



Titre: Contrôle de température de la chambre de refroidissement des
Title: nanowalkers

Auteur: Haritz Macicior
Author:

Date: 2004

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Macicior, H. (2004). Contrôle de température de la chambre de refroidissement
Citation: des nanowalkers [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
<https://publications.polymtl.ca/7499/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7499/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Sylvain Martel
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

NOTE TO USERS

This reproduction is the best copy available.

UMI[®]

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

CONTRÔLE DE TEMPÉRATURE DE LA CHAMBRE DE
REFROIDISSEMENT DES NANOWALKERS

HARITZ MACICIOR
DÉPARTEMENT DE GÉNIE INFORMATIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

JUILLET 2004



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*

ISBN: 0-612-97966-0

Our file *Notre référence*

ISBN: 0-612-97966-0

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

«CONTRÔLE DE TEMPÉRATURE DE LA CHAMBRE DE
REFROIDISSEMENT DES NANOWALKERS»

présenté par: MACICIOR Haritz

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées

a été dûment acceptée par le jury d'examen constitué de:

M. HURTEAU Richard, D.Ing., président

M. MARTEL Sylvain, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. De SANTIS Romano, Ph.D., membre

*à Rosemarie
et mes parents...*

Remerciements

Je souhaiterais exprimer ma reconnaissance aux différentes personnes qui m'ont permis la réalisation de ce projet. Tout d'abord je tiens à remercier *Sylvain Martel*, directeur du laboratoire de nanorobotique de l'École Polytechnique de Montréal, qui a bien accepté de m'encadrer et de m'accorder du temps et qui a ainsi permis le bon déroulement de ce projet.

Ce travail a été accompli grâce aux contributions des personnes suivantes que je tiens à remercier:

Martin Mankiewicz – Pour les conseils au niveau de la programmation et le travail fait dans les programmes d'acquisition RoomManager et DAQManager.

Charles Tremblay – Pour la réalisation du réseau de résistances et les informations fournies sur la chambre et le processus thermique.

Pascal Hannyoy et Eric Ilai Azeroual – Pour leurs motivations démontrées durant la réalisation des tests de la chambre de refroidissement.

Je tiens aussi à remercier toute l'équipe du laboratoire de nanorobotique avec laquelle j'ai eu l'occasion de travailler durant le projet et qui a su m'offrir le soutien nécessaire pour la réalisation de mes travaux.

Résumé

Les champs émergeant des nanosciences fourniront la capacité de créer des structures avec une nouvelle organisation moléculaire par l'assemblage et le positionnement contrôlé d'objets d'échelle nanométrique, tels que des atomes et des molécules. La nanotechnologie nous donne une approche totalement nouvelle, l'approche ascendante. Cela signifie la manipulation contrôlée des atomes et des molécules et permet la construction des nanostructures fonctionnelles atome par atome. Comme les lois de la physique et de la chimie permettent d'arranger les éléments suivant un grand nombre de combinaisons, ceci mène à une très grande variété de nouveaux matériaux et produits avec des propriétés physiques jusque là, inconnues. Les champs d'application sont nombreux, parmi eux, les sciences des matériaux, la nanoélectronique, la médecine et la biotechnologie.

Il est donc essentiel de développer des techniques de contrôle dans le champ de la nanotechnologie. L'application du contrôle dans les nanosystèmes est très diversifiée. Par exemple, le contrôle en position d'un nanodispositif, le contrôle d'un système de propulsion, le contrôle de l'environnement de travail d'une « nano-usine »... Dans ce projet, deux cas de contrôle de systèmes nanorobotiques complètement différents sont analysés. a) Le contrôle de température de l'environnement de travail d'un groupe de robots miniatures autonomes capables de réaliser des opérations à l'échelle moléculaire. b) La conception d'un système de contrôle de la position par champ magnétique de type IRM d'un robot miniaturisé pour des applications médicales dans le milieu endovasculaire.

Le but du projet décrit par cette thèse porte donc sur l'analyse de deux systèmes de contrôle nanorobotiques et le développement de techniques de contrôle efficaces pour chaque processus.

Abstract

The emerging field of nanosciences will provide the ability to create structures with new molecular organization by assembly and controlled positioning of nanoscale objects, such as atoms and molecules. Nanotechnology gives us a completely new approach, the bottom-up approach. This means the controlled manipulation of atoms and molecules and enables to build functional nanostructures atom by atom. As the laws of physics and chemistry permit arranging elements in so many combinations this leads to a huge variety of new materials and products with so far unknown physical properties. The fields of application are multifaceted, for instance material sciences, nanoelectronics, medicine and biotechnology.

It is therefore essential to develop control techniques in the domain of nanotechnology. But, applying control to nano-systems is diverse. For example: the control of the position of a nano-device, the control of a propulsion system, the control of the working environment of a nano-factory... In this project, we analyse two entirely different nanorobotics control systems. a) The control of the working environment temperature for a group of miniature autonomous robots who are able to accomplish operations at a molecular level. b) The conception of a control system for the positioning of miniature robots, for medical applications at the endovascular level, with a magnetic field provided by an MRI.

The objective of the project described in this thesis concerns the analysis of control within two nanorobotic systems and developing effective control techniques for each process.

Table des matières

Dédicace.....	iv
Remerciements.....	v
Résumé.....	vi
Abstract.....	vii
Table des matières.....	viii
Liste des figures.....	xi
Liste des tableaux.....	xiv
Liste des annexes.....	xv
Introduction.....	1
CHAPITRE 1 : Système de contrôle de température de la plateforme NanoWalker5	
1.1. Introduction.....	5
1.2. Le Projet Nano Walker.....	7
1.3. Modules de la plateforme Nano Walker.....	12
1.3.1. Module de refroidissement.....	13
1.4. Analyse thermique.....	14
1.4.1. Différents modes de transfert de chaleur.....	16
1.4.2. Bilan 'énergie.....	19
1.4.3. Différentes approches pour la dissipation de chaleur	20
1.4.4. Choix de la technique de réfrigération externe.....	21
1.4.5. Choix de l'atmosphère de travail.....	26
1.5. Chambre de Refroidissement.....	28
1.5.1. Contrôleur du système de refroidissement.....	30
1.5.2. Acquisition de données – DAQManager et Room Manager.....	33
1.5.3. Réseau de résistances.....	36
1.5.4. Caractérisation du système.....	39
1.6. Test de fonctionnement.....	45

1.6.1. Premiers tests et description des problèmes	45
1.6.2. Amélioration du programme PLC.....	49
1.6.3. Contrôle externe.....	52
1.7. Discussion.....	59

CHAPITRE 2 : Système de contrôle de la position d'un minisystème pour

applications endovasculaires	61
2.1. Introduction	61
2.2. Modélisation :	63
2.2.1. Force de frottement	63
2.2.2. Force magnétique.....	64
2.2.3. Équation différentielle.....	64
2.3. Modèle de simulation	64
2.3.1. Sous-système IRM	65
2.3.2. Modèle équivalent du sous-système IRM:	66
2.3.3. Force de frottement	67
2.3.4. Bloc de décision	68
2.4. Le Contrôleur :	69
2.4.1. Contrôle proportionnel	69
2.4.2. Contrôle d'intégration	70
2.4.3. Contrôle dérivatif	70
2.4.4. Contrôle "anti wind-up"	71
2.4.5. Réglage des gains du contrôleur	72
2.4.6. Le système réel.....	76
2.4.7. Implémentation du contrôleur discret.....	83
2.5. Discussion.....	87

Conclusions

Résumé du travail accompli	89
----------------------------------	----

Travaux futur et amélioration.....90

Considérations finales.....92

Liste des références.....93

Annexes97

Liste des figures

Figure 1.1 : Les modules du NanoWalker.	7
Figure 1.2 : Structure intérieur du NanoWalker	9
Figure 1.3 : Implémentation finale du NanoWalker	10
Figure 1.4 : Les pattes piézoélectrique du NanoWalker	11
Figure 1.5 : Modules de l'environnement de travail du NanoWalker	12
Figure 1.6 : Dissipation maximum de puissance pour le régulateur LT1085	14
Figure 1.7 : Mesure de la température en fonction de la puissance pour l'ampl./DSP ..	15
Figure 1.8 : Deux options pour résoudre le problème de dissipation de chaleur.	20
Figure 1.9 : Modèle d'un système de réfrigération externe	25
Figure 1.10 : Système de refroidissement et plateforme de travail NanoWalker.	28
Figure 1.11 : Éléments du système de refroidissement	29
Figure 1.12 : Diagramme de flot de données.	33
Figure 1.13 : NanoDummy et réseau de résistances.	37
Figure 1.14 : Placement des thermocouples sur le réseau de résistance.	38
Figure 1.15 : Diagramme de blocs du système.	39
Figure 1.16 : Diagramme de blocs du sous-système.	40
Figure 1.17 : Courbes d'échauffement à 15W/robot des huit thermocouples.	41
Figure 1.18 : L'échangeur de chaleur de la chambre de refroidissement.	42
Figure 1.19 : Courbes de refroidissement pour une ouverture de 1100.	44
Figure 1.20 : Réponse en mode suiveur. Consigne de 23°C à 10°C.	46
Figure 1.21 : Réponse en mode régulateur. Consigne 16°C.	46
Figure 1.22 : Régulation de température à 30°C avec 10W/robot puissance dissipée. ...	47
Figure 1.23 : Différence de température entre T_{inlet} et T_{outlet}	48
Figure 1.24 : Génération de la consigne interne.	49
Figure 1.25 : Réponse de la température dans la chambre. Consigne interne générée.	50

Figure 1.26 : Régulation de température, 10W/robot, consigne à -15°C	51
Figure 1.27 : Interface du module de contrôle externe Tout-Rien/PID.....	52
Figure 1.28 : Contrôleur Tout-Rien implémenté.....	53
Figure 1.29 : Relais. Réponse de la température moyenne. Consigne $21^{\circ}\text{C} \rightarrow 10^{\circ}\text{C}$	54
Figure 1.30 : Relais. Réponse de la température moyenne, consigne 20°C , 10W/robot.	55
Figure 1.31 : Relais. Commande, consigne 20°C , 10W/robot.	55
Figure 1.32 : Contrôleur PID implémenté.	56
Figure 1.33 : PID. Réponse de la température moyenne, consigne $26^{\circ}\text{C} \rightarrow 0^{\circ}\text{C}$	57
Figure 1.34 : PID. Réponse de la température moyenne, consigne 20°C , 10W/robot. ...	58
Figure 1.35 : PID. Commande, consigne 20°C , 10W/robot.....	58
Figure 2.1 : Forces dans le montage du système.	63
Figure 2.2 : Modèle de simulation du système.....	65
Figure 2.3 : Modèle du sous-système IRM.	66
Figure 2.4 : Réponse en boucle ouverte du système réel et l'équivalent.	67
Figure 2.5 : Réponse de la force de frottement pour différentes vitesses.	68
Figure 2.6 : Modèle de simulation du contrôleur PID analogique.	71
Figure 2.7 : Modèle de simulation du système à asservir.	72
Figure 2.8 : Stabilité sur le diagramme de Laplace.	73
Figure 2.9 : Réponse de la position à un échelon.	74
Figure 2.10 : Variation de la commande à un échelon.	74
Figure 2.11 : Réponse de la position à une entrée sinusoïdale.....	75
Figure 2.12 : Variation de la commande à une entrée sinusoïdale.....	75
Figure 2.13 : Schéma du système IRM et contrôleur.	76
Figure 2.14 : Diagramme de blocs du contrôleur discret.....	77
Figure 2.15 : Modèle de simulation du contrôleur discret.....	78
Figure 2.16 : Modèle du système à asservir avec le contrôleur discret.	79
Figure 2.17 : Réponse de la position à un échelon ($h=0.012$ secondes, $\text{délai}=0$).	80
Figure 2.18 : Variation de la commande à un échelon ($h=0.012$ secondes, $\text{délai}=0$).....	80
Figure 2.19 : Réponse de la position à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$ secs, $\text{délai}=0$). 81	

Figure 2.20 : Variation de la commande à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$, délai=0) ...	81
Figure 2.21 : Réponse de la position à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$, délai=0.025) ..	82
Figure 2.22 : Variation de la commande à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$, délai=0) ...	82
Figure 2.23 : Réponse de la position à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$, délai=0.075) ..	83
Figure 2.24 : Variation de la commande, entrée sinusoïdale ($h=0.012$, délai=0.075).....	83
Figure 2.25 : Diagramme de blocs du contrôleur PID discret avec « anti-windup »	84
Figure 2.26 : Ordre d'exécution de l'algorithme du contrôleur discret	86

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Fonctions des différents modules de la plateforme NanoWalker	13
Tableau 1.2 : Comparaison systèmes de refroidissement cryogénique et mécanique.....	22
Tableau 1.3 : Évaluation de quatre gaz pour l'environnement de travail	27
Tableau 2.1 : Résumé les effets de chacun des éléments du contrôleur PID.....	70

Liste des annexes

Annexe A : Spécifications de la chambre.....	97
Annexe B : Communication PC-PLC.....	99
Annexe C : Code contrôleur externe.....	105
Annexe D : Paramètres de simulation et PID discret	106

Introduction

De nos jours, les nanosciences sont l'une des plus importantes sources de découvertes innovatrices. Des scientifiques venant de chaires de recherches de la physique, de la chimie, de la biologie et de l'ingénierie trouvent ici un des champs de travail les plus intéressants. Les nanosciences représentent un défi multidisciplinaire très motivant. Dans le futur, la nanotechnologie remplacera de plus en plus la microtechnologie d'aujourd'hui. Cependant, il faut noter que la nanotechnologie représente beaucoup plus que la prochaine étape de miniaturisation. En travaillant à l'échelle nanométrique, le comportement classique des matériaux et des substances concernant les lois de la physique, la chimie et la biologie se fusionnent. Ceci mène à de nouvelles résolutions pour des produits que la microtechnologie ne peut pas nous fournir. Par conséquent, le potentiel du marché de la nanotechnologie peut être estimé du même niveau que pour la microtechnologie. On pourrait dire que la nanotechnologie est l'une des technologies prédominantes du 21^{ème} siècle.

Mais que signifie la nanotechnologie? Tout d'abord, le préfixe «nano» vient du mot grec «nanos» qui signifie «le nain». En termes de géométrie, un nanomètre est la billionessime partie d'un mètre. Juste pour en donner une image brute: un nanomètre est 50000 fois plus petit que le diamètre d'un cheveu humain, celui-ci mesurant environ 50 μm de diamètre. Pour donner un exemple à l'échelle atomique, un nanomètre est équivalent à la mise en ligne de 5-10 atomes ou au diamètre d'une molécule organique simple. En conséquence, la nanotechnologie est la technologie basée sur la manipulation de différents atomes et molécules individuels pour ainsi construire des structures ayant des spécifications atomiques complexes.

Le but de la nanotechnologie n'est pas simplement de comprendre les principes qui mènent à ce nouveau comportement, mais d'appliquer également cette connaissance aux systèmes techniques. La percée essentielle dans cette direction a été réalisée dans les années 80, où le scientifique allemand Binnig et le scientifique suisse Rohrer découvrirent le microscope à effet tunnel (STM), pour lequel on leur a attribué le prix Nobel en 1986. Avec le STM, il leur a été possible de regarder des structures à échelle atomique. Ces possibilités ont été augmentées par le développement postérieur du microscope de force atomique (AFM) en 1986. Puisqu'il est possible avec un STM de mesurer non seulement la position des atomes isolés mais aussi de les manoeuvrer, ceci mène à une nouvelle approche concernant l'assemblage de nouvelles structures.

Depuis la découverte du STM, d'autres champs d'applications des nanotechnologies ont vu le jour parmi lesquels :

1. Le projet de manufacture nanorobotique qui devient de plus en plus concret dans le monde universitaire Nord-Américain. Le développement de ces technologies permettra de réaliser des avancements majeurs dans le monde des nanotechnologies. Cependant, les microrobots sont munis d'équipements électroniques de haute capacité, ils doivent donc évacuer beaucoup de puissance sous forme de chaleur pour conserver leur température à un niveau convenable. Il est donc primordial d'étudier le phénomène de transfert de chaleur.
2. Un autre champ d'application est la nanomédecine, définie comme un moyen de prévention, de réparation, de régénération et de commande des systèmes biologiques humains au niveau moléculaire. Un nouveau domaine qui utilise des nanodispositifs et des nanostructures. Le développement de ceux-ci permettra la fusion des composantes biologiques et non-biologiques en système interactif, qui pourrait créer de nouvelles générations de capteurs, de processeurs moléculaires, de nanoinstruments, de nanorobots et autres nanodispositifs. Un des défis à

relever dans ce domaine est la conception d'un système de propulsion miniaturisé. La difficulté d'allier puissance et miniaturisation est un des problèmes des recherches en cours. Les plus petits systèmes de propulsion existants dépassent l'échelle du millimètre.

Pour tous ces nanosystèmes il est nécessaire de développer des techniques de contrôle. L'application du contrôle dans ce domaine est très diversifié: le contrôle en position d'un nanodispositif, le contrôle d'un système de propulsion, le contrôle de l'environnement de travail d'une nano-manufacture...

