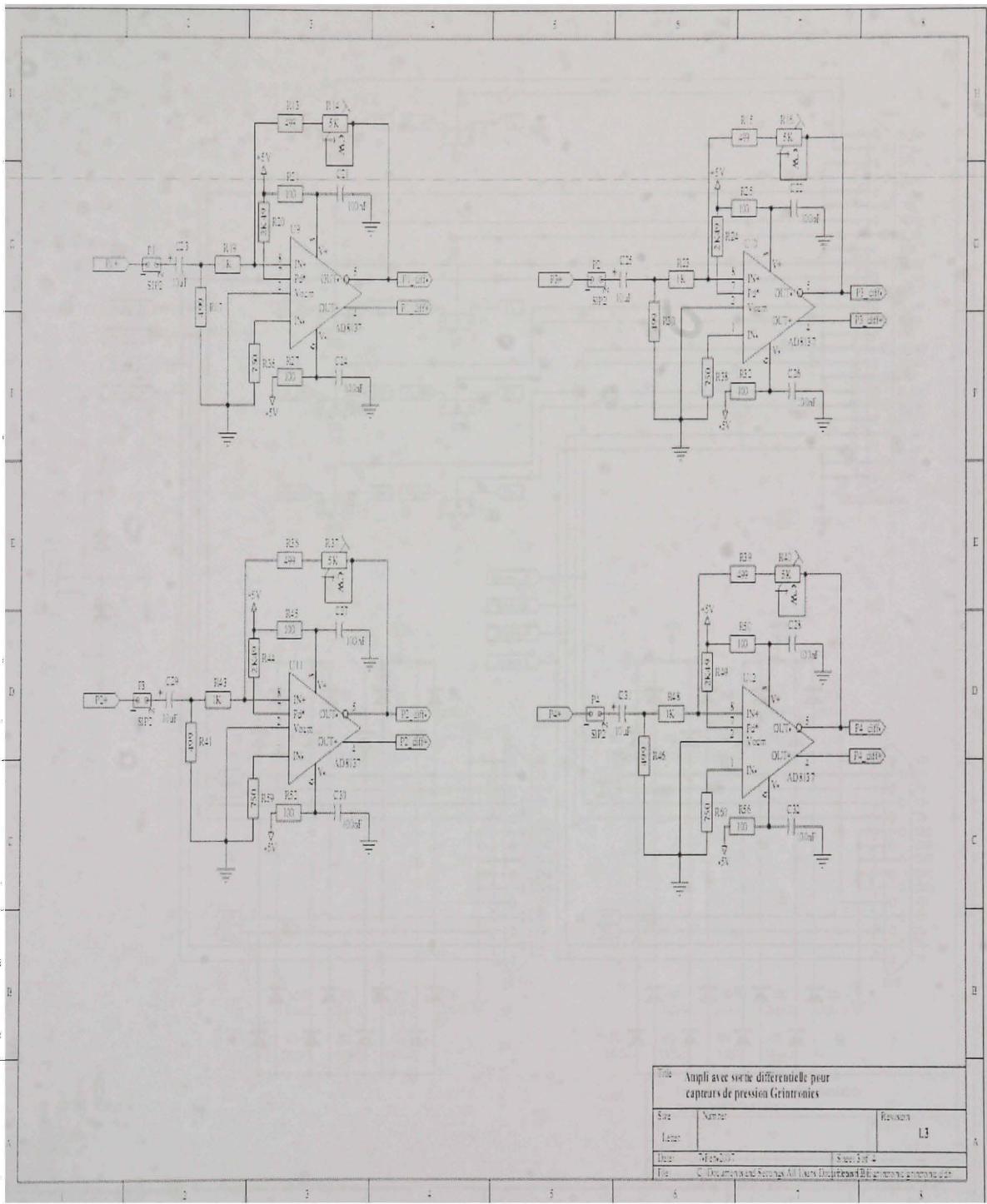
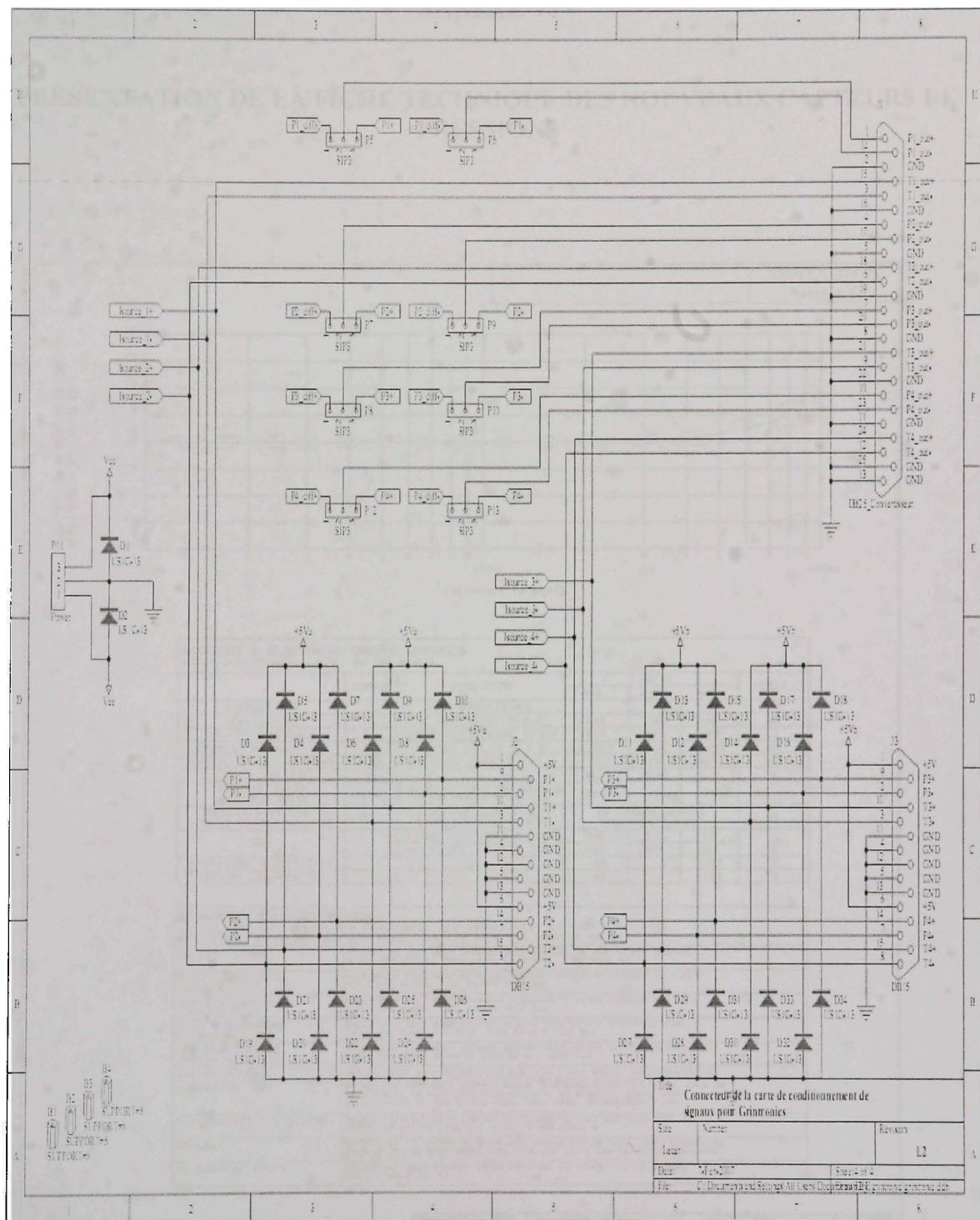


Fig. Alimentation et de source de courant pour capteurs Grimtronics

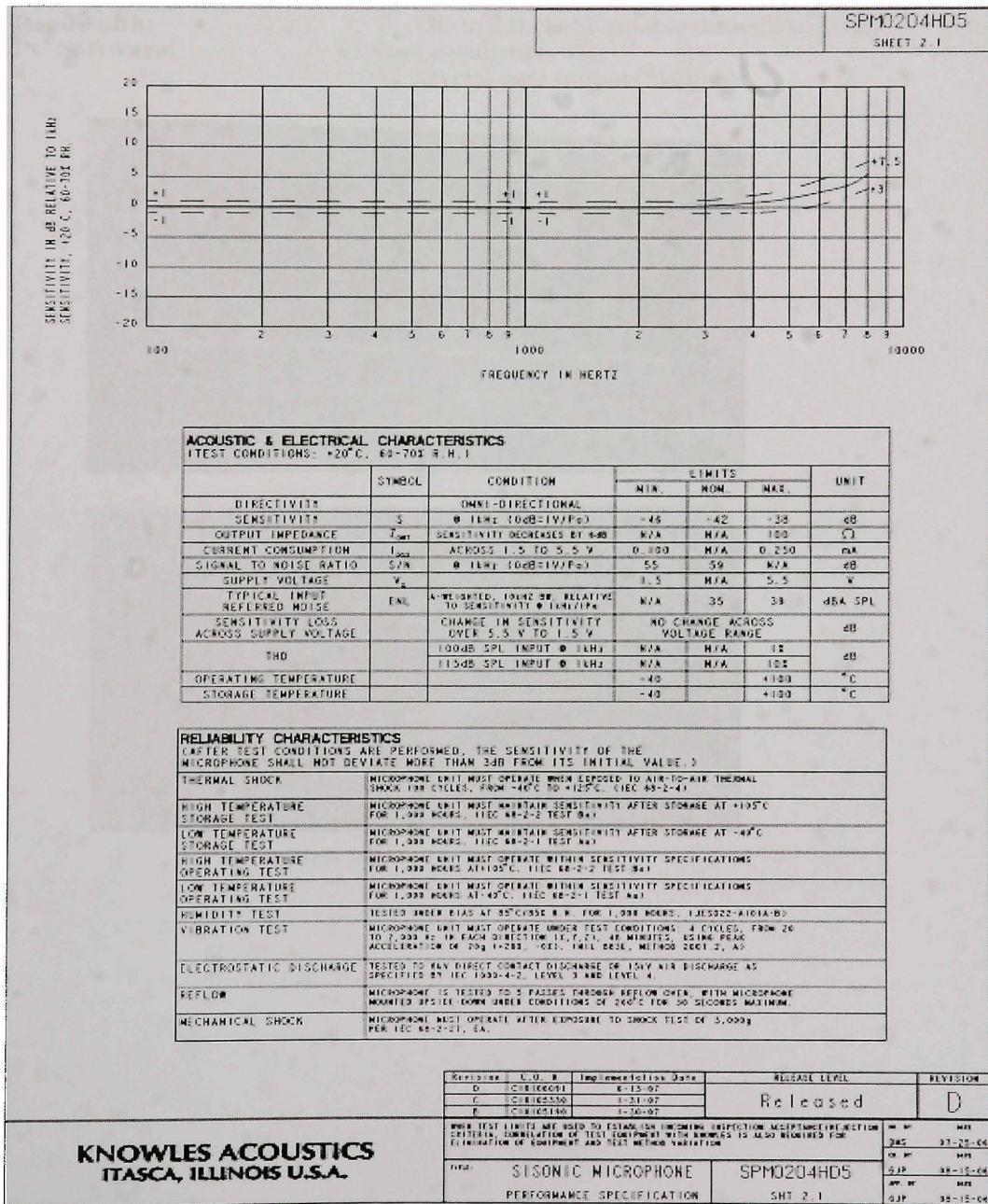
Sur	Nomur	Révision
Layer		
Date	Mar2007	Ver1.0.1
Fig.	2 Documents en 5 pages à lire dans l'ordre D1-D2-D3-D4-D5	