Nous nous intéressons plus particulièrement dans ce projet aux 2 applications de contrôle suivantes :

1. NanoWalker: L'approche de la plateforme NanoWalker est d'avoir un groupe de robots miniatures autonomes capables de réaliser des opérations à l'échelle moléculaire. Le circuit du NanoWalker contient près de 350 des plus petites composantes électroniques disponibles actuellement. L'opération continue de ce circuit génère une quantité non-négligeable de chaleur (15W) distribuée sur une petite surface. Il faut que cette chaleur puisse être évacuée pour maintenir les conditions optimales d'utilisation du robot entre 0°C et 70°C. Il s'agit donc pour ce projet particulier de contrôler la température pour la maintenir dans l'intervalle d'opération des nanorobots.
2. MR-Sub: L'objectif du projet est de concevoir un microdispositif pour des applications médicales dans le milieu endovasculaire. Pour reculer les limites de miniaturisation du robot, l'idée de base de ce projet est de garder le système de propulsion à l'extérieur du milieu endovasculaire. Pour cela, un champ magnétique variable dans l'espace et dans le temps permettrait de contrôler de

façon externe un robot ayant des matériaux ferromagnétiques. Les appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) sont au cœur de la mise en pratique du présent concept. En effet, ces appareils seraient capables de générer des champs magnétiques ayant les propriétés recherchées. De plus, ils permettraient de produire l'imagerie nécessaire au suivi du robot lors de son transit dans le corps humain. Dans le cadre de ce projet, le travail consiste à réaliser l'asservissement du champ magnétique pour assurer un contrôle constant du microsysteme dans un milieu où les forces et les contraintes sont variables.

Pour résumer, le but global du projet décrit par cette thèse porte sur l'analyse de deux systèmes de contrôle nanorobotiques et le développement de techniques de contrôle efficaces pour chaque processus.

Ce mémoire est divisé en deux grands chapitres. Le chapitre 1 dans lequel nous développons le système de contrôle de la chambre de refroidissement correspondant à la plateforme NanoWalker. Le chapitre 2 dans lequel nous décrivons la conception d'un contrôleur discret pour un système asservi pour champ magnétique de type IRM. Ce dernier travail s'inscrit dans le projet global MR-Sub.

CHAPITRE 1 : Système de contrôle de température de la plateforme NanoWalker

1.1. Introduction

Les champs émergeant des nanosciences fourniront la capacité de créer des structures avec une nouvelle organisation moléculaire par l'assemblage et positionnement contrôlé d'objets de dimensions nanométriques, tels que des atomes et des molécules. Comme l'assemblage de nanostructures complexes exige beaucoup de temps, il est essentiel d'avoir un procédé collectif hautement automatisé. Même s'il y a beaucoup d'idées pour des applications futures d'un procédé de fabrication moléculaire, jusqu'à maintenant il n'y a aucun système qui peut accomplir une nanofabrication à grande échelle qui soit fiable et contrôlée. D'où la naissance du projet de la plateforme NanoWalker qui consiste à développer une «nanofactory» de haut débit.

L'approche de cette plateforme est d'avoir un groupe de robots miniatures autonomes capables de réaliser des opérations à l'échelle moléculaire. Chaque robot appelé NanoWalker est composé d'un système de locomotion piézoélectrique et peut être équipé avec différents outils miniaturisés pour des opérations à l'échelle nanométrique. Pour contrôler toutes les fonctions implémentées, telles que la locomotion, le positionnement et la communication, chaque robot a un ordinateur intégré et plus de 300 composants électroniques additionnels. Les composants sont arrangés sur les 2 faces d'un circuit imprimé flexible, «Flexible Printed Circuit board (FPC)», qui forme la structure du robot.

Pour permettre le travail d'autant de robots que possible sur une aire de surface donnée, la miniaturisation était un objectif majeur de la conception du NanoWalker. Ceci mène à une électronique de haute densité placée sur une aire de surface relativement petite. Dans la mesure que la dimension du robot diminue, l'aire de surface disponible pour dissiper la chaleur de l'électronique devient insuffisante et quelques composants dépassent leurs limites thermiques. Des méthodes conventionnelles pour augmenter la dissipation de chaleur telles que «heat sinks» et «heat pipes» peuvent augmenter la dimension du robot et ne sont pas appropriées.

Pour pallier à cette situation, une chambre de refroidissement a été conçue. Il s'agit d'une plateforme de travail pour 100 NanoWalker qui assure l'opération continue des robots.

Le but du projet décrit dans ce chapitre porte donc sur le développement d'un système de contrôle de température capable de maintenir la température de l'environnement de travail des robots dans l'intervalle d'opération. Cette partie se divise selon les étapes suivantes :

- Définition de l'environnement de travail de la plateforme NanoWalker;
- Analyse thermique de la dissipation de chaleur des composants;
- Validation d'un système d'acquisition des données;
- Obtention du modèle du système thermique;
- Conception et validation d'un système de contrôle capable de maintenir la température dans l'intervalle d'opération des NanoWalker.

1.2. Le Projet NanoWalker

Le NanoWalker est un petit robot autonome, capable de réaliser des mouvements dans le rang nanométrique et peut être équipé avec des nouveaux instruments miniaturisés pour réaliser différentes tâches aux niveaux atomiques et sous-atomiques. Il a été développé au «Bioinstrumentation Laboratory» du Massachusetts Institute of Technology (MIT) à Boston sous direction du Dr. Sylvain Martel qui est aussi le directeur du laboratoire de nanorobotique de l'École Polytechnique de Montréal. La plateforme qui consiste à faire travailler les robots NanoWalker en parallèle est en cours de développement.

En pratique, plusieurs robots équipés avec des outils différents peuvent réaliser des tâches en même temps sur différents échantillons. Après avoir fini sa tâche, chaque robot peut changer sa position de façon autonome et se déplacer vers un autre échantillon. Essentiellement, chaque robot NanoWalker est composé de cinq modules, le circuit imprimé flexible (FPC), les trois pattes piézoélectrique, le «scanning tunneling microscope» (STM), le système de communication par infrarouge (IR) et le système de positionnement (voir figure 1.1).

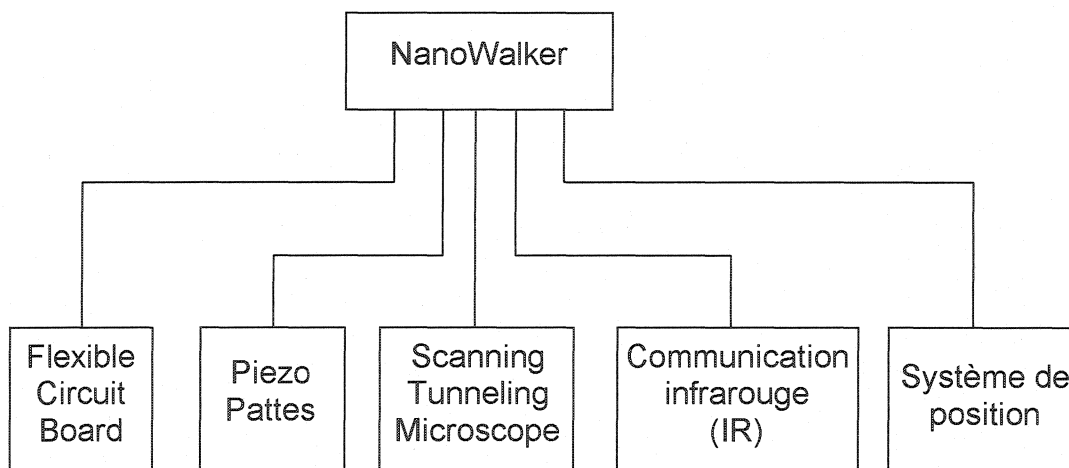


Figure 1.1 : Les modules du NanoWalker.

Comme le NanoWalker est un système mécatronique, les différents modules sont composés de parties mécaniques, électroniques et logiciel software qui sont hautement intégrés. Chaque NanoWalker consiste en une structure intérieure et une extérieure. La structure intérieure inclue trois jambes piézoélectrique, le STM et trois convertisseurs DC/DC assemblés dans un cadre structurel qui forment le squelette du robot. La structure extérieure se compose du FPC avec tous les composants électroniques. Le FPC est plié autour de la structure intérieure et donne ainsi la forme réel du NanoWalker. La hauteur maximale du robot est d'environ 30mm. Sa largeur maximale est d'environ 33mm. Dans la partie postérieure du robot, un régulateur de voltage est intégré pour maintenir le voltage des composants électroniques à un voltage stabilisé de 5V. Le connecteur d'expansion permet la programmation du robot après assemblage. Les deux transmetteurs à infrarouge sont utilisés pour le positionnement optique. Dû à la haute consommation de puissance du robot, des capteurs sont aussi intégrés pour lire les changements de la température et maintenir l'électronique en état d'opération. Trois capteurs de températures (externe et interne) sont intégrés pour contrôler la température de l'électronique et pour les protéger du surchauffage ou du refroidissement excessive. Des rainures de ventilation prévues dans la structure du robot permettent la dissipation de la chaleur de l'électronique intérieure vers l'extérieur par convection naturelle.

Le NanoWalker est équipé de trois jambes piezoélectriques orientées comme un tripode avec l'apex pointant vers le haut (voir figure 1.2). Ceci permet sa locomotion avec 3 degrés de liberté, 2 en translation et 1 en rotation. Le STM est placé au centre du robot. Le cadre qui agit comme squelette du robot, est fait de «super invar», un alliage spécial avec un coefficient d'expansion thermique extrêmement bas (valeur moyenne: $0,6 \times 10^{-6}$ /°C entre -55°C et 95°C) [1]. Ceci est important étant donné que le STM dont sont munis les robots opèrent à une échelle atomique. Les convertisseurs DC/DC, pourvoient des niveaux de haut voltage à des parties de l'électronique analogique et aussi aux actionneurs piézocéramique des jambes, lesquelles ont besoin d'un voltage de $\pm 150\text{V}$.

Notons que, les convertisseurs DC/DC occupent la plupart du volume interne du robot NanoWalker.

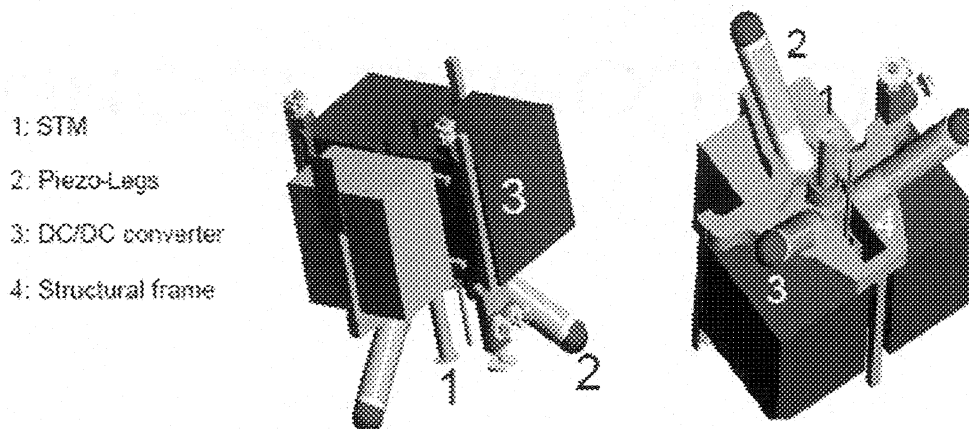


Figure 1.2 : Structure intérieure du NanoWalker [1].

La structure du corps du NanoWalker est composée d'un «multi-layer flexible circuit board» avec douze couches de circuit incluant plus de 300 composants situés sur les 2 faces du circuit. La plupart des circuits intégrés sont montés sur le flex en utilisant la technologie «wire-bonding» permettant d'optimiser l'espace disponible sur le circuit imprimé. Pour minimiser la taille du robot, le FPC est courbé enveloppant ainsi la structure mécanique qui supporte le NanoWalker. Cette structure mène à un robot avec des dimensions extrêmement petites et une haute flexibilité. Toutes les fonctionnalités qui font que le robot soit capable d'opérer de façon autonome doivent être intégrées sur le FPC.

Sur le haut du robot est placé le module de communication IR (voir figure 1.3). Il inclut un contrôleur infrarouge de haute vitesse, un processeur de signaux digitaux (DSP) de 50 millions d'instructions par seconde (MIPS) et quelques mémoires statiques d'accès aléatoire (SRAM) et mémoire flash. Le système est placé sur le haut de la structure pour assurer que le chemin infrarouge ne soit jamais obstrué par les mouvements des robots. Les LEDs émettrices envoient de l'information sur la température des robots, les données capturées pendant les mesures, et les données d'opérations des outils utilisés

vers le système central de control (CCMS). Par conséquent, un protocole de communication spécial pour le robot a été conçu [4]. Le protocole permet aux robots l'échange d'informations avec le CCMS avec une vitesse maximale de transmission de 4Mb/s.

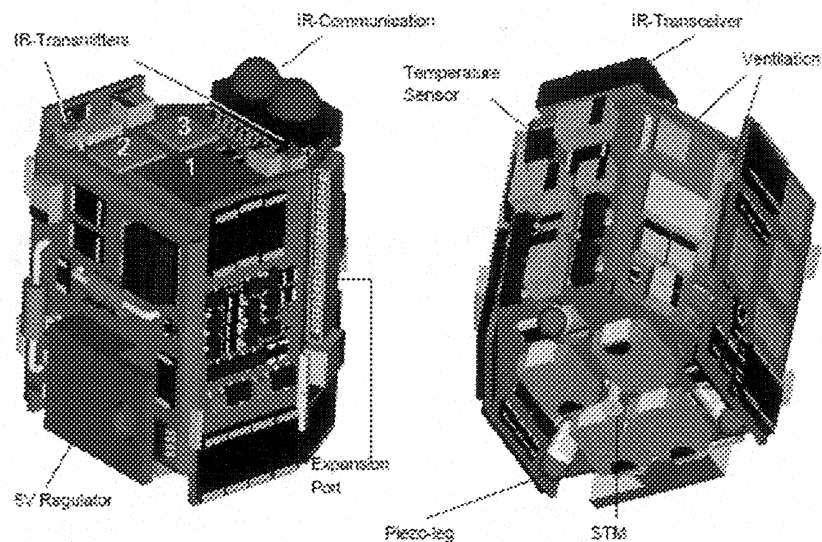


Figure 1.3 : Implémentation finale du NanoWalker [1].

Même si un spectre important d'outils possibles peut être utilisé pour les opérations nanométriques, les microscopes à effet tunnel (STM) sont les nanoassembleurs les plus courants. Le STM est l'ancêtre de tout les «scanning probe microscope». Il a été le premier instrument à générer des images d'espace réel des surfaces avec une résolution atomique.

Chaque robot NanoWalker a été conçu comme un système complètement autonome et par conséquent est équipé avec un système de locomotion qui permet au robot de bouger et de se positionner au pas de quelques nanomètres [3]. Le mouvement du robot NanoWalker est réalisé principalement au moyen de la déflexion dans le mode «bending» de trois tubes piézocéramiques en PZT ($\text{Pb}(\text{ZrTi})\text{O}_3$) agissant comme les pattes du robot (voir figure 1.4). Chaque robot a trois pattes montées d'une façon pyramidale. D'un point de vue cinématique, cette configuration donne la stabilité

maximale avec un centre de gravité bas. Des boules en acier chromé sont attachées au bout de chaque piézo tube. Les boules en acier sont des éléments multi fonctionnels. Avant tout, chaque boule est en contact avec une planche d'alimentation spécial appelé PowerFloor que conduit la puissance électrique pour le robot. Par l'application de voltages bipolaires simultanés dans les différents quadrants, on peut obtenir des déplacements dans n'importe quelle direction.

Dans la figure 1.4 (coté droit) le principe de base d'un seul pas est montré. Chaque pas est réalisé par une déflexion d'une patte utilisant un principe qui a été dérivé de la méthode «stick-slip». Le voltage nécessaire pour le fonctionnement des piézoactuateurs de $\pm 150V$ est généré par les deux convertisseurs internes DC/DC des NanoWalkers [3].

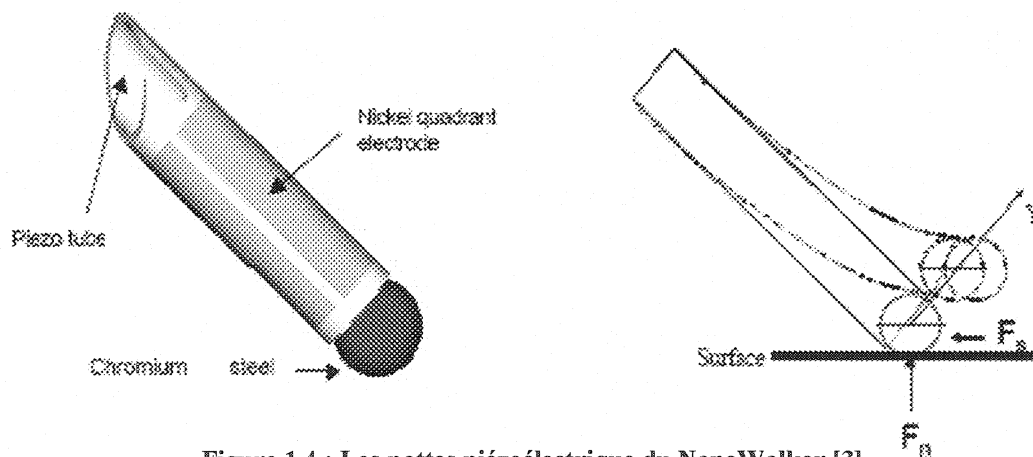


Figure 1.4 : Les pattes piézoélectrique du NanoWalker [3].