ANNEXE VI

PRÉSENTATION DE LA FICHE TECHNIQUE DES NOUVEAUX CAPTEURS DE PRESSIONS



KNOWLES ACOUSTICS
ITASCA, ILLINOIS U.S.A.

ANNEXE VII

PERFORMANCES ET SPÉCIFICATIONS DU QD-2K DATA ACQUISITION SYSTEM

(DRAFT)

Prototype System Size and Configuration:

Number of Data Channels:	16
Input Power:	110 VAC
Output:	USB
Aggregate Data Rate:	100,000 s/s
Bandwidth:	DC to 22kHz Selectable through software
PC Software:	Custom acquisition sw. Several data formats available

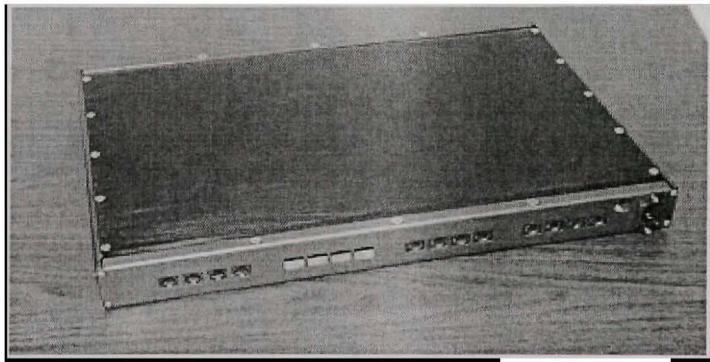
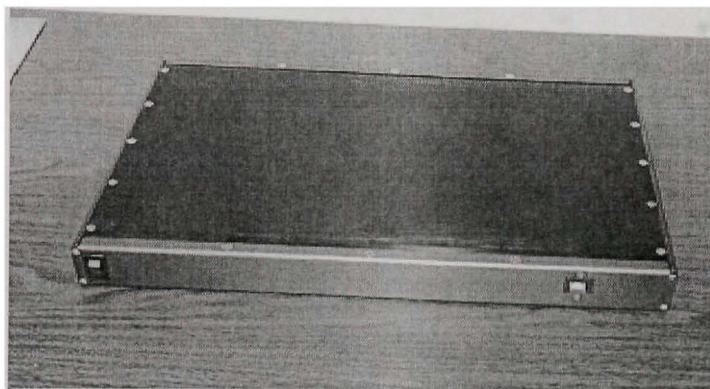


Fig. 53 Prototype QD-2K data acquisition system.

Input Module Specifications:

Physical Size:	118 mm x 91 mm x 15 mm (includes connectors)	10
Inputs:	4 different ac channels + - 10V	
Frequency Response:	DC to 100kHz, selectable from software	
Range of Sample Rate:	Less than 1 s/s up to 100,000 s/s per channel	
Power:	2.65 W	
Noise Floor:	10^{-3} V $\sqrt{\text{Hz}}$ from DC to 500kHz (See Figure 3)	
Cumulative Noise:	52 micro-V RMS DC to 22kHz	
SNR (Based on 4 sigma):	DC-10Hz 10^8 DC-100Hz 5×10^7 DC-1kHz 2×10^6 DC-10kHz 6×10^5	(See Figure 4)
Interface to sensors:		
Drive signals to sensors:	Up to ± 12 V ac usable	
Inputs:	$\pm 10V$ DC to 22kHz, independent ground and shield	
Output:	Multiplexed digital stream	

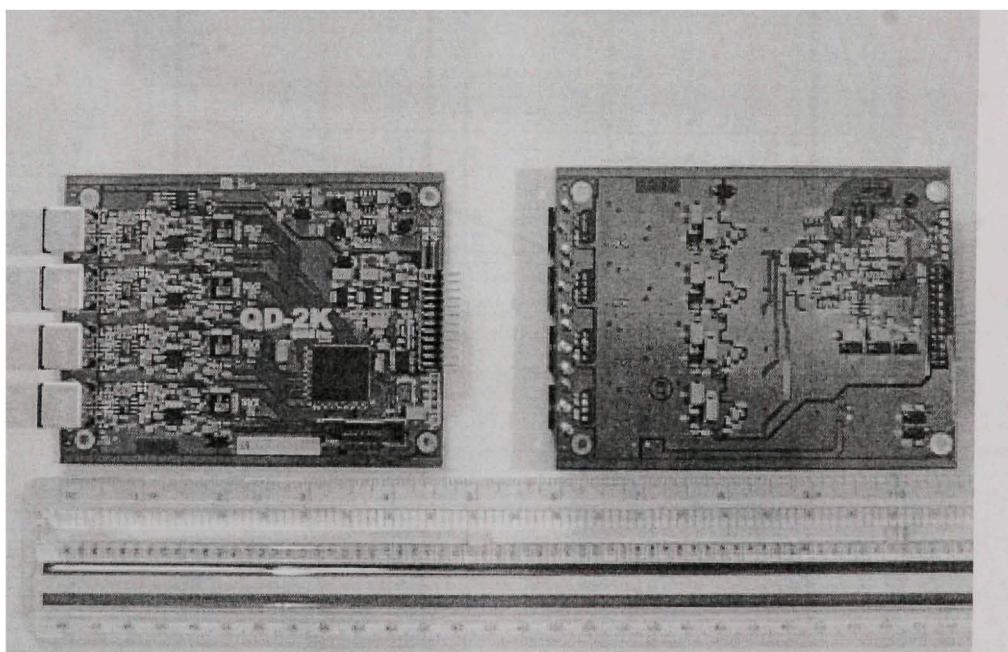


Fig. 54 Photograph of the completed prototype data acquisition module.

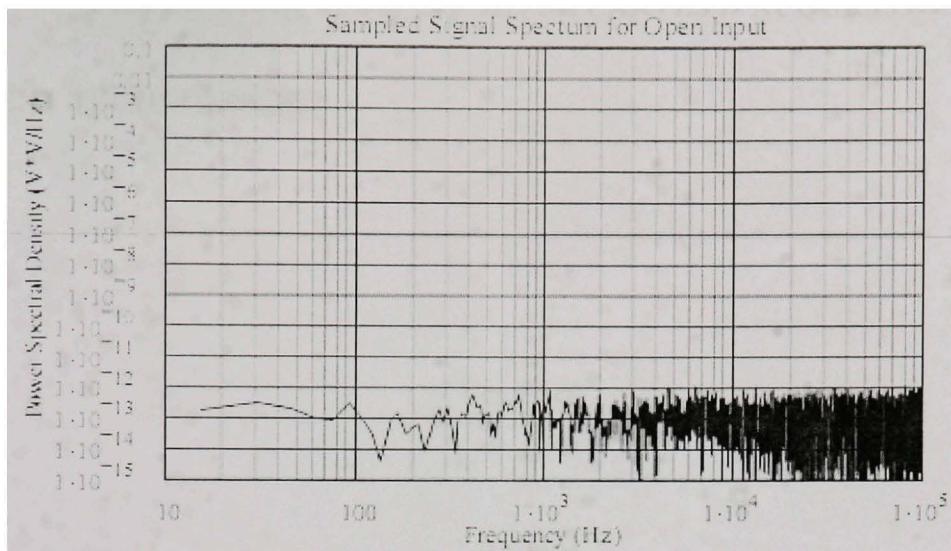
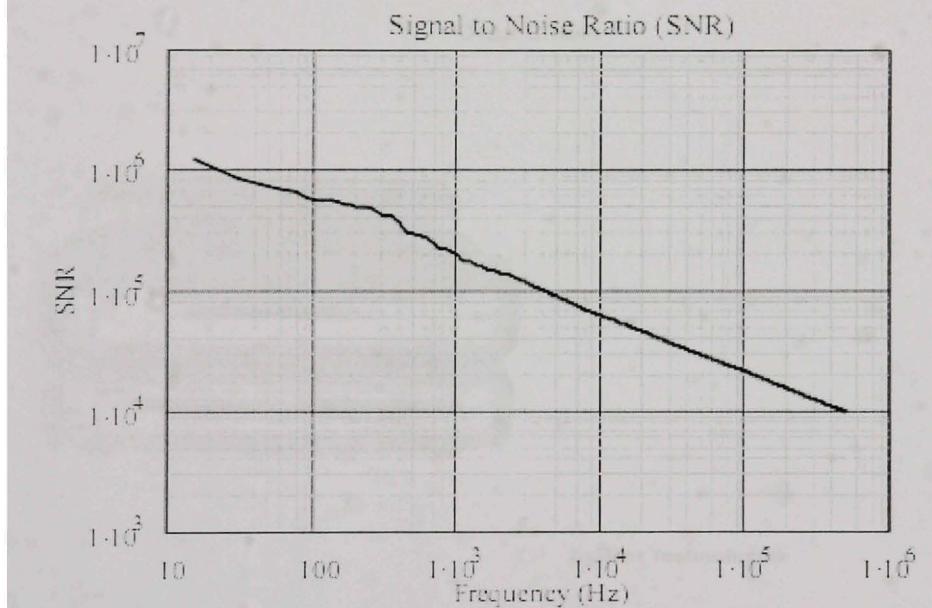