Pour opérer à l'échelle atomique, il est essentiel d'avoir un système de positionnement avec une précision extrêmement haute. Cela signifie que chaque robot doit être capable de se positionner sur un atome ou molécule spécifique. La difficulté de cette tâche, est qu'il y a plusieurs magnitudes entre les dimensions du robot (millimètres) et la dimension d'un seul atome ou molécule (nanomètres). Pour cela, le système de positionnement du NanoWalker a été conçu en ayant deux couches: Le «Global Scale Positioning System (GSPS)» et le «Atomic Scale Positioning System (ASPS)».

Le GPS détermine la position de chaque NanoWalker basé sur des signaux infrarouges transmis par le robot. Le GPS est capable de positionner chaque robot avec une précision de quelques micromètres. On utilise le ASPS pour positionner le NanoWalker avec plus de précision qu'avec le GPS. Le principe de base du ASPS est de compter le nombre d'atomes à partir d'un point de référence défini utilisant le STM du robot. Pour permettre au robot de s'orienter lui même à une échelle atomique, une grille atomique a été développée au Laboratoire de NanoRobotique de l'École Polytechnique [4].

1.3. Modules de la plateforme NanoWalker

Pour permettre à un groupe de NanoWalkers de réaliser des opérations à l'échelle nanométrique, un environnement de travail adéquat a dû être développé. Dans ce qui suit, l'environnement NanoWalker sera appelé Plateforme NanoWalker. Avant de concevoir le contrôle de la plateforme, les besoins ont dû être spécifiés. Les spécifications du robot étaient les bases pour le développement de la plateforme au Laboratoire de Nanorobotique à Montréal. Les différents modules fonctionnels de la plateforme sont présentés à la figure 1.5.

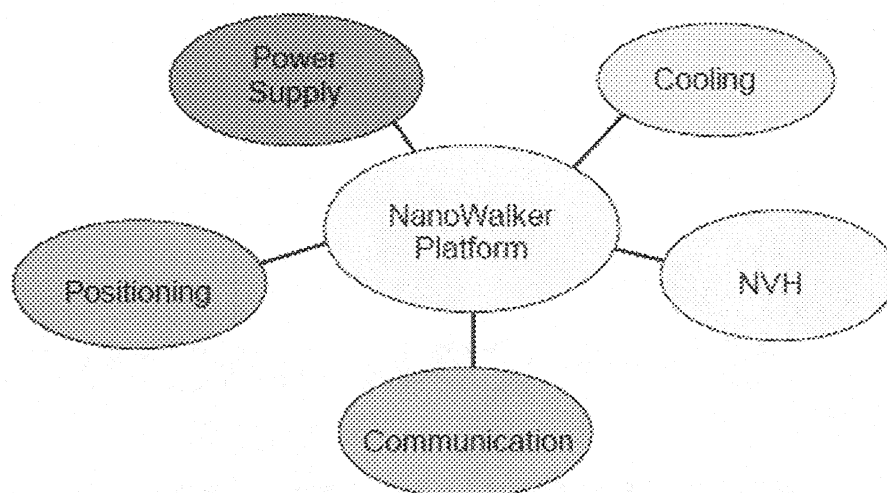


Figure 1.5 : Modules de l'environnement de travail du NanoWalker [11].

Les différents modules intégrés dans la plateforme sont: Power Supply, Positionnement, Communication, «Noise Vibration et Harshness (NVH)» et Système de Refroidissement. L'intégration de l'ensemble des modules est une tâche délicate car ils sont hautement dépendants les uns des autres. Tout changement dans un module peut produire des modifications sur tous les autres modules.

Tableau 1.1 : Fonctions des différents modules de la plateforme NanoWalker.

Power Supply	· Puissance nécessaire pour chaque robot autonome.
Positionnement	· Détecter la position du robot. · Guider le robot vers la position désirée. · Positionner le robot à une échelle atomique.
Communication	· Envoyer les commandes aux robots. · Recevoir l'état du robot. · Recevoir les données envoyées par le robot.
NVH	· Minimiser les vibrations du sol du robot. · Minimiser le bruit acoustique. · Minimiser les vibrations du système.
Refroidissement	· Maintenir l'électronique des robots à un intervalle de température entre 0°-70°C.

1.3.1. Module de refroidissement

Les robots sont équipés d'une électronique de haute densité qui émet de la chaleur pendant son fonctionnement. Comme l'objectif était de concevoir un robot aussi compact que possible, l'aire de l'espace dissipant la chaleur est limitée. Par conséquence, maintenir l'électronique à une température d'opération entre 0° et 70°C, devient une fonction critique. Comme la structure du corps du NanoWalker est composée d'un «flexible circuit board» de 12 couches avec des composants montés à l'intérieur et à l'extérieur, la distribution de la température ne peut pas être considérée homogène sur la surface. De plus, l'intérieur du robot n'est pas vide mais principalement occupé par des convertisseurs DC/DC. Par conséquence, la dissipation de chaleur de l'intérieur vers l'extérieur, doit être aussi prise en compte.

1.4. Analyse thermique

Pour permettre qu'un grand nombre de robots travaillent sur une petite surface, la miniaturisation est une condition essentielle. Pour permettre la mise en place de toutes les fonctions nécessaires du robot, il faut une très grande densité d'électronique de puissance. Avec la vitesse maximale et l'utilisation de toutes ses capacités, le robot est conçu pour utiliser un courant maximal de 3A avec un voltage d'entrée maximum de 12V [8]. Même si toutes les parties électroniques consomment de la puissance, il y'en a qui sont plus critiques que d'autres par le fait qu'elles présentent une dissipation de chaleur excessive par rapport à leurs dimensions :

- 4 amplificateurs de puissance Apex PA41 (www.apexmicrotech.com)
- 1 DSP (Digital Signal Processor) de Texas Instruments TMS320C25 (ti.com)
- 1 régulateur linéaire 5 V LT1085CT de Linear Technologies (linear-tech.com)

Les amplificateurs de puissance et le DSP ne devraient pas dissiper plus de 0.8W et 0.9W respectivement. Ces composants sont montés à l'extérieur du robot pour permettre une meilleure dissipation de chaleur. Pour une opération adéquate, la température ne devrait pas excéder les 70°C.

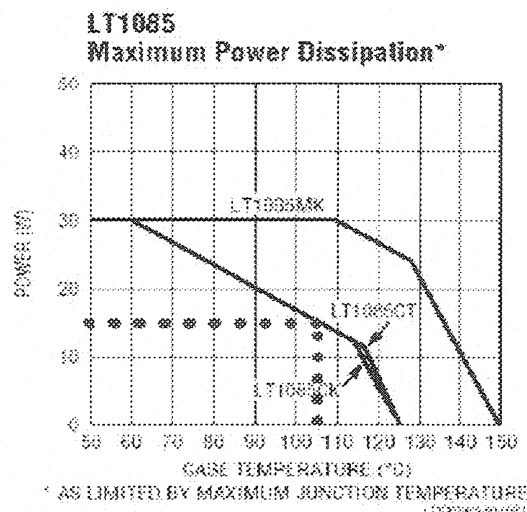


Figure 1.6 : Dissipation maximum de puissance pour le régulateur LT1085 (Linear Technology).

En ce qui concerne la dissipation de chaleur, le régulateur de voltage de 5V est la partie la plus critique du robot, parce qu'il fournit la puissance à l'électronique. Pour opérer, les composants électroniques ont besoins d'un voltage stable de 5V. Le régulateur de voltage transforme le voltage d'entrée de 6.5-12V en provenance des pattes du robot à 5V. Selon la température du composant, le régulateur à lui seul peut dissiper en chaleur une puissance jusqu'à 21W avec un courant maximal de 3A. La figure 1.7 montre la corrélation entre la température de l'enveloppe et la dissipation de puissance maximale du régulateur. Si nous supposons une consommation de puissance moyenne des robots de 15W, il est permis d'avoir une température maximale de l'enveloppe de 105°C avant une coupure d'urgence. Quand le régulateur dépasse la température de jonction maximale, laquelle est une fonction de la dissipation de puissance maximale, il effectue une coupure totale pour se protéger d'un dommage irréparable.

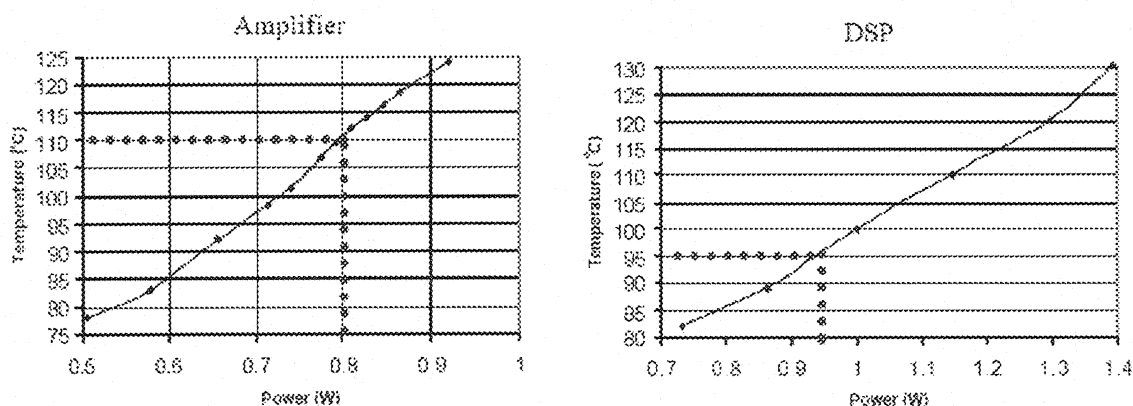


Figure 1.7 : Mesure de la température en fonction de la puissance pour l'amplificateur/DSP [8].

Pour estimer le comportement de dissipation de chaleur des amplificateurs de puissance et le DSP, des tests préliminaires ont été faits au MIT. Pour ceci, les amplificateurs de puissance et le DSP ont été remplacés par des résistances chauffantes avec une aire de surface similaire et chauffées avec une puissance croissante. Étant exposé à un environnement à température ambiante, la température de surface des composants a été mesurée pour déterminer la corrélation entre consommation de puissance et température des composants. Bien que les tests ne puissent pas donner des chiffres précis sur le

NanoWalker réel, ils montrent quand même la tendance. Dans ce cas, il est évident que la dissipation de chaleur uniquement par convection naturelle, est insuffisante. Les différents modes de transfert de chaleur seront décrits en détails à la section 1.4.2.

En supposant, une consommation de puissance moyenne de 0.8W pour l'amplificateur et 0.95W pour le DSP, les composants atteignent respectivement une température de 110°C et 96°C (voir Figure 1.7). Ceci est bien au dessus de la température d'opération maximale recommandée de 70°C. Au dessus de cette température, le bon fonctionnement ne peut pas être assuré. De toute façon, les composants peuvent tolérer une température de jonction maximale de 125°C. En l'occurrence, si une température de 150°C est dépassée, un dommage permanent pourrait arriver.

1.4.1. Différents modes de transfert de chaleur

Il existe trois types principaux de transfert de chaleur, appelés aussi modes:

- Conduction;
- Convection;
- Radiation.

Lorsqu'un gradient de température existe dans un milieu stationnaire, qui peut être un solide ou un fluide, l'expression conduction est utilisée pour faire référence au transfert de chaleur qui se produit à travers le milieu [12].

La convection quant à elle fait référence à un transfert de chaleur entre une surface et un fluide en mouvement quand il y a une différence de température entre les deux.

Le troisième mode de transfert de chaleur est appelé radiation thermique. Toute surface ayant une température finie émet de l'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques.

Par conséquent, dans le cas d'absence d'un milieu intervenant, il y a un transfert net de chaleur par radiation entre deux surfaces qui sont à différentes températures.

Conduction

Ce processus n'est pas le plus important pour nous mais soulignons qu'il aura lieu partout dans la structure du NanoWalker, entre la chambre isolée et le laboratoire et surtout entre le dessous des NanoWalker et le PowerFloor (plancher d'alimentation). L'effet de la conduction se résume à l'équation de base bien connue:

$$q'' = \frac{q}{A} = k \frac{\Delta T}{L}, \quad (1.1)$$

où q'' est le flux de chaleur (W/m^2), q la charge de chaleur (Watt), A la surface (m^2), k le coefficient de conduction ($\text{W}/\text{m.K}$) et L la longueur caractéristique (m).

Radiation

La radiation thermique est de l'énergie émise par la matière qui se trouve à une température finie. La radiation peut provenir des solides mais aussi des liquides et de gaz. L'émission est attribuée aux changements dans les configurations électroniques des atomes ou des molécules constituants. L'énergie du champ de radiation est transportée par des ondes électromagnétiques et par conséquence, n'a pas besoin d'un milieu. En effet, la radiation se réalise plus efficacement dans le vide. Comme la radiation n'a pas besoin d'un milieu de transport, elle est indépendante de la pression.

La dissipation de puissance par rayonnement se fera par l'échange de radiation entre les robots et aussi entre les robots et la chambre. L'effet de la radiation se résume à l'équation de base bien connue:

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot A (T_1^4 - T_2^4), \quad (1.2)$$

où σ est la constante de Boltzmann ($5,7 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$), ε l'émissivité d'un corps gris de 0 à 1, A la surface d'échange, T_1 la température des robots et T_2 la température à l'infini.

Convection

La convection fait référence à un transfert de chaleur entre une surface et un fluide en mouvement quand les deux sont à des températures différentes. La convection peut être mise en équation. Les équations générales de base de convection libre sont les suivantes:

$$\bar{h} = \frac{\bar{Nu}_L \cdot k}{L}, \quad (1.3)$$

où h est l'efficacité du transfert thermique. Il se calcule avec k , le coefficient de conduction thermique et L la grandeur caractéristique. On y retrouve aussi:

$$\bar{Nu}_L = \left(0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2. \quad (1.4)$$

Le nombre de Nusselt moyen, qui est un paramètre équivalent au gradient de température à la surface d'échange. Il est sans dimension. On y trouve le nombre de Rayleigh qu'on ne peut pas isoler analytiquement. Il s'écrit comme suit:

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_{gaz})L^3}{\alpha\nu}. \quad (1.5)$$

Le nombre de Rayleigh est le produit du nombre de Grashof et Prandtl, il qualifie l'écoulement. Le nombre de Prandtl est le rapport entre la quantité de mouvement et la diffusion thermique tandis que le nombre de Grashof est le rapport de la flottabilité et des forces visqueuses. Si $Ra_L < 109$, l'écoulement est turbulent. Enfin, la puissance dissipée par la convection devra combler celle qui n'est pas évacuée par radiation et conduction, selon:

$$q = \bar{h}A_s(T_s - T_{gaz}). \quad (1.6)$$

1.4.2. Bilan d'énergie

De façon générale, notre problème se pose comme une équation d'équilibre. D'un côté une puissance électrique consommée de l'autre une puissance transférée à l'environnement. On peut résumer comme suit :

$$\frac{dE}{dt} = Q_{produit} - Q_{enlevé}; \quad (1.7a)$$

$$E = mC_p T; \quad (1.7b)$$

$$mC_p \frac{dT}{dt} = Q_{produit} - Q_{enlevé}; \quad (1.7c)$$

où C_p est la chaleur spécifique du gaz (J/kg.K). Si T est constante $Q_{produit} = Q_{enlevé}$. Ceci signifie que la quantité d'énergie transférée à l'environnement doit être égale à la quantité d'énergie consommée par la source de chaleur pour opérer en régime permanent à une température fixe [14]. Cette condition est souhaitable.

1.4.3. Différentes approches pour la dissipation de chaleur

Il existe deux différentes approches pour résoudre le problème de dissipation de chaleur:

- Minimiser la consommation de puissance de l'électronique ;
- Augmenter l'efficacité de la dissipation de chaleur de l'électronique.

Pour le robot NanoWalker, ceci signifie soit minimiser la consommation de puissance des composants, soit réaliser une dissipation de chaleur plus efficace. Étant donné que la consommation de puissance du robot a été déjà minimisée, l'efficacité de la dissipation de chaleur devait être augmentée. Ceci peut être réalisé soit par l'élargissement de l'aire de surface du robot ou par l'application de réfrigération extérieure.

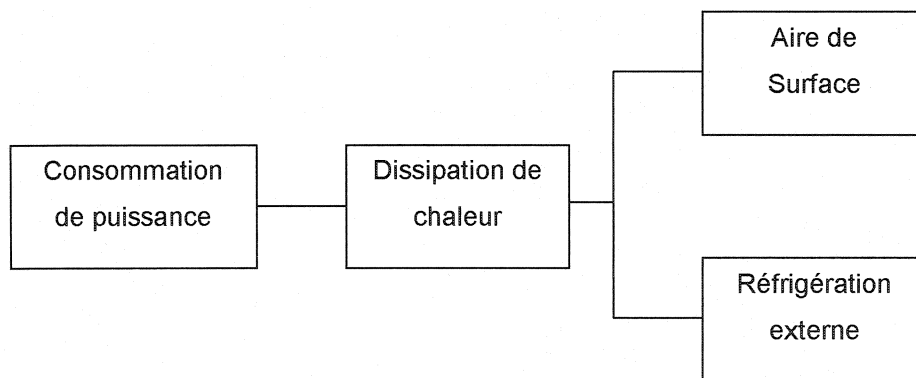


Figure 1.8 : Deux options pour résoudre le problème de dissipation de chaleur.