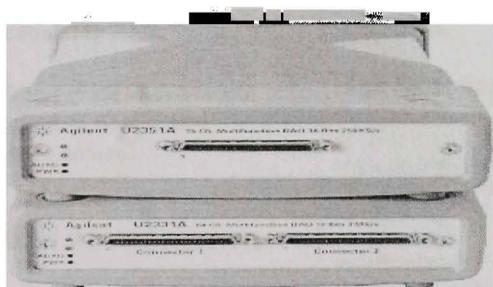
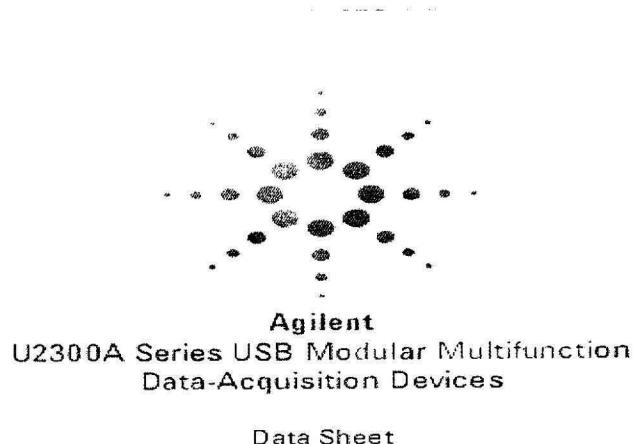
Fig. 55 Noise floor.

Fig. 56 Signal to Noise Ratio (SNR) for the QD-2 K Board (Based on 4^o Sigma).

ANNEXE VIII

DIFFERENTES COMPAGNIES DE CARTES D'ACQUISITION

AGILENT TECHNOLOGIES



Agilent Technologies

Features

- Up to 3 MSa/s sampling rate for a single channel
- Functions as a standalone or modular unit
- Easy to use: Plug-and-play and hot-swappable with Hi-Speed USB 2.0
- Up to 384 channels when incorporated into U2781A Agilent modular instrument chassis
- Easy-to-use bundled software for quick setup and data logging to PC
- 12-bit or 16-bit A/D resolution
- 24-bit programmable digital input/output
- Self-calibration capability
- Compatible with a wide range of Application Development Environments
- USBTMC 488.2 standards



Introduction

Agilent U2300A Series USB modular multifunction data-acquisition (DAQ) devices are a high-performance PC data-acquisition solution. The U2300A Series DAQ devices consist of two families: basic multifunction DAQ and high-density multifunction DAQ. The basic multifunction DAQ family comes in four models, while the high-density multifunction DAQ family is made up of three models.

The U2300A Series DAQ devices' applications extend across industrial and education environments. The DAQ device is well suited for research and development, manufacturing, and design-validation engineers, who require measurement devices with fast sampling rate.

High Sampling Rate

The U2300A Series DAQ devices have sampling rates of up to 3 MSa/s for a single channel. When multiple channels are configured, they can sample data up to 1 MSa/s. This fast sampling capability allows users to perform intermittent detection easily. This is ideal for dealing with high-density analog input/output signals, especially with different input ranges and sampling requirements.

Flexible Standalone or Modular Capability

The U2300A Series DAQ devices are uniquely designed to be flexible enough to function as standalone or modular units. When used with the U2781A modular instrument chassis, the devices can support up to 384 channels.

Ease of Use

The U2300A Series DAQ devices are equipped with Hi-Speed USB 2.0 interfaces for easy setup, plug-and-play, and hot swappable connectivity. Its ease of use makes it ideal for the education environment. Simplifying this further is the Agilent Measurement Manager software that offers a simple interface for quick setup, configuration, and measurement control.

Flexible System and Control Options

Polling and continuous mode

The U2300A Series DAQ devices provide two modes, the polling mode and the continuous mode. The continuous mode enables you to acquire data continuously once the trigger signal is received.

System Requirements

PROCESSOR

1.6 GHz Pentium® IV or higher

OPERATING SYSTEM

One of the following Microsoft® Windows® versions

- Windows® XP Professional or Home Edition (Service Pack 1 or later)
- Windows® 2000 Professional (Service Pack 4 or later)

BROWSER

Microsoft Internet Explorer 5.01 or higher

AVAILABLE RAM

512 MB or higher recommended

HARD DISK SPACE

1 GB

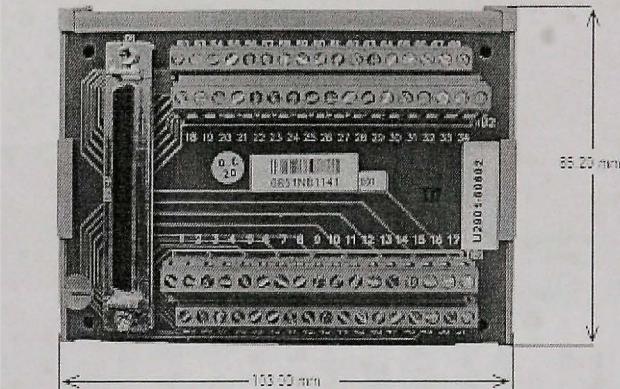
PREREQUISITES

- Agilent IO Libraries Suite 14.2⁽¹⁾ or higher
- Agilent T&M Toolkit 2.1 Runtime version⁽²⁾
- Microsoft .NET Framework version 1.1 and 2.0⁽³⁾

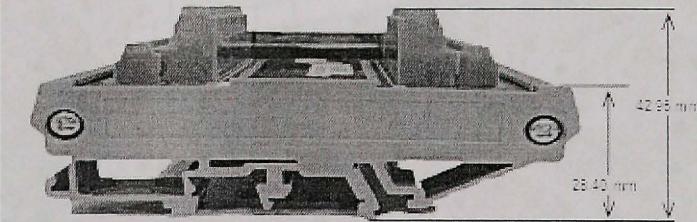
(1) Available in Agilent Automation-Ready CD(2) Bundled with Agilent Measurement Manager software application installer