Par rapport à l'objectif de réaliser un NanoWalker aussi petit que possible, les techniques traditionnelles pour augmenter la surface telles que «heat sinks» ou «heat pipes» seules, semblent ne pas être appropriées. Une façon d'éviter une augmentation de la surface du robot serait d'appliquer des techniques de réfrigérations externes au robot.

1.4.4. Choix de la technique de réfrigération externe

Basé sur l'analyse précédente un transfert de chaleur par convection forcée est nécessaire pour refroidir efficacement les robots. Ainsi, le système de refroidissement qui doit être choisi doit avoir la capacité de fournir un refroidissement efficace de l'atmosphère et la capacité de contrôler la vitesse de flux. L'approche standard pour générer la vitesse de flux d'un gaz est un ventilateur contrôlable. Pour l'application NanoWalker, il est essentiel d'avoir un ventilateur facilement contrôlable à des vitesses de flux très faibles produisant le minimum de vibration possible pendant l'opération. Pour refroidir le gaz à de très basses températures, il existe deux technologies fondamentales :

- Réfrigération mécanique;
- Systèmes cryogéniques de refroidissement.

La technologie la plus couramment utilisée aujourd'hui est la réfrigération mécanique. Elle consiste en un système de refroidissement composé d'un compresseur et plusieurs valves et tuyaux remplis avec un fluide réfrigérant. Le même type de technologie est utilisé dans les réfrigérateurs standard que l'on utilise dans nos domiciles mais avec un design plus simple. Avec un système de réfrigération mécanique d'une seule boucle, il est possible d'atteindre des températures de 235°K (-38°C). Pour arriver à des températures plus basses, un système de refroidissement en cascade est nécessaire composé de deux boucles de réfrigérations mécaniques. Ce type de système peut fournir des températures aussi basses que 205°K (-68°C). L'autre type de système de refroidissement est appelé système de refroidissement cryogénique. Avec un système de refroidissement cryogénique, un fluide est évaporé à partir de son état liquide à travers une valve d'expansion. Par rapport aux systèmes de réfrigération mécaniques, les systèmes de refroidissement cryogéniques n'ont pas de compresseur. Une fois que le liquide a subi l'expansion vers l'état gazeux, il ne sera pas comprimé ni réintroduit à nouveau dans le système de refroidissement. Ainsi par rapport aux systèmes de

réfrigération mécaniques, les systèmes de refroidissement cryogéniques sont des systèmes à boucle ouverte. Selon le gaz utilisé, il est possible d'atteindre des températures proches du minimum absolu de température. Par exemple, quand l'hélium liquide est évaporé, il devient un gaz avec une température de 4°K (-269°C). Avec l'azote liquide, on peut obtenir des températures inférieures 100°K (-173°C). Pour la plateforme NanoWalker, des températures inférieures à 100°K sont largement suffisantes, c'est pour cette raison que l'option d'utiliser de l'hélium liquide ne sera pas abordée. Basé sur le tableau 1.2, les caractéristiques fondamentales des deux systèmes de refroidissement seront comparées pour déterminer le système le mieux adapté pour l'application NanoWalker.

Tableau 1.2 : Comparaison entre systèmes de refroidissement cryogénique et mécanique [9].

	Cryogénique (LN2)	Mécanique
Coût de l'équipement	· Bas, approximativement égal au 25% d'un système mécanique.	· Haut, spécialement pour des systèmes faits sur mesure.
Coût d'Opération	· Bas, pour des systèmes intermittents. · Haut, pour opération continue.	· Relativement bas pour opération continue, mais non pour opérations intermittentes.
Entretien	· Presque négligeable.	· Bas pour réfrigération normale (températures au dessus de 235° K), très haut pour des températures au dessous de 225° K.
Dimensions	· Compact, très efficace, utilise moins de 1/3 de l'espace d'un système mécanique équivalent.	· Espace nécessaire très important, spécialement pour des unités d'un haut volume de production.
Vitesse de refroidissement	· Extrêmement rapide.	· Relativement lente.
Capacité de température minimale	· Excellente, moins de 100°K.	· Avec un système en cascade jusqu'à 205°K.

Matière refroidissant	· L'azote pour refroidissement direct, n'importe quel gaz pour refroidissement indirect.	· Usuellement de l'air mais presque n'importe quel gaz peut être utilisé.
Vibration	· Aucune, sauf celle du ventilateur.	· Élevée à cause du compresseur.
Effets sur l'environnement	· Le gaz Azote doit être laissé évacué dans l'environnement .	· La charge de chaleur doit être dissipée vers l'air ambiant ou par refroidissement par l'eau.

Premièrement, les coûts pour des systèmes de réfrigération mécaniques (MR) faits sur mesure sont beaucoup plus élevés que pour un système de refroidissement à azote liquide (LN2). Ceci est dû au plus grand nombre de composants du système avec des tolérances strictes. Cela fait référence principalement au compresseur, lequel doit être dimensionné exactement pour la charge de chaleur requise. Par contre, les systèmes de refroidissement cryogéniques ont besoin d'une valve d'expansion contrôlée pour le fluide dans le refroidissement direct (les fluides aussi constituent l'atmosphère) ou une valve d'expansion et un échangeur de chaleur, quand le gaz de l'atmosphère est différent du fluide de refroidissement. Tandis que, les coûts d'opération pour un système de refroidissement LN2 sont plus élevés, parce que l'azote liquide n'est pas réutilisé (évacué après son utilisation); les systèmes de refroidissements MR, au contraire, n'ont besoin que d'une source de puissance électrique et réutilisent les réfrigérants dans une boucle fermée. Ceci change lorsque le système n'est pas utilisé d'une façon continue mais de façon intermittente.

Comme le temps de réponse pour les systèmes MR est très long par rapport à celui d'un système LN2, où le gaz froid est disponible tout de suite, ceci conduit à des coûts plus élevés. De plus, les coûts d'entretiens pour les systèmes MR en cascades sont plus élevés, parce que ces systèmes sont plus compliqués. Par exemple, le fluide refroidissant doit être changé à certains intervalles et quelques joints doivent être remplacés à la même occasion.

Le rapport entre la vitesse de refroidissement et les dimensions du système est beaucoup plus élevé pour un système LN2 que pour un système MR. Les systèmes LN2 d'injection directe n'ont pas besoin d'un échangeur de chaleur, pas même du compresseur des systèmes MR. Spécialement pour des unités à haut volume de production, l'espace nécessaire est très important. Les systèmes de refroidissement LN2 fournissent des vitesses de refroidissement extrêmement élevées avec un temps de réponse négligeable. En ce qui concerne la température minimale qui peut être atteinte, les systèmes MR ont une limite aux alentours de 205°K. Avec le LN2 des températures beaucoup plus basses allant jusqu'à 100°K sont possibles (avec de l'hélium liquide 4°K). Il y a une caractéristique pour laquelle les systèmes LN2 dépassent largement les systèmes MR qui est la vibration. En effet, mis à part le ventilateur qui n'est pas nécessaire dans quelques cas, et la valve de contrôle pour l'évaporation du gaz liquéfié, il n'y a pas de parties mobiles dans un système LN2. Contrairement aux systèmes MR qui ont toujours besoin d'un compresseur pour comprimer et faire circuler le réfrigérant. Chaque compresseur est composé de parties rotatives qui ne sont pas parfaitement équilibrées et qui par conséquent produisent des vibrations dans le système, qui peuvent être tolérées dans les applications courantes, mais pas dans le cas du système NanoWalker qui opère à une échelle moléculaire. Même si le système MR n'est pas logé dans la même enceinte que les Nanowalker, les vibrations seront transmises à travers les conduits vers l'enceinte.

Finalement les effets sur l'environnement doivent être discutés. «Environnement» dans ce cas particulier veut dire le laboratoire, dans lequel le système sera installé et aussi les alentours.

Généralement, deux méthodes sont utilisées par les systèmes MR pour dissiper la chaleur. Cette dernière sera dissipée selon le cas soit vers l'air ambiant soit vers un liquide à travers un échangeur (chaleur/eau). Comme un système MR correspondant à

une plateforme NanoWalker aurait à dissiper une énergie thermique estimée de plus de 17kW/h (à 100% de puissance) [9] vers l'air ambiant, un conduit vers l'extérieur du bâtiment devrait être installé ou un système de refroidissement par eau avec une vitesse de flux d'environ 16 litres/min à 25°C devrait être utilisé. Mise à part du réchauffement, les systèmes MR ne portent aucun dommage à l'environnement. Les systèmes LN2 par contre, dissipent toute la chaleur par l'Azote. Par conséquent, le gaz doit être libéré vers l'air environnant. En réalité, l'azote n'est pas toxique mais en le laissant s'échapper dans la salle du laboratoire, il déplacerait l'air contenant l'oxygène. Comme ceci serait nuisible pour le personnel du laboratoire un tuyau d'échappement pour l'azote devrait être installé.

En conclusion, les remarquables vitesses de refroidissement et les bas niveaux de vibration des systèmes de refroidissement LN2 rendent ce type de système plus attrayant pour l'application NanoWalker.

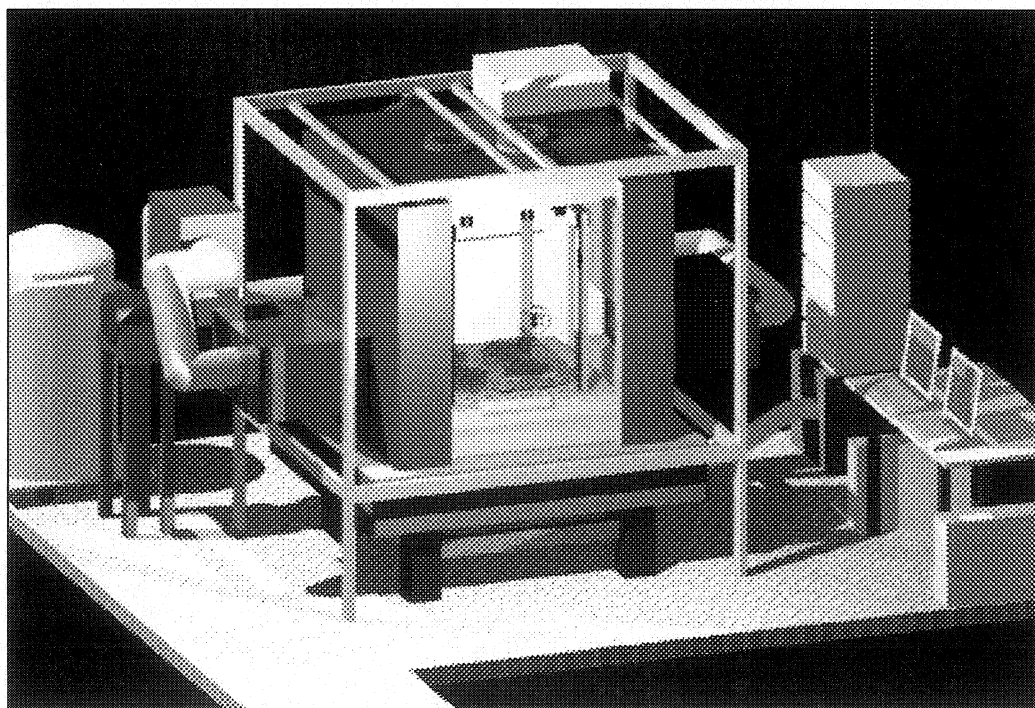


Figure 1.9 : Modèle d'un système de réfrigération externe [11].

1.4.5. Choix de l'atmosphère de travail

Une question de base doit être posée, à savoir l'environnement atmosphérique des robots. D'un point de vue pratique, les solides et les liquides ne sont pas des matières appropriées pour une telle application, parce qu'elles restreignent les mouvements du robot, et en même temps, l'opération du STM. Ceci conduit à un environnement gazeux. Un gaz utilisé pour l'atmosphère de la plateforme NanoWalker devrait avoir les caractéristiques suivantes :

- Un haut coefficient k de conductivité thermique;
- Un haut coefficient h de convection thermique;
- Aucune réactivité chimique;
- Aucun contenu d'humidité;
- Ne doit pas nuire à l'environnement;
- Haute disponibilité / basse dépense d'opérations.

Pour assurer un taux élevé de transfert de chaleur utilisant les modes de transfert de chaleur conduction et convection, les coefficients k de conductivité thermique et h de convection thermique du gaz devraient être aussi élevés que possible. De plus, le gaz devrait être non réactif, spécialement pour ne pas endommager la pointe STM ainsi que tout autre équipement dont on pourrait équiper le NanoWalker. L'humidité du gaz doit être aussi basse que possible pour ne pas produire de l'oxydation, de la glace à une température sous 0°C ou des courts circuits qui peuvent être causés par l'humidité de condensation. Bien sûr le gaz ne doit produire aucun dommage à l'environnement. Ceci pourrait signifier ne pas être explosif ou dangereux dans n'importe quel sens. Enfin, le gaz devrait avoir une grande disponibilité, devrait être facile à manipuler et les coûts d'opération devraient être minimisés. Dans ce qui suit, nous nous proposons de comparer quatre gaz: hydrogène (H_2), hélium (He), air et azote (N_2). Les résultats de

comparaison sont regroupés dans le tableau suivant (Tableau 1.3) avec quatre différentes marques : * (excellent), + (bon), O (moyen), - (faible).

Tableau 1.3 : Évaluation de quatre gaz pour l'environnement de travail [11].

	H ₂	He	Air	N ₂
Haut conductivité thermique <i>k</i>	*	+	-	-
Haut convection thermique <i>h</i>	*	+	-	-
Non réactif	-	*	O	+
Non humidité	*	*	O	+
Aucun dommage à l'environnement	-	+	*	+
Grande disponibilité/ Coûts d'opération bas	O	O	*	+

En récapitulant et d'après ce tableau, il est évident que l'hydrogène a, avec un très grand avantage, les meilleures propriétés de transfert de chaleur de tous les gaz. Il a d'excellents coefficients de conductivité thermique et de convection. Mais d'un autre côté l'hydrogène est très réactif et lorsqu'il est en contact avec le gaz oxygène, une réaction chimique exothermique incontrôlable peut survenir produisant une explosion. A cause de ce risque l'hydrogène n'est plus un candidat valable pour une telle application. L'hélium par contre est un gaz inerte qui présente de plus les mêmes bonnes caractéristiques de transfert de chaleur que l'hydrogène. Il ne montre aucune réactivité, et de cette façon il n'endommagera pas la pointe STM ou autre équipement de la plateforme NanoWalker. Le principal désavantage est: comme l'atome d'hélium est le deuxième plus petit atome après l'hydrogène, beaucoup d'efforts doivent être réalisés pour éviter des fuites quand on a une atmosphère d'hélium dans un système hermétiquement scellé. Ceci rend nécessaire l'utilisation de garnitures et joints spécialement conçus. Comparés avec l'hélium, les molécules d'air et N₂ sont beaucoup plus grandes et par conséquent n'ont pas besoin de joints aussi élaborés. En plus, l'air est facilement disponible sur la terre. L'humidité naturelle de l'air peut être facilement

éliminée avec un filtre. Mais, les caractéristiques de transfert de chaleur de l'air sont plutôt pauvres et son taux d'oxygène pourrait produire l'oxydation de la pointe du STM. L'oxydation et l'humidité de condensation peuvent être évitées en utilisant de l'azote. Il a presque le même taux de transfert de chaleur que l'air mais il doit être fourni dans des conteneurs spéciaux. Après comparaison, par ses excellentes propriétés de transfert de chaleur et parce qu'il est inerte, l'hélium se révèle être le gaz le plus approprié pour l'environnement de la plateforme du NanoWalker.

1.5. Chambre de Refroidissement

Au cours de l'été 2002, il fut décidé qu'une chambre de refroidissement serait fabriquée pour conserver les robots à température constante. Andreas Shindler, un assistant de recherche du laboratoire, a conçu une chambre pouvant accueillir cent robots. Au cours de l'automne et de l'hiver 2003, Gérard Katchouni, un employé de la compagnie Cryotronix Inc., a fabriqué la chambre. À l'été 2003, la chambre fut livrée.

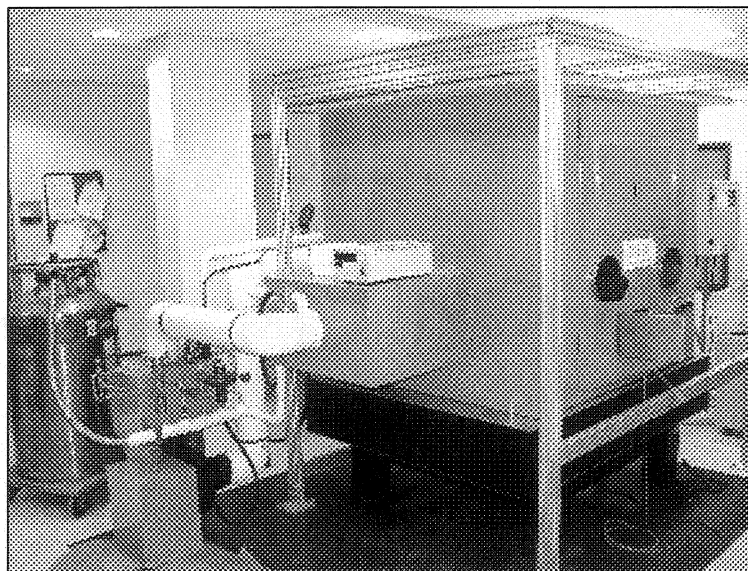


Figure 1.10 : Système de refroidissement et plateforme de travail NanoWalker.