Terminal Block Overview

Front View



Side View

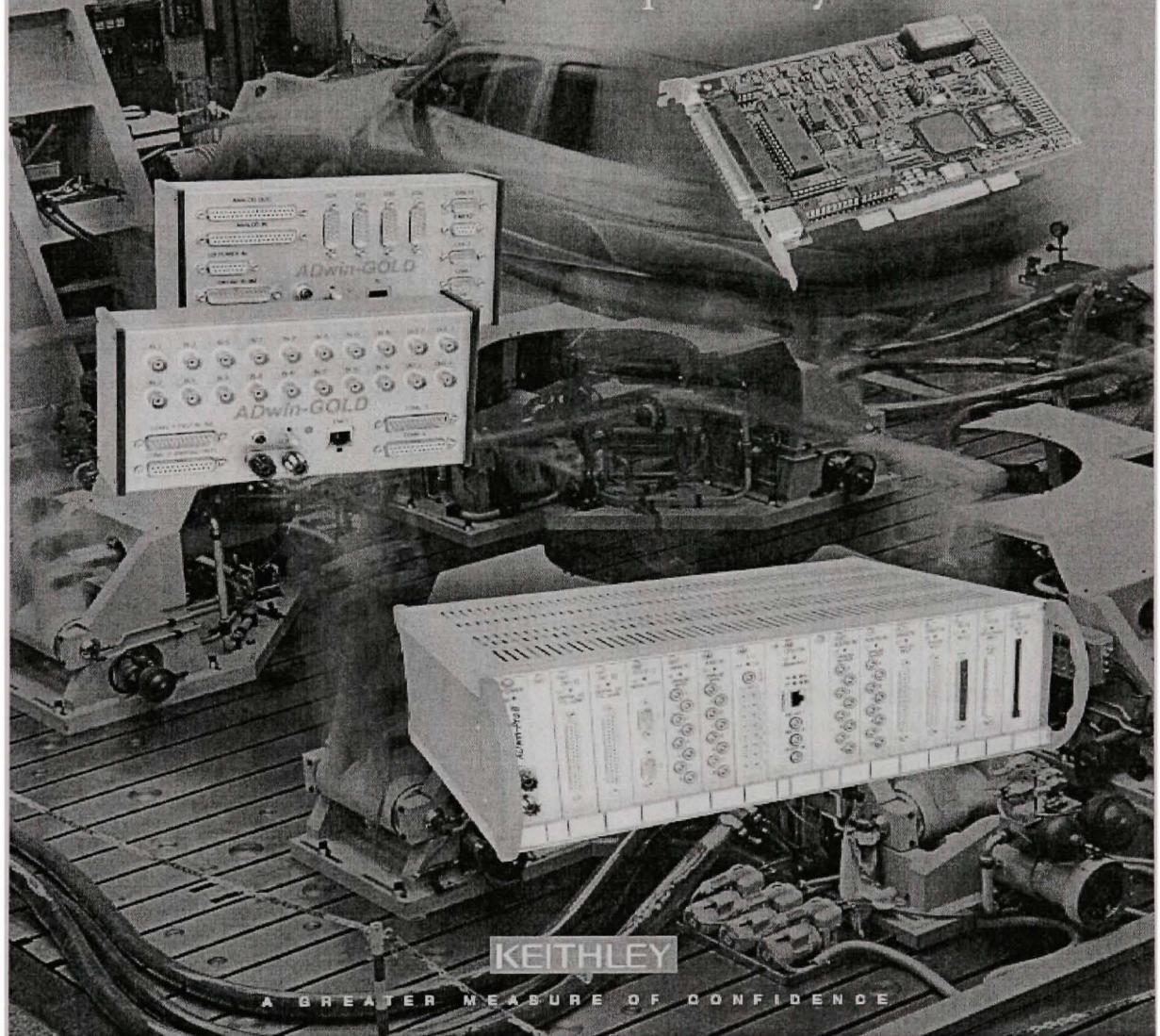


KEITHLEY TECHNOLOGIES

www.keithley.com

ADwin

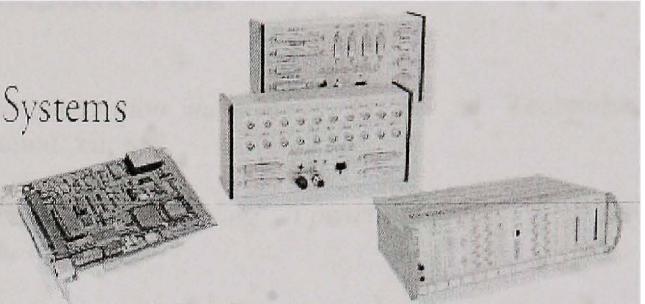
Industrial Real-Time Control and Data Acquisition Systems: **ADwin**



KEITHLEY

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

ADwin - Real-Time Systems



ADwin

ADwin systems are used by engineers and scientists around the world for real-time applications where deterministic, reliable timing is crucial.

They are user programmable data acquisition and control systems, which allow many different types of applications to run with precise real-time performance. This makes ADwin a universal platform for many different types of functions, applications, and industries:

- Intelligent data acquisition
- Complex trigger applications
- On-line analysis of data
- Open-loop control functions
- Closed-loop control functions
- Signal/Waveform generation
- Production and R&D test stands
- Production line automation systems
- Laboratory and mobile systems
- Fast machine control applications
- Material endurance tests
- Quality assurance tests
- Automotive & Aerospace Testing
- Semiconductor and Component Testing
- Machine builders
- Scientific & Industrial Research
- Nano-Science & Laser Industries

ADwin Real-Time Concept

ADwin systems are characterized by deterministic execution of intelligent data acquisition and control applications. This is achieved by utilizing a local CPU (DSP processor), which is the real-time heart of every ADwin system. The CPU is responsible for all real-time functions and guarantees a deterministic process execution, independent of the PC and its workload. ADwin systems work in close cooperation with the Windows-PC, but there is a clear job sharing: the job of the ADwin system is to execute fast and deterministic processes in real-time, while the jobs for the Windows-PC are standard functions such as a graphical user interface for applications, visualization of data, and data base accesses. ADwin systems add a real-time capability to a Windows PC; if the Windows PC crashes, the ADwin system will continue to run, maintaining the integrity of the application.

In addition to the local CPU, there is a large local memory for program code and measurement data, analog I/Os, digital I/Os, counters, different interfaces, expansions and options. The communication between the ADwin system and the PC is done via Ethernet or USB. Fieldbus interfaces allow the connection to PLCs, while a beeldader supports complete stand-alone operations of the ADwin system.

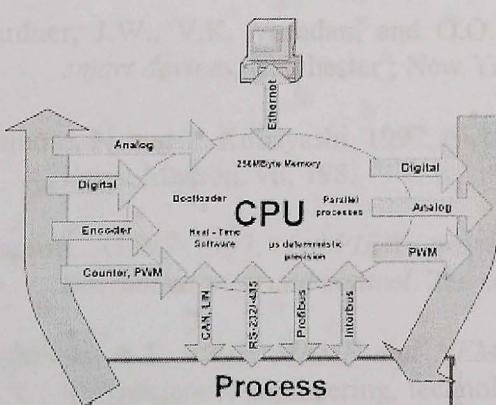
What is ADwin Real-Time

ADwin applications always run in real-time; every sampled value can be evaluated in the same sampling step and a control function, or online analysis, can follow immediately after.

The best solution for fast real-time applications is to place a dedicated CPU close to the signals to have its own resources for the purpose of processing the data.

The ADwin CPU runs an optimized real-time multitasking operating system, and this combination provides exact, predictable process response times as short as 300 ns.

Applications with process cycle times from milliseconds down to microseconds range (from kHz to MHz) can run perfectly on ADwin in real-time.