Il s'agit d'un système de refroidissement de type cryogénique LN2. Avant tout, l'atmosphère autour des robots est constituée d'hélium, circulant en circuit fermé et contrôlé par un ventilateur de vitesse variable. Après le ventilateur, le gaz entre dans l'échangeur de chaleur, dans lequel l'hélium est refroidi par azote liquide. Le LN2 subit une expansion dans une canalisation en cuivre qui fournit un taux adéquat de transfert de chaleur. L'azote liquide est fourni par un réservoir extérieur isolé thermiquement. La quantité d'entrée de l'azote dans l'échangeur de chaleur est contrôlée par une valve spéciale. Dans l'échangeur de chaleur, après ébullition le LN2 subit un changement d'état (liquide à gaz). Ensuite, l'azote quitte l'échangeur de chaleur par un tuyau d'échappement vers l'air environnant. Avant que le système de refroidissement ne devienne opérationnel, la chambre de refroidissement est purgée avec de l'hélium fourni par un réservoir extérieur. Lorsque l'hélium entre dans l'enceinte, l'air est expulsé à travers une valve de sortie d'air. L'hélium entre et quitte l'environnement de travail par deux diffuseurs. Les diffuseurs ont la forme d'un entonnoir pour éviter autant que possible les turbulences de l'hélium.

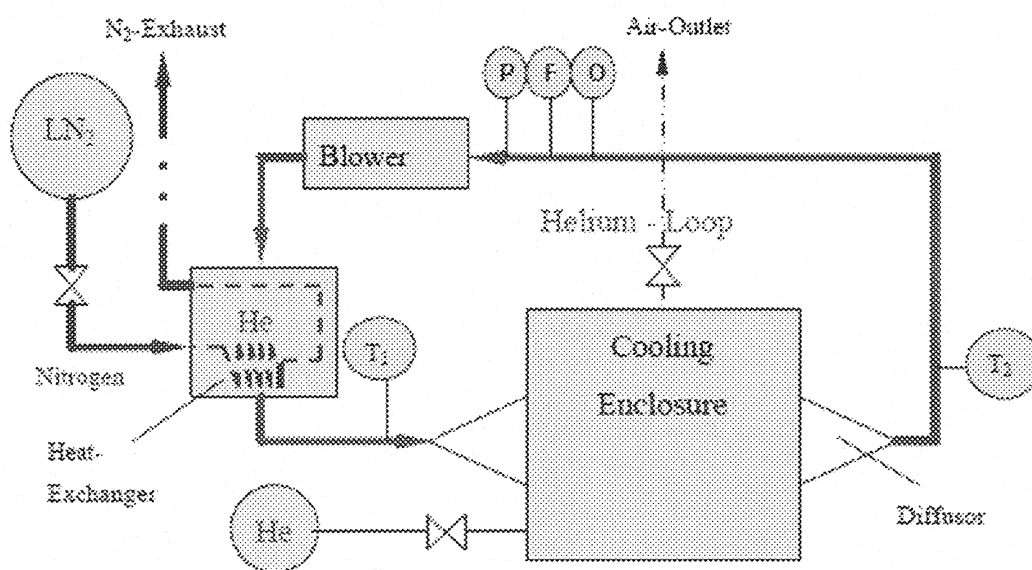


Figure 1.11 : Éléments du système de refroidissement [11].

Le système est équipé de plusieurs capteurs de température, de pression, d'humidité et d'oxygène. Les capteurs d'humidité et d'oxygène sont placés à l'entrée du ventilateur tandis que le capteur de pression se trouve à la sortie. Les capteurs de température quant à eux sont placés à l'entrée et sortie de la chambre. Les signaux de température d'entrée comme ceux de la température de sortie, constituent le signal d'entrée pour le contrôleur de température. Pour de plus amples informations sur le système de refroidissement voir l'annexe A.

1.5.1. Contrôleur du système de refroidissement

La chambre de refroidissement est régie par un contrôleur industriel PLC appelé «T100MD1616+ PLC» fabriqué par la compagnie «Triangle Research International Pte Ltd». La carte comprend un maximum de 6 entrées analogiques et 2 sorties analogiques.

Dans notre système les valeurs analogiques lues sont:

- 1- Le niveau d'oxygène (Oxygen Level);
- 2- L'humidité Relative (Relative Humidity);
- 3- La pression (Pressure);
- 4- La température à l'entrée (Inlet Temperature);
- 5- La température à la sortie (Outlet Temperature);
- 6- La température à l'échappement (Exhaust Temperature).

Les deux sorties analogiques sont :

- 1- La vitesse du ventilateur (Blower Speed);
- 2- La valeur de l'ouverture de la valve (Output to LN2 valve).

De plus la carte a 8 E/S digitales, ainsi comme un interface de communication RS232
Pour éditer, compiler et simuler le software nous avons utilisé l'environnement de

programmation TRILOGI Version 4.1. Le PLC est programmé à l'aide de programmation Ladder Logique. Pour chaque ligne de circuit logique on peut exécuter des fonctions utilisateurs ou «Custom Function» (CusFn). Nous avons la possibilité de programmer 256 fonctions [18].

Dans les «CusFn» nous utilisons des commandes TBASIC pour faciliter la programmation. Il y a des commandes pour travailler avec les périphériques EEPROM, DAC, LCD, Entrées/Sorties... Pour plus d'information regarder le Manuel de Référence TBASIC [18].

Par la suite, nous montrons deux fonctions importantes dans le programme. La première fait l'acquisition des 6 capteurs connectés au port des entrées analogiques. Une fois que le programme commence à s'exécuter, à chaque 0.1 seconde on effectue la lecture des valeurs des capteurs et on les convertit à la valeur physique. Avec la commande TBASIC $ADC(n)$ on lit le valeur du canal n. Pour convertir aux valeurs physiques il faut savoir le rang et les offset de chaque capteur. Toutes ces caractéristiques sont gardées en mémoire EEPROM et on a l'accès grâce à la commande $DM[n]$. Le PLC possède 26 variables de type «integer» et autres 26 variables de type «string». Pour tout le programme nous avons besoin de plus que 26 variables. Pour cette raison on enregistre les valeurs dont on a fait l'acquisition comme valeurs «string».

```
Custom Function #50
```

```
=====
```

```
Rem read all parameters as soon as plc powered up
```

```
U$=str$((100*((ADC(1)-DM[31]))/(DM[21]-DM[31]))*DM[11]/10-0) 'Oxygen
V$=str$((1000*((ADC(2)-DM[32]))/(DM[22]-DM[32]))*DM[12]/10-0) 'RH
W$=str$((1000*((ADC(3)-DM[33]))/(DM[23]-DM[33]))*DM[13]/10-0) 'Pressure
X$=str$((1000*((ADC(4)-DM[34]))/(DM[24]-DM[34]))*DM[14]/10-10000) 'TC1
Y$=str$((1000*((ADC(5)-DM[35]))/(DM[25]-DM[35]))*DM[15]/10-10000) 'TC2
Z$=str$((1000*((ADC(6)-DM[36]))/(DM[26]-DM[36]))*DM[16]/10-10000) 'TC3
```

La seconde fonction est une partie du cycle d'opération. A partir de la température de la chambre et de la consigne de température, on calcule l'erreur dont le contrôleur PID (description à la section 2.4) implémenté pour un commande TBASIC que l'on tentera de minimiser. En fait, on utilise deux commandes TBASIC, *PIDdef* pour configurer le contrôleur et *PIDcompute* pour calculer la valeur de la commande.

PIDdef ch, lmt, P, I, D où ch : canal (1-16)

lmt : limite de saturation

P, I, D : Gains du PID (Kp, Ki, Kd)

PIDcompute (ch, Err) où ch : canal (1-16)

Err : Erreur en boucle fermée

La fonction de transfert du contrôleur PID implémenté par cette fonction est :

$$K(s) = K_p.E(s) + \frac{K_i}{s}E(s) + K_d.s.E(s). \quad (1.8)$$

Une fois que la commande (ouverture de la valve d'azote) est calculée nous envoyons la valeur à travers un canal du convertisseur Numérique/Analogique. Pour exécuter cette tâche on utilise une autre commande TBASIC, *setDAC*. A l'aide de la commande TBASIC *setLCD* on affiche différentes informations dans le LCD.

Custom Function #19

=====

Rem operation of chamber - stage 2

If T<999

setlcd 4,1,"Cool Stage "+str\$(J/2+1)+" SV="+str\$(M/100)+chr\$(223)+"C "

setbit output [3],5 ' get current temp.rate M

Else

```

setlcd 4,1,"End of Cycle Press ^      "
setDAC 2,0

Endif
Rem get process value
If U=1 V=VAL(X$):Endif
If U=2 V=VAL(Y$):Endif
If U=3 V=(VAL(X$)+VAL(Y$))/2:Endif
PIDdef 1,4096*100,C,D,E
H=(PIDcompute(1,ABS(M-V))/100)+820 ' 820 offset de la valve
setDAC 2,H
If VAL(Z$)<V-40 setDAC 2,(H-(H/10)):Endif ' exhaust temp.too cold
If M>V setDAC 2,0:Endif
SetDAC 1,R*(4096)/1200 ' set blower speed

```

1.5.2. Acquisition de données – DAQManager et RoomManager

C'est à l'aide de capteurs de température et du lien de communication infrarouge que les robots seront en mesure d'informer le système central de leur température propre et éventuellement des situations critiques qu'ils peuvent rencontrer [15]. Le schéma ci-dessous présente le parcours des informations de température:

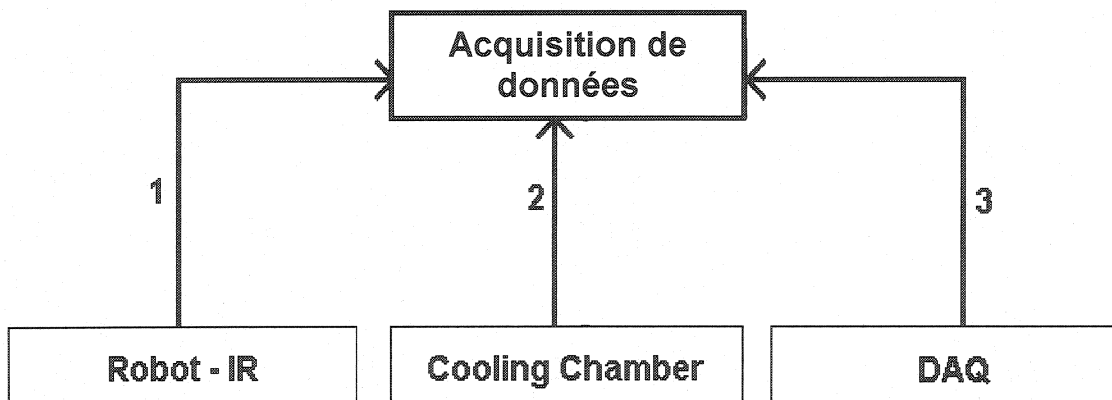


Figure 1.12 : Diagramme de flot de données.

Le robot, par ses capteurs de température, connaît sa propre température qu'il transmet au système par le lien infrarouge (1). La chambre de refroidissement possède deux capteurs de température. Un à l'entrée et un à la sortie de la chambre. Elle possède également d'autres capteurs (pression, humidité, ...). La chambre envoie donc des informations au système d'acquisition (2).

Comme le système de communication infrarouge est actuellement en développement nous avons introduit dans le système une carte d'acquisition (DAQ). Le DAQ possède huit capteurs de température et quatre capteurs de vibration. Il alimente également le système d'acquisition (3). Ce sont ces trois liens de communication qui alimenteront le système central pour lui permettre d'évaluer les conditions thermiques des NanoWalkers.

Afin de réaliser la boucle de retour, plusieurs modules logiciels doivent être mis en place. Bien que le lien de communication infrarouge entre les robots et le système central soit fondamental, il ne sera pas abordé dans ce rapport car il est en cours de développement. Les liens de communication implémentés sont :

- RoomManager: Ce module logiciel a été créé afin d'interfacer le système et la chambre de refroidissement. Ce module permet principalement de communiquer avec le système de refroidissement.
- DAQManager: Ce module permet d'interfacer le boîtier SCXI-1100 de National Instruments ([ww.ni.com](http://www.ni.com)) et faire l'acquisition des données des capteurs de température et de vibration et de convertir les voltages lus en données intelligibles.

RoomManager

La chambre de refroidissement possède plusieurs capteurs lus à travers le PLC qui nous permettent de connaître certains paramètres de l'environnement ainsi que d'autres informations qui peuvent être accédées sur le contrôleur. Parmi les données intéressantes, nous avons identifié les suivantes:

- 1- La température à atteindre (Temperature Set Value);
- 2- Le module de refroidissement (Cooling Stage);
- 3- La vitesse du ventilateur (Blower Speed);
- 4- Le niveau d'oxygène (Oxygen Level);
- 5- L'humidité relative (Relative Humidity);
- 6- La pression (Pressure);
- 7- La température à l'entrée (Inlet Temperature);
- 8- La température à la sortie (Outlet Temperature);
- 9- La température à l'échappement (Exhaust Temperature);
- 10- La valeur de l'ouverture de la valve (Output to LN2 valve).

Certaines de ces variables sont de type «integer» et d'autres de type «string». Il est ainsi nécessaire d'utiliser le bon format de commande pour accéder à ces variables. Pour obtenir les paramètres lus pour les différentes entrées analogiques du PLC il serait plus facile et rapide d'aller lire directement les valeurs des variables voulues directement sur le canal adéquat du convertisseur A/N. Pour effectuer cela, il faut aller lire les variables des systèmes (System Variables). Les types de blocs de commande pouvant être envoyés au contrôleur se retrouvent dans l'Annexe B. Ces commandes permettent de lire ou d'écrire différents types de données. Pour savoir l'emplacement des données dans la mémoire du contrôleur et les caractéristiques des canaux ADC, vous pouvez vous référer aux tables en Annexe B. La communication entre le PLC et le PC est de type RS-232 «half-duplex». Les blocs de commande envoyés au PLC pour lire les variables se

retrouvent dans l'annexe B. L'application RoomManager développé par Martin Mankiewicz permet de communiquer avec le PLC et se chargera de sauvegarder les données dans des fichiers.

DAQManager

Pour étudier le comportement en température des robots sans être dépendant du système infrarouge, la proposition d'achat d'un système d'acquisition de données est devenue nécessaire. Martin Mankiewicz a développé un logiciel d'acquisition de données des capteurs de National Instruments contrôlés à l'aide d'une carte PCI. Ce logiciel appelé DAQManager permet de configurer le matériel d'acquisition et d'obtenir des informations sur la température et les vibrations captées par les capteurs du matériel d'acquisition. Une interface permet d'afficher les données reçues pendant l'acquisition et l'application se chargera de les conserver dans des fichiers de sauvegarde. Le matériel utilisé a quatre composantes de la compagnie National Instruments: le châssis SCXI-1000, le SCXI-1112, le SCXI-1530 et la carte PCI-6036E. La carte PCI constitue l'interface entre le PC qui contrôle le DAQ et le châssis SCXI-1000. Le module d'acquisition SCXI-1112 a pour rôle de prendre la température de la chambre de refroidissement. Pour cela, il a 8 connecteurs permettant l'acquisition des capteurs de température (thermocouples type T). Ainsi on aura la température à 8 endroits différents de la chambre.

1.5.3. Réseau de résistances

Pour simuler la dissipation de la flotte de NanoWalker, Charles C. Tremblay a développé un réseau de résistances placées dans la chambre de refroidissement. Chaque NanoDummy (nom donné à la résistance pour simuler la dissipation de chaleur du

NanoWalker) est composé de quatre résistances de puissance de 5W branchées en parallèle et de deux fils connecteurs. Le circuit carré fait avec la machine de prototypage est recouvert d'une cage de cuivre pliée. Cette cage de cuivre vient se glisser sur les résistances de puissance comme des blocs de jeux. Un modèle a été fait en cuivre plein et usiné pour insérer les résistances de puissance. Ce modèle sert de calibration pour les autres NanoDummies fait de cuivre plié.

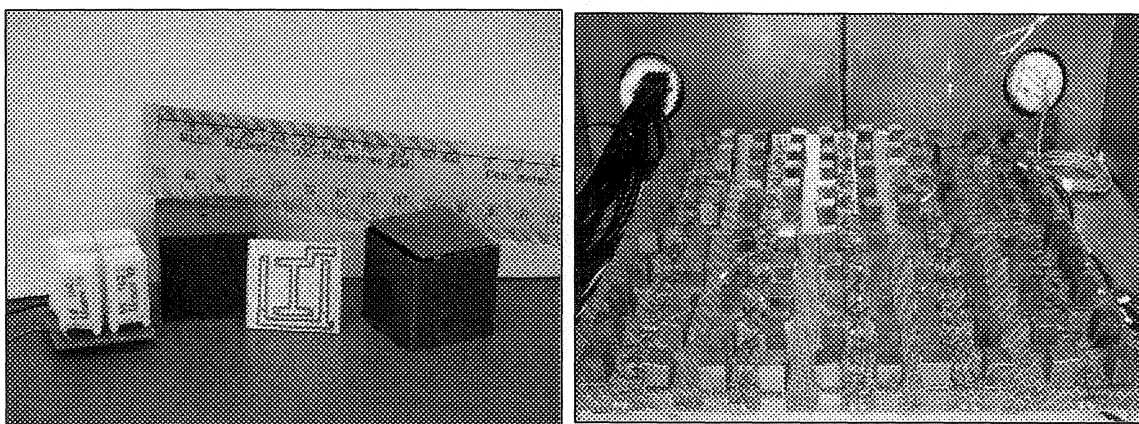


Figure 1.13 : NanoDummy et réseau de résistances.

Cent NanoDummy sont connectées en parallèle sur un support en bois recouvert d'un plancher de fibre de verre tissée (voir figure 1.13). Des câbles 10AWG sont vissés en surface pour éviter les courts circuits. Des bornes de connections en laiton permettent de faire les branchements des NanoDummies aux lignes d'alimentations. Le réseau est installé dans la chambre de refroidissement pour trouver les paramètres de l'environnement nécessaires au refroidissement de la vraie flotte de robots. L'alimentation se fait par l'intermédiaire de connecteurs, des marettes, à des fils qui traversent les murs de la chambre via un port de connexion. Les robots sont alimentés par une source de puissance de 3KW, modèle DCS12-250E de la compagnie Sorensen (www.sorensen.com). On fixe une tension derrière l'unité d'alimentation et cela fixe la sortie de courant maximale. L'unité d'alimentation est quant à elle équipée d'un «Overrun Voltage Protection (OVP)» qu'il est possible d'ajuster au moyen d'une vis sur

le panneau avant. Le circuit se comporte comme une résistance de puissance de $R=0,05$ ohm et permet de reproduire le comportement thermique de la flotte de NanoWalkers.

Étant donnée que la distribution de chaleur dans la chambre n'est pas homogène, huit thermocouples (le nombre étant limitée par la carte d'acquisition) sont placés sur la surface de huit NanoDummies (voir figure 1.14). Nous avons constaté, après plusieurs expériences, que la densité de chaleur est plus grande au milieu de la chambre que dans les coins. Ceci nous permettrait de faire une bonne analyse du pire cas par rapport à la différence de température entre les NanoWalkers. Par ailleurs notons qu'en plus des huit thermocouples dans la chambre, nous avons la température du diffuseur (*Tinlet*) et la température de la sortie (*Toutlet*) mesurées par le PLC. Grâce aux programmes DAQManager et RoomManager on enregistre toutes les données (soit les dix températures). Pour une vitesse de rotation du ventilateur de 1000 rpm nous avons mesuré un flux d'air dans la chambre non-homogène variant entre 0.2 m/s et 0.5 m/s .

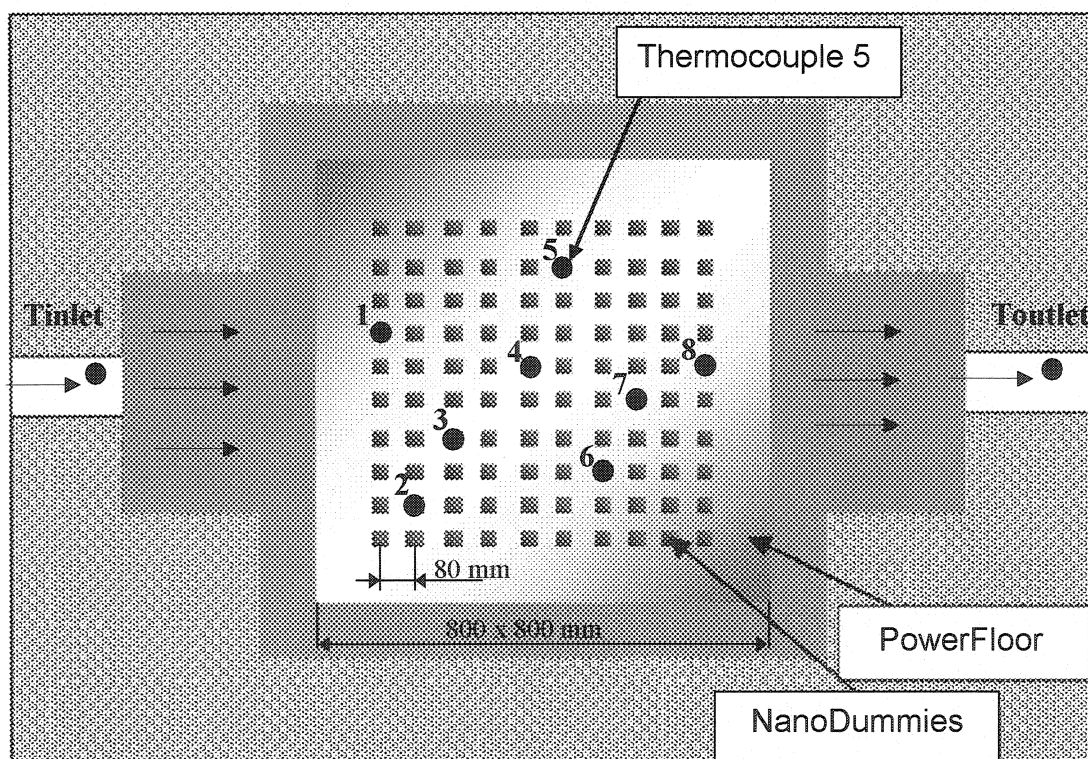


Figure 1.14 : Placement des thermocouples sur le réseau de résistance.

1.5.4. Caractérisation du système

Dans un problème de contrôle, il est toujours souhaitable de modéliser le système en équations différentielles pour concevoir un contrôleur qui permet de réagir de la façon la plus efficace possible. Mais ce n'est pas toujours possible de trouver les équations qui caractérisent le système à cause du nombre de paramètres qui interviennent dans le système. En l'occurrence il est essentiel de connaître le système à contrôler. Dans le diagramme de blocs suivant on peut voir la représentation très simplifiée de notre système où $K(s)$ est la fonction de transfert du contrôleur, $W(s)$ la fonction de transfert qui correspond à la perturbation provoquée par la chaleur dissipée sur la surface des NanoWalkers et $G(s)$ la fonction de transfert qui caractérise le processus thermique dans la chambre de refroidissement [16].

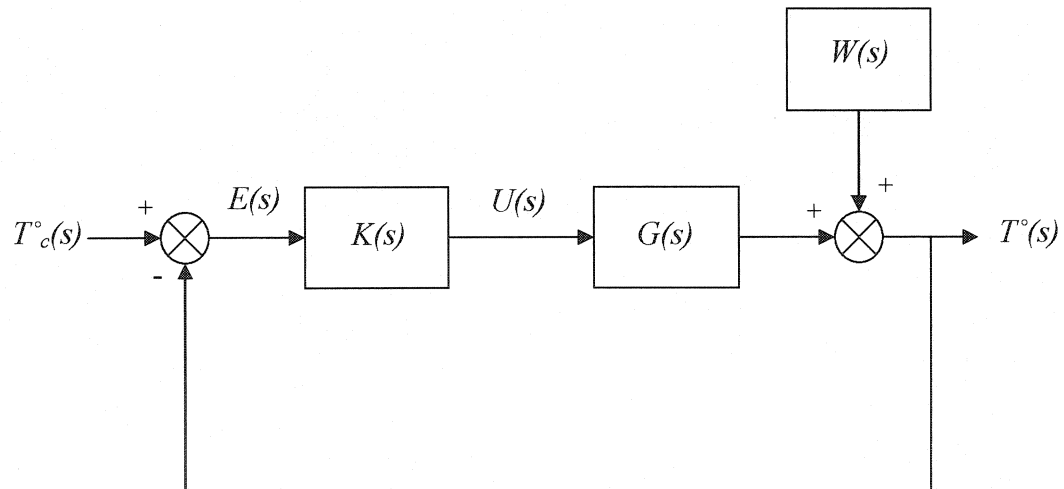


Figure 1.15 : Diagramme de blocs du système.

Le contrôleur utilisé est un contrôleur de type PLC où s'implémente un contrôle de fonction de transfert PID:

$$U(s) = K_p.E(s) + \frac{K_i}{s} E(s) + K_d.s.E(s). \quad (1.9)$$

La seule sortie du contrôleur, autrement dit la seule variable de contrôle est l'ouverture de la valve d'azote. La valve a un intervalle d'ouverture entre les valeurs numériques 820 (valve fermée) et 4096 (valve ouvert). Pour calculer l'ouverture nécessaire de la valve, le PLC fait la lecture de la température de l'air à l'entrée et la sortie de la chambre où les NanoWalkers vont travailler.

Mais il ne faut pas oublier que l'objectif est de contrôler la température de travail de chaque robot ou dispositif. Alors, si on considère une flotte de 100 NanoWalkers le système devient beaucoup plus complexe. Chaque robot travaille indépendamment, donc la perturbation pour la dissipation de puissance en chaleur sera différente pour chaque dispositif. De plus, à chaque position où se trouve le robot, la fonction de transfert qui caractérise le processus thermique sera aussi différente. Cependant, nous aurons la mesure de température par chaque NanoWalker, envoyée par infrarouge au système central. Dans ce cas pour une seule variable de contrôle nous avons un système de 100 sous-systèmes (voir figure 1.16).

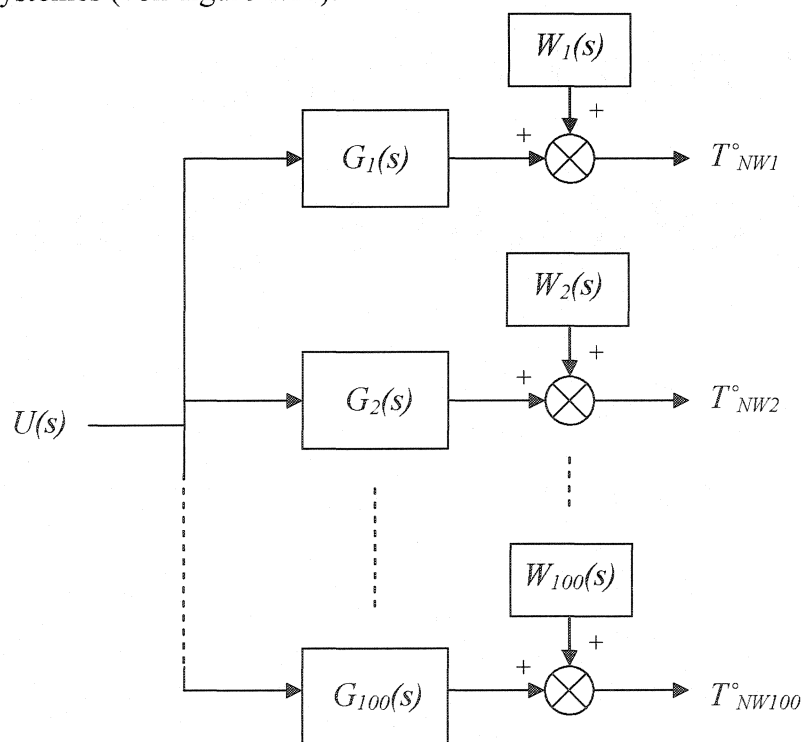


Figure 1.16 : Diagramme de blocs du sous-système.

La perturbation du système, $W(s)$, est le résultat de l'échauffement de la surface provoquée par la dissipation d'énergie par les composants électroniques des NanoWalkers. Le modèle d'échauffement pour la dissipation de l'énergie est caractérisé pour une fonction de transfert du premier ordre, avec un délai de τ , le coefficient K et une constante de temps égal à T [17] où:

$$W(s) = e^{-\tau_w \cdot s} \frac{K_w}{T_w s + 1}. \quad (1.10)$$

Dans ce cas, la température de chaque dispositif aura une perturbation correspondant à un système de premier ordre. Dans la figure 1.17 on montre les courbes d'échauffement pour une puissance de 15W pour chaque NanoDummy installé dans la chambre. On procède à la lecture des 8 thermocouples placés selon la figure 1.14. La ligne horizontale montre la température maximale d'opération des robots.

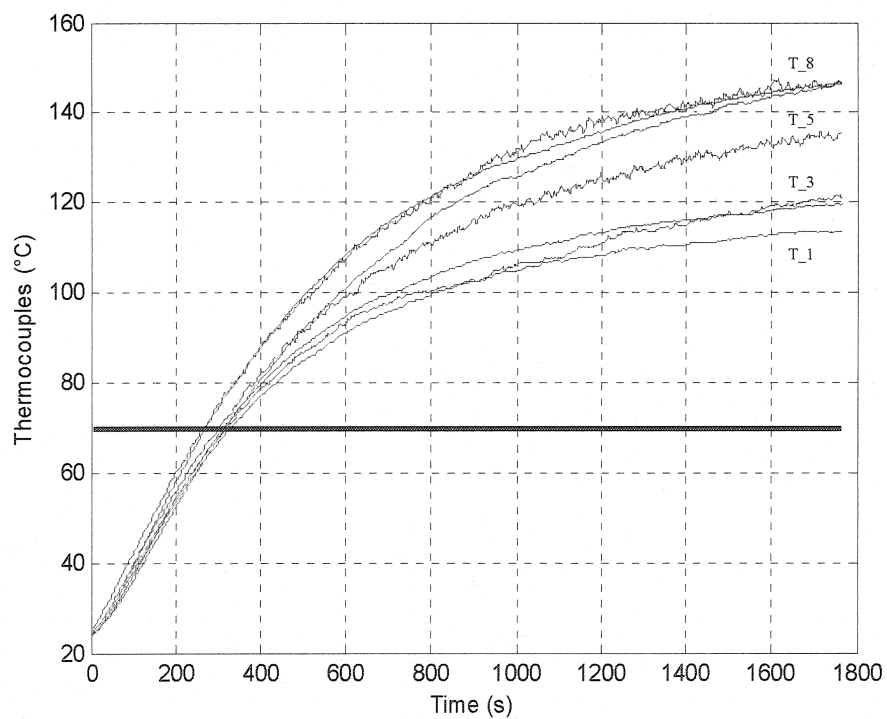


Figure 1.17 : Courbes d'échauffement à 15W/robot des huit thermocouples.

Les courbes correspondent à un système de premier ordre. On remarque une différence de température entre le thermocouple₁ et le thermocouple₈, d'une valeur de 40 degrés due à l'influence de la chaleur dissipée pour chaque dispositif et à la direction de l'air. À partir de la figure 1.17, la fonction de transfert de la perturbation moyenne pour une puissance de 15W est approximativement :

$$\overline{W}(s) = e^{-10.s} \frac{107}{725s + 1}. \quad (1.11)$$

Au moment de définir $G(s)$, la fonction de transfert qui caractérise le processus thermique dans la chambre de refroidissement, on remarque qu'il y a beaucoup de paramètres qui interviennent dans le système, par exemple: la vitesse du ventilateur, la pression du réservoir d'azote, la non linéarité de la valve, l'azote accumulé dans l'échangeur de chaleur, etc. De plus, la fonction de transfert sera différente pour chaque position où le NanoWalker se trouve. La figure 1.18 montre le processus d'échangeur de chaleur entre le circuit du gaz de l'environnement de travail et le circuit d'azote.

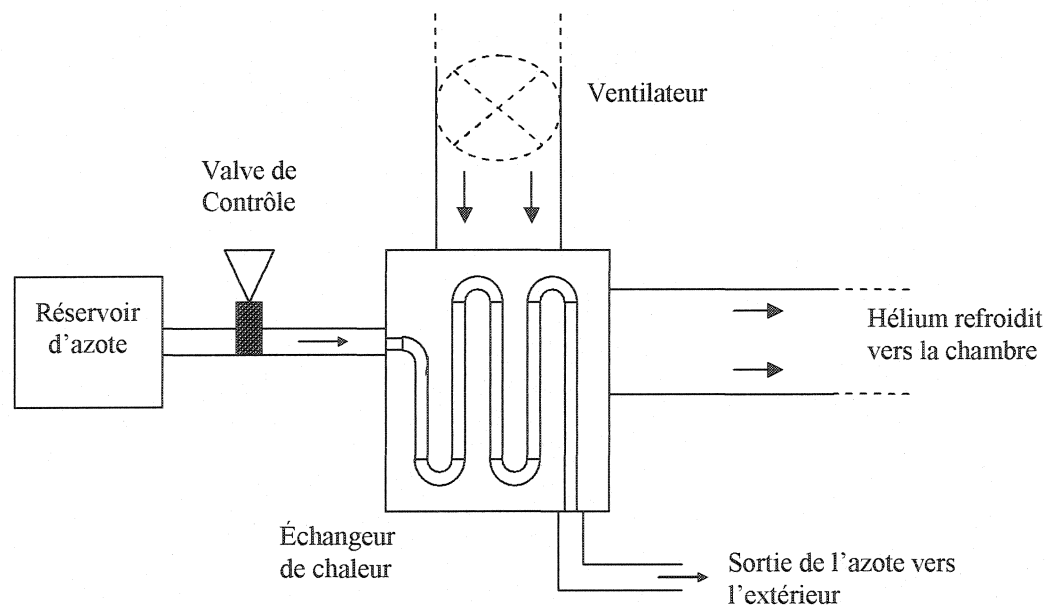


Figure 1.18 : L'échangeur de chaleur de la chambre de refroidissement.