BIBLIOGRAPHIE

- Asch, G. 2006. *Les capteurs en instrumentation industrielle*. 6e éd. ed. Technique et ingénierie. Série EEA. Paris: Dunod. xii, 852.
- Banks, D. 2006. *Microengineering, MEMS, and interfacing : a practical guide.*, Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis. 326.
- Beeby, S. 2004. *MEMS mechanical sensors*, Boston, Mass.: Artech House. x, 269.
- Bryzek, J., et al. 2006. *Marvelous MEMS*. Circuits and Devices Magazine, IEEE,. 22(2): p. 8-28.
- Elwenspoek, M. and R.J. Wiegerink, 2001. *Mechanical microsensors*. Microtechnology and MEMS., Berlin ; New York: Springer. x, 295.
- Elwenspoek, M. and H.V. Jansen, 1998. *Silicon micromachining*. Cambridge studies in semiconductor physics and microelectronic engineering ; 7, Cambridge, England ; New York: Cambridge University Press. xiii, 405.
- Feynman, R.P. 1992. *There's plenty of room at the bottom [data storage]*. Microelectromechanical Systems, Journal of. 1(1): p. 60-66.
- Gabriel, K.J. 1998. *Microelectromechanical systems (MEMS) tutorial*.
- Gani, A. and M.J.E. Salami. A 2002. *LabVIEW based data acquisition system for vibration monitoring and analysis*.
- Gardner, J.W., V.K. Varadan, and O.O. Awadelkarim, 2001. *Microsensors, MEMS, and smart devices*, Chichester ; New York: J. Wiley. xvi, 503.
- Ichinose, N. and T. Kobayashi, 1997. *Guide pratique des capteurs*. Mesures physiques. 1990, Paris: Masson. vii, 198.
- Johnson, G.W. 1997. *LabVIEW graphical programming : practical applications in instrumentation and control*. 2nd ed., New York, N.Y.: McGraw-Hill. xxii, 665.
- Lyshevski, S.E. 2002. *MEMS and NEMS : systems, devices, and structures*. Nano- and microscience, engineering, technology, and medicine series, Boca Raton, Flor.: CRC Press. 461.
- Malmstadt, H.V., C.G. Enke, and S.R. Crouch, 1973. *Electronic analog measurements and transducers*. Instrumentation for scientists series 1. Menlo Park, Calif.: W. A. Benjamin. 201.

- Mihura, B. 2001. *LabVIEW for data acquisition*. Virtual instrumentation series. Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR. xxi, 435.
- Osiander, R., M.A.G. Darrin, and J. Champion. 2006. *MEMS and microstructures in aerospace applications*. 2006, Boca Raton: CRC Taylor & Francis. 388.
- Pelesko, J.A. and D.H. Bernstein, 2003. *Modeling MEMS and NEMS*, Boca Raton, Fla: Chapman & Hall/CRC. xxiii, 357.
- Rinaldi, Gino. 2007. *CRIAQ 6.2 : MEMS for control and monitoring of Gas Turbine Engines CRIAQ6.2*. Montréal ,Concordia.
- Robert, M., M. Marchandiaux, and M. Porte, 1993. *Capteurs intelligents et méthodologie d'évaluation*. Traité des nouvelles technologies. Série automatique. Paris: Hermès. vii, 166.
- Santos, H.J.d.l. 2004. *Introduction to microelectromechanical microwave systems*. 2nd ed, Boston, Mass.: Artech House. xiii, 221.
- Tran Minh, C. 1991. *Les biocapteurs principes, construction et applications*. Mesures physiques., Paris: Masson. xiv, 158.
- Travis, J. and L.K. Wells, 2002. *LabVIEW for everyone*. 2nd ed. Virtual instrumentation series., Upper Saddle River, N.J.: Prentice Hall PTR. xxxiv, 589.
- Travis, J. and J. Kring, 2007. *LabVIEW for everyone : graphical programming made easy and fun*. 3rd ed., Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. xli, 981.

SITES INTERNET

- 1 <http://www.si.ens-cachan.fr/ressource/r7/r7.htm>
- 2 http://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur#Capteurs_passifs
- 3 <http://www.stielec.ac-aix-marseille.fr/cours/abati/hall.htm>
- 4 <http://perso.orange.fr/michel.hubin/capteurs/techno/chap51.htm>
- 5 <http://www.techno-science.net/?onglet=glossaire&definition=3446>
- 6 <http://www.ni.com/>
- 7 <http://www-hadoc.ensieg.inpg.fr/hadoc/continu/n12/d12.htm>
- 8 <http://www-hadoc.ensieg.inpg.fr/hadoc/continu/n12/d12.htm>
- 9 <http://www.mathworks.fr/>
- 10 <http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-5626EN.pdf>
- 11 <http://www.keithley.fr/products/adwinexternalsystems/?mn=ADWIN>
- 12 <http://www.generation-nt.com/>
- 13 <http://www.beyondlogic.org/usbnutshell/usb1.htm>
- 14 www.dourdan.com/.../homecine/fan/default.htm

Ces sites internet ont été visités le 2 Mai 2007