Par conséquent il y a beaucoup d'inconnues qui varient dans le temps. Pour cette raison, la caractérisation du système de refroidissement est très complexe. Par contre, on peut supposer que le système se comporte comme un processus thermique.

Alors, on peut le modéliser par une fonction du transfert de premier ordre. La difficulté du système est que les coefficients de la fonction vont changer dans le temps, selon les conditions initiales et selon où se trouve dans la chambre.

$$G(s) = -e^{-\tau_G \cdot s} \frac{K_G}{T_G s + 1}. \quad (1.12)$$

Pour vérifier cette hypothèse nous avons réalisé le test en boucle ouverte. Pour une ouverture de la valve de 1100 (valeur numérique) pendant 90 secondes on voit la réponse en température dans la chambre. Au début du processus, nous constatons un délai avant le début du refroidissement de l'air à cause de la distance que doit parcourir l'azote avant d'arriver à l'échangeur de chaleur.

À la fin, même si la valve est fermée l'air refroidit encore et cela est dû à l'accumulation d'azote dans l'échangeur d'azote. Quand l'azote perd son pouvoir de refroidissement, la température cherchera à retrouver sa valeur d'équilibre (voir figure 1.19):

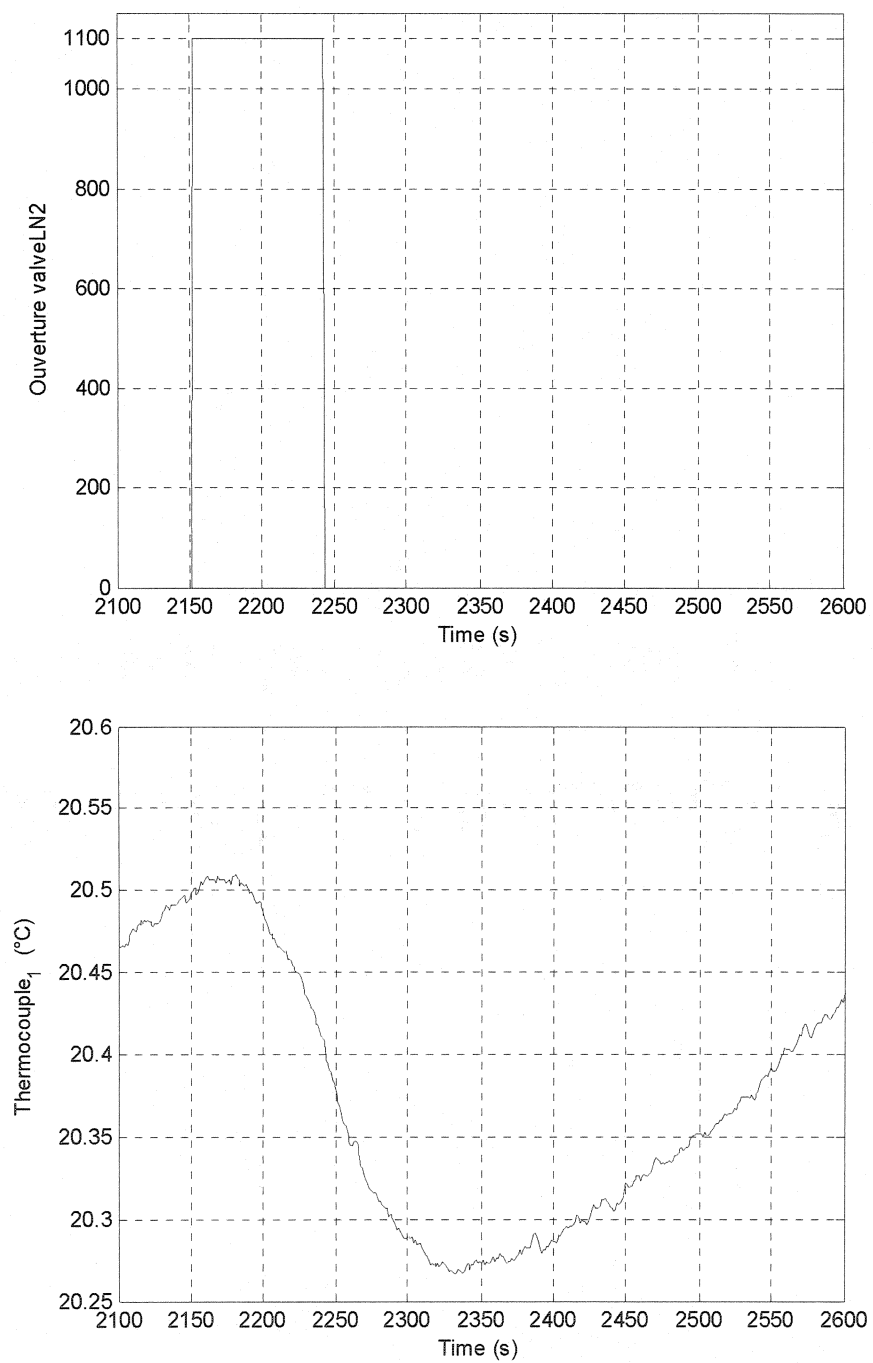


Figure 1.19 : Courbes de refroidissement pour une ouverture de 1100.

1.6. Test de fonctionnement

Cette section regroupe les résultats expérimentaux obtenus ainsi que les interprétations. Nous ne présenterons pas tous les tests effectués au laboratoire, cependant il faut noter qu'ils ont tous été enregistrés et ordonnés chronologiquement sur *W:\nanowalker\Platform\CoolingChamber\Tests*. En l'occurrence nous présenterons les résultats les plus significatifs correspondants aux régimes transitoires et permanents, aux perturbations ainsi qu'aux différentes stratégies de contrôle employées. Comme la constante de temps du processus thermique est très grande, les tests prennent beaucoup de temps. De plus, il est très difficile de démarrer les tests avec les mêmes conditions initiales car cela dépend fortement des paramètres de l'environnement. Notons que la plupart des tests sont faits avec l'air comme gaz de travail pour éviter de gaspiller l'hélium, définit comme gaz de l'environnement.

1.6.1. Premiers tests et description des problèmes

L'objectif des premiers tests était de connaître le comportement du système de contrôle conçu chez Cryotronix. Nous recherchions à voir comment le système réagissait en régime transitoire et en régime permanent. Dans la figure 1.20 on voit la réponse en mode suiveur (réponse à la consigne à partir de la température ambiante 22.5°C à 10°C). On remarque un refroidissement qui dépasse largement 10°C sans stabilisation autour de cette valeur. La figure 1.21 montre la courbe correspondant à la réponse en mode régulateur. Le but est de maintenir la température à 16°C. On constate que le contrôleur n'arrive pas à réguler la température. Une fois que la température dépasse les 16°C, le contrôleur donne une ouverture de valve trop importante qui faisait baisser la température dans la chambre jusqu'à 2°C. Une fois que la température de la chambre monte à la température de consigne, le contrôleur n'est plus capable de réguler.

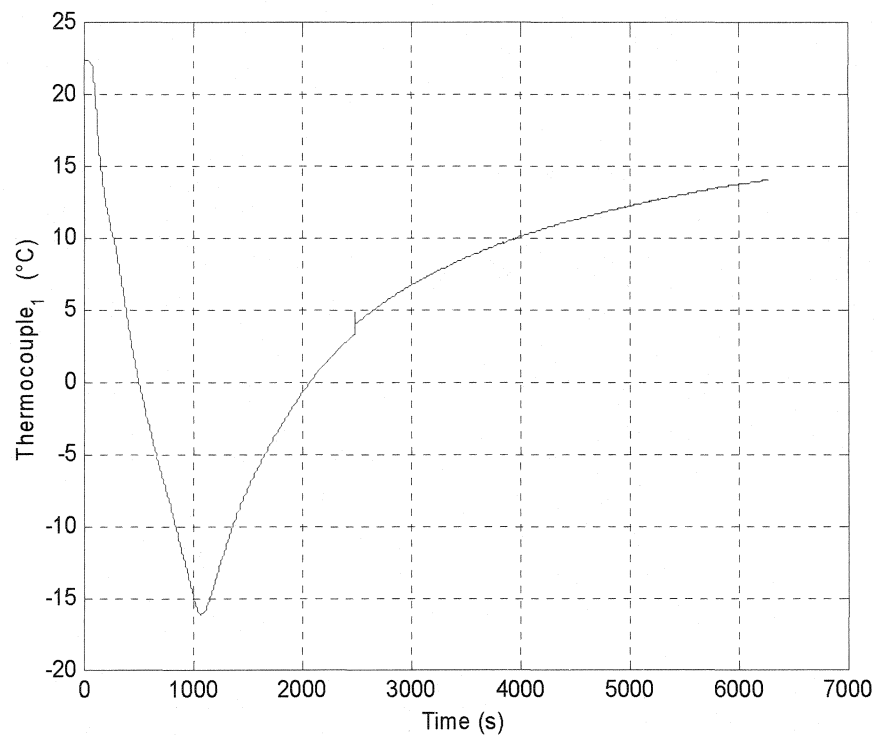


Figure 1.20 : Réponse en mode suiveur. Consigne de 23°C à 10°C.

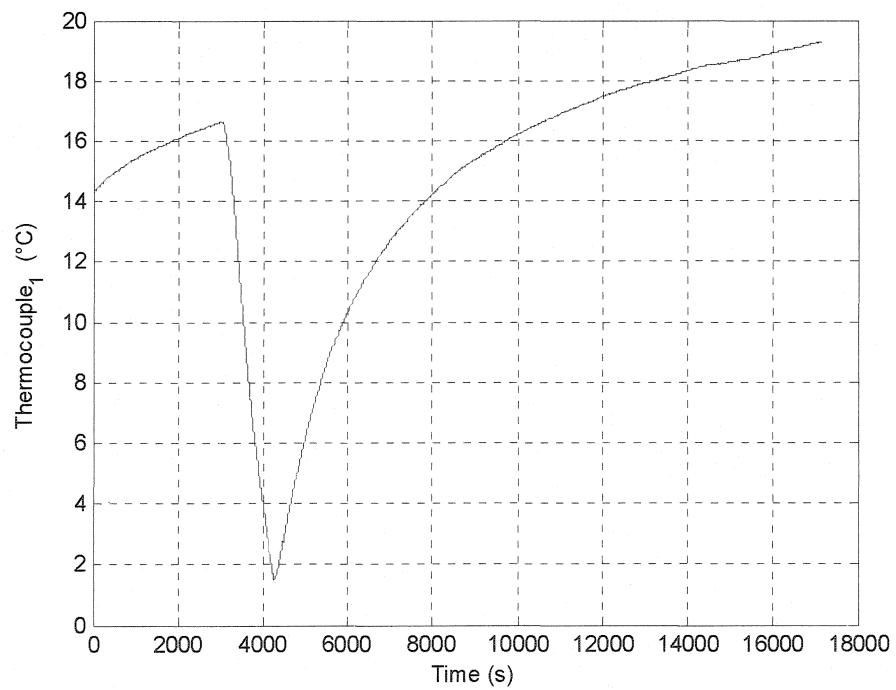


Figure 1.21 : Réponse en mode régulateur. Consigne 16°C.

Rappelons que l'objectif du système de refroidissement est de maintenir la température de la flotte de NanoWalker dans l'intervalle thermique d'opération (0°C - 70°C) et que chaque NanoWalker va dissiper une puissance moyenne de 15W. Sur la figure 1.22 on voit la courbe de température prise sur la surface d'une NanoDummy qui dissipe 10 W où la température doit être maintenue autour de 20°C (température de consigne). La réponse du système montre clairement que ce dernier n'est pas encore opérationnel. Par la suite, il nous faudra identifier les problèmes et étudier différentes stratégies de contrôle qui permettront d'améliorer la réponse de notre système.

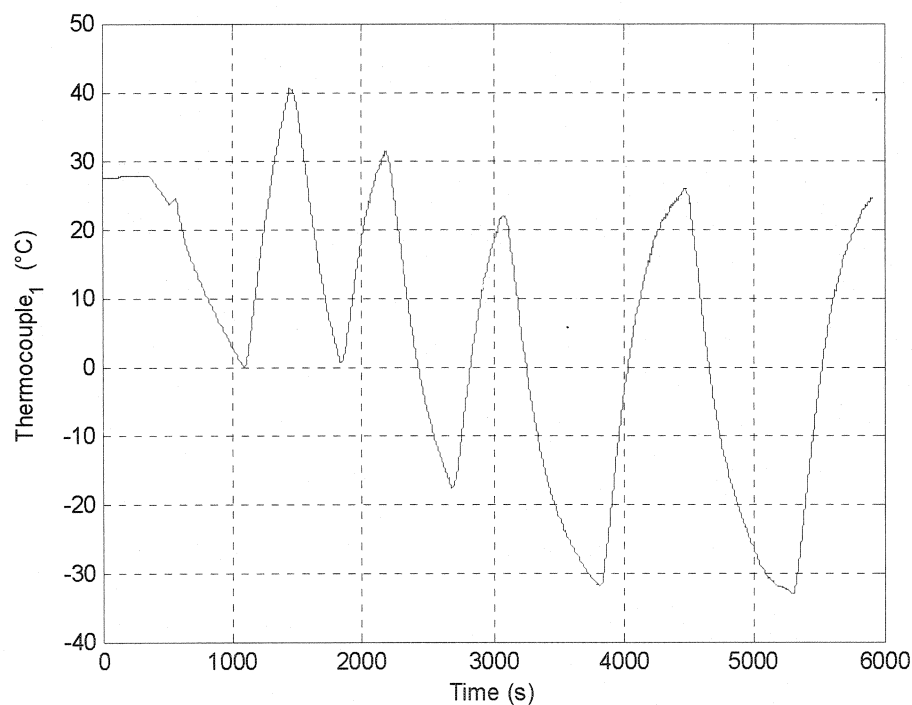


Figure 1.22 : Régulation de température à 30°C avec 10W/robot de puissance dissipée.

En effet, ces premiers tests nous ont permis de constater que le contrôle industriel de la chambre implémenté dans le PLC est inefficace pour notre application. Un problème que nous avons identifié rapidement est que le contrôleur PID effectue le calcul de l'ouverture de la valve à partir de la différence entre les températures de l'air relevée à l'entrée et à la sortie de la chambre. En effet cette différence est très grande lorsqu'on

sait que le thermocouple T_{inlet} se trouve juste à la sortie de l'échangeur de chaleur ou l'air est très froid tandis que le thermocouple T_{outlet} est juste à la sortie de la chambre. Dans la figure 1.23 on voit que la différence peut atteindre jusqu'à 80°C.

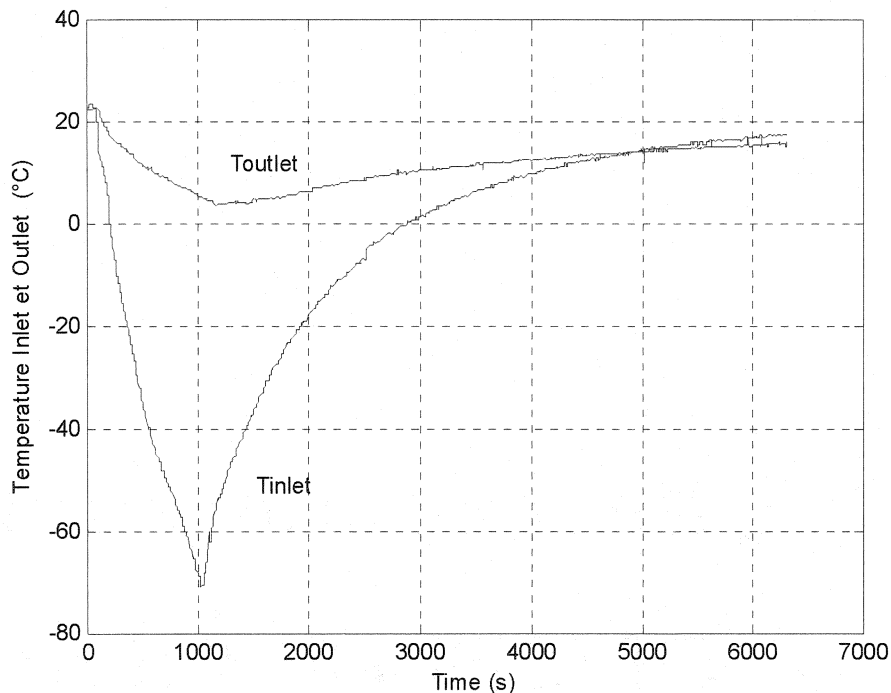


Figure 1.23 : Différence de température entre T_{inlet} et T_{outlet} .

De plus, la routine exécutée dans le contrôle du PLC fait le calcul d'une consigne interne pour comparer avec la température dans la chambre et corriger l'erreur. Mais ce calcul de consigne prend des valeurs trop brusquement et cause une saturation du contrôleur. Une fois que l'erreur est négative, la consigne accumule des valeurs positives, ce qui rend le système encore plus lent.

Donc, il faut solutionner ces deux problèmes. L'étape suivante consiste à reprogrammer le PLC pour arriver à réguler la température de façon plus stable.

1.6.2. Amélioration du programme PLC

La première étape pour améliorer notre système de contrôle consiste à modifier le programme qui permet de générer la consigne interne afin que la température puisse suivre la consigne de façon contrôlée. En d'autres termes, il s'agit de faire un contrôle doux, à partir de la température finale souhaitée et le temps de réponse désiré pour arriver à cette dernière. Ces deux données sont paramétrables par l'interface du PLC. Ainsi le programme va générer une consigne de type exponentielle. Sur la figure 1.24 on voit un exemple de génération de consigne pour arriver à 0°C.

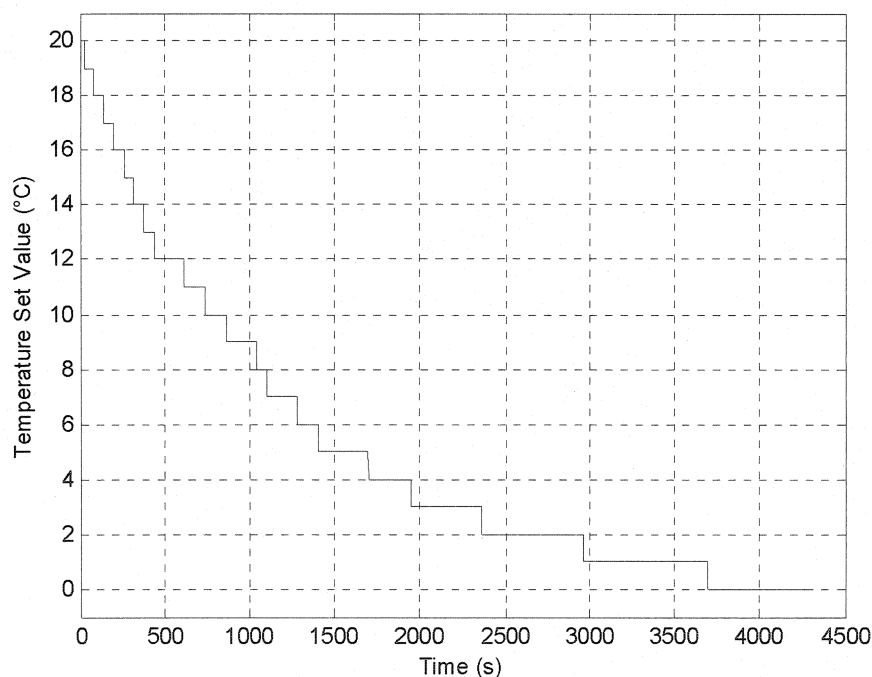


Figure 1.24 : Génération de la consigne interne.

La température de retour «feedback» sera la moyenne entre le T_{inlet} et T_{outlet} . On sait que l'emplacement de ces deux thermocouples dans la chambre n'est pas optimisé, mais le système a déjà été conçu ainsi et l'objectif premier de ce mémoire était d'améliorer le système tel qu'il avait été conçu. À la figure 1.25 on voit que la réponse du système à la consigne présentée précédemment montre une nette amélioration. En fait, le système de refroidissement régule la température de façon stable. Les régimes transitoire et

permanent sont représentés par cette même courbe. On remarque une oscillation de 0.75°C degrés dans le régime permanent due aux délais du système de refroidissement.

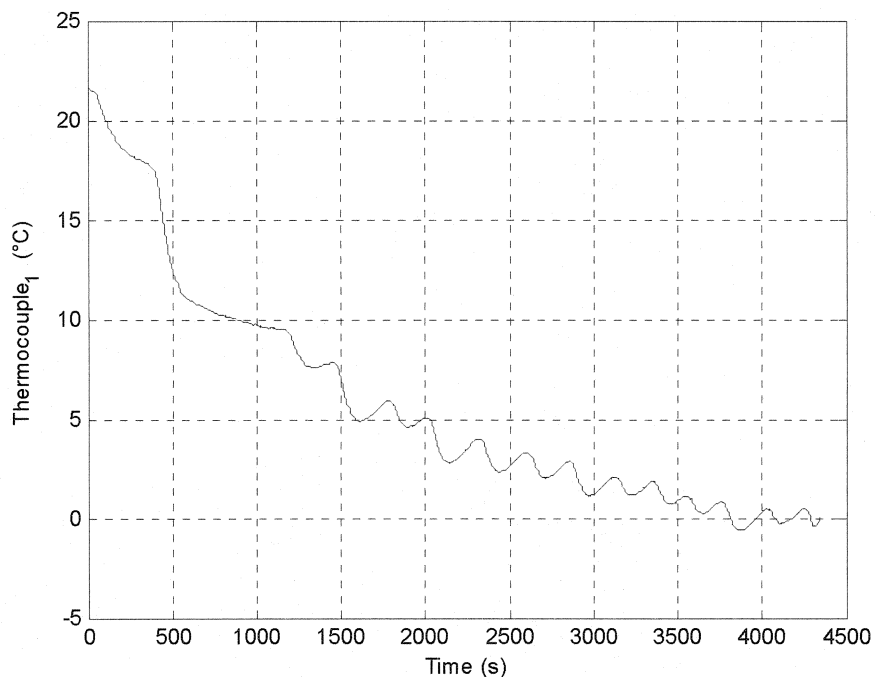


Figure 1.25 : Réponse de la température dans la chambre à la consigne interne générée.

Lorsqu'on met la puissance au réseau de résistance, le système est capable de contrôler la température dans la chambre. La figure 1.26 montre la courbe de température du thermocouple 1, placé à l'entrée de la chambre, et la température du thermocouple 8, placé près de la sortie de la chambre (voir figure 1.14). Pour une puissance dissipée de 10W/robot , la différence de températures donnée par les thermocouples est de 40°C . Les raisons qui justifient une telle différence sont :

- Le flux d'air froid circule de l'entrée de la chambre vers la sortie, et l'air perd son pouvoir de refroidissement durant ce trajet;
- La chaleur dissipée par les NanoWalkers situés à l'entrée va se rajouter à celle des NanoWalkers qui suivent;
- La chambre a un volume d'air très grand.

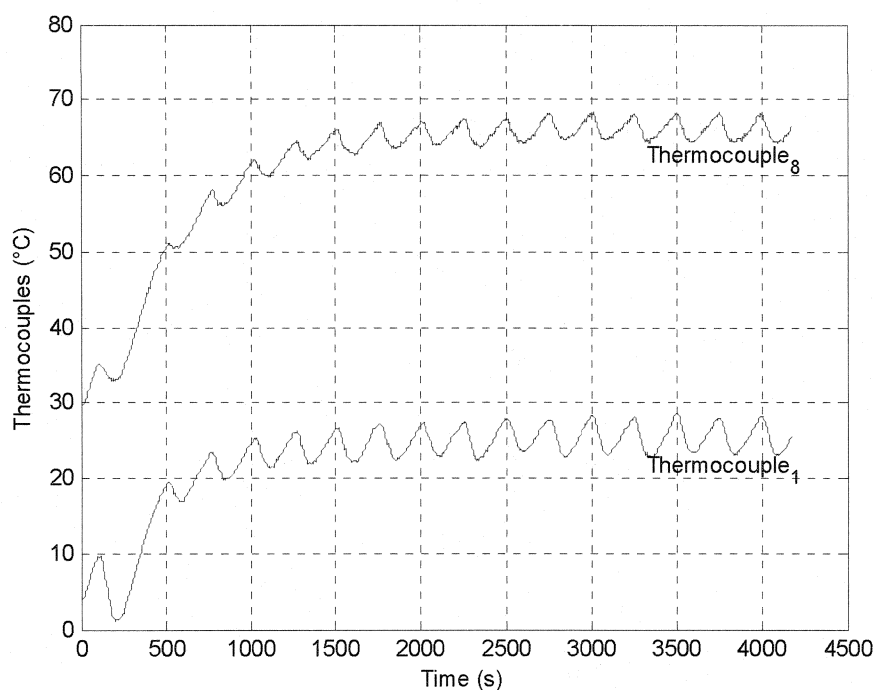


Figure 1.26 : Régulation de température, 10W/robot de puissance dissipée, consigne à -15°C .

De plus, même si l'objectif est de contrôler la température de la surface des NanoWalkers, le système de contrôle ne considère pas la température des NanoWalkers (pas de feedback sur cette température). Par conséquent, il faut déterminer la température nécessaire dans la chambre pour maintenir la température de sa surface dans l'intervalle de travail des NanoWalkers pour chaque puissance dissipée. Par exemple, pour le cas de la figure 1.26, on a une consigne de température dans la chambre de -15°C pour une puissance de 10W/robot.

Dans ce cas on voit la nécessité de concevoir un contrôleur externe qui procédera au calcul de l'ouverture de la valve nécessaire pour maintenir la température stable dans l'intervalle de travail, (entre 0°C et 70°C). Ce calcul doit nécessairement être effectué à partir de la température de la surface des NanoWalkers pour n'importe quelle puissance dissipée.

1.6.3. Contrôle externe

L'implémentation du contrôleur externe a été effectuée par le biais des deux programmes d'acquisition, DAQManager et RoomManager. Le premier communique avec la carte d'acquisition des thermocouples placés sur la surface des NanoWalkers et le second communique avec le PLC. A partir de ces deux programmes nous avons développé un programme pour lire la température des thermocouples, calculer l'ouverture de la valve et envoyer la valeur au PLC. Le PLC demeure et assure la connexion avec les actuateurs. Nous avons reprogrammé le PLC pour choisir un contrôle interne ou externe. Si le contrôle se fait de façon externe, le module de contrôle (programme exécuté sur un ordinateur) écrit sur le même registre de l'ouverture de la valve du PLC, et le PLC à chaque seconde envoie la commande à la valve. Toutes les autres fonctions de surveillance qui sont assurées par le PLC restent intactes.

En profitant de la puissance de calcul de l'ordinateur et de sa flexibilité nous avons implémenté différentes stratégies de contrôle. Dans ce qui suit, nous présentons les deux contrôleurs implémentés, contrôle Tout-Rien (Relay) et PID. Le lecteur doit se reporter à l'annexe C s'il souhaite prendre connaissance du code.

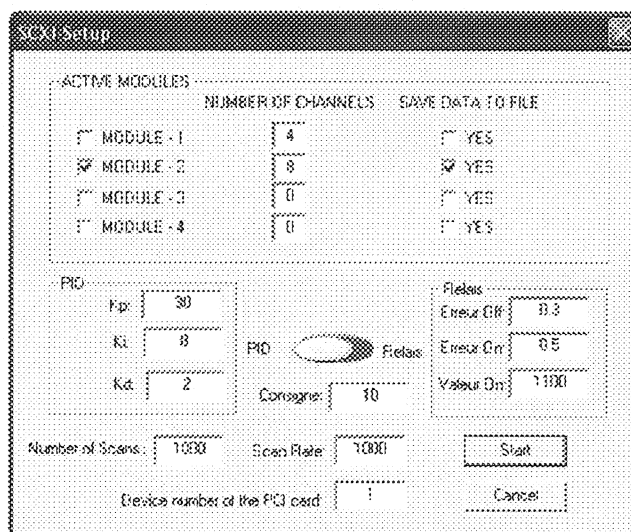


Figure 1.27 : Interface du module de contrôle externe Tout-Rien/PID.

Contrôle Tout-Rien :

La première stratégie de contrôle implémentée a été le contrôle Tout-Rien. Le système de contrôle implémenté par un relais est facile, robuste et en même temps très utilisé dans le processus thermique. Pour pouvoir répondre aux perturbations de chaleur provoquées par la dissipation de puissance des NanoWalkers, nous avons conçu un contrôleur hybride, relais et contrôle proportionnel à la fois. La figure 1.28 montre le contrôleur Tout-Rien implémenté dans notre module de contrôle externe.

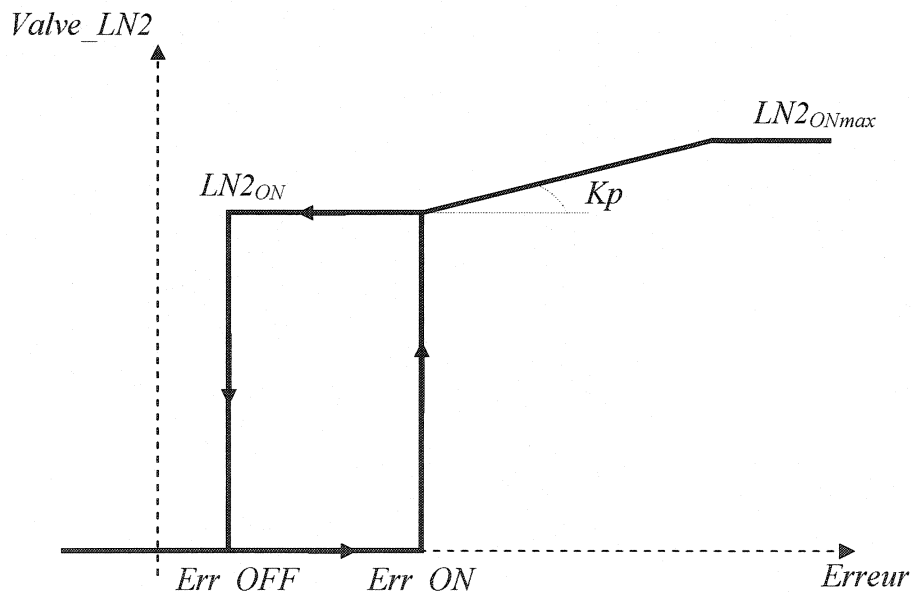


Figure 1.28 : Contrôleur Tout-Rien implémenté

Il y a 5 valeurs paramétrables : Err_ON et Err_OFF , valeur de l'erreur pour ouvrir et fermer la valve, $LN2_{ON}$ (valeur d'ouverture de la valve), K_p (coefficient proportionnel) et $LN2_{ONmax}$ (saturation de la commande). La température de feedback est la moyenne des températures mesurées par les 8 thermocouples placés sur la surface des NanoWalkers. La figure 1.29 montre la réponse de la température moyenne pour arriver à 10°C en démarrant de la température ambiante (21°C).

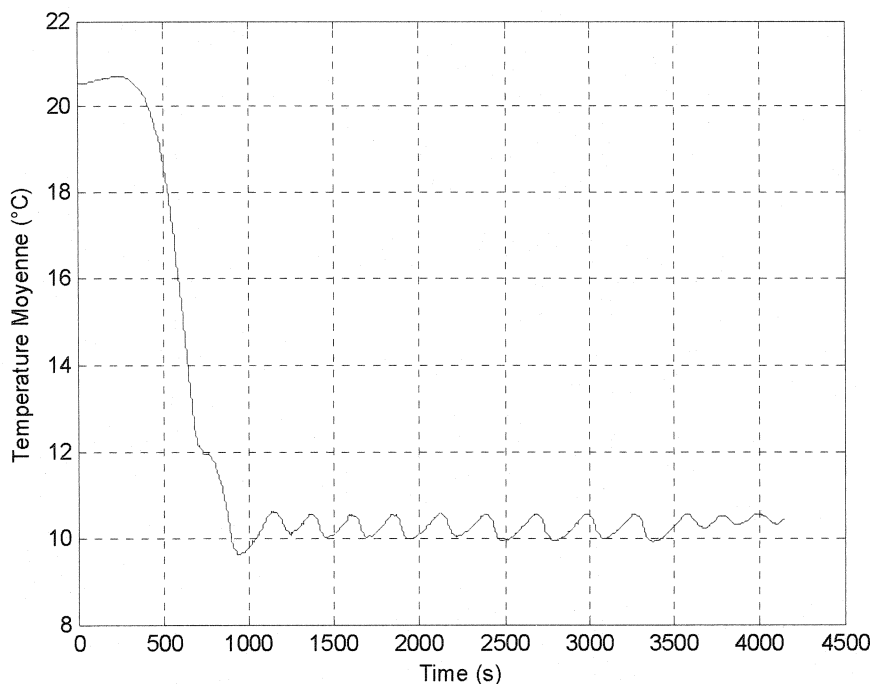


Figure 1.29 : Relais. Réponse de la température moyenne. Consigne 21°C -> 10°C

Telle qu'illustrée à la figure 1.29, nous constatons une très bonne réponse du système. Le dépassement est minimum. Par contre nous avons une petite oscillation (0.6°C) provoquée par le même contrôleur Tout-Rien, (un contrôleur de ce type, soit de type relais, va fonctionner avec une oscillation). Les valeurs utilisées après une étape d'ajustement sont $Err_{ON}=0.5$, $Err_{OFF}=0.4$, $LN2_{ON}=1100$ et $Kp=0$.

Lorsqu'on donne une perturbation de puissance (alimenter le réseau de résistance), il ne faut pas savoir à quelle température doit être la chambre. Le contrôleur va réguler la température moyenne des thermocouples autour de la consigne. Dans la figure 1.30 on voit la courbe de la température moyenne avec une perturbation de 10W (par NanoWalker). Dans ce cas, la valeur de Kp est 200, pour pouvoir réguler la perturbation. Même si le contrôleur arrive à maintenir la température de feedback autour de la valeur de consigne (20°C), la différence entre les thermocouples 1 et 8 est d'environ 40°C. Dans la figure 1.31 on voit la courbe de la commande.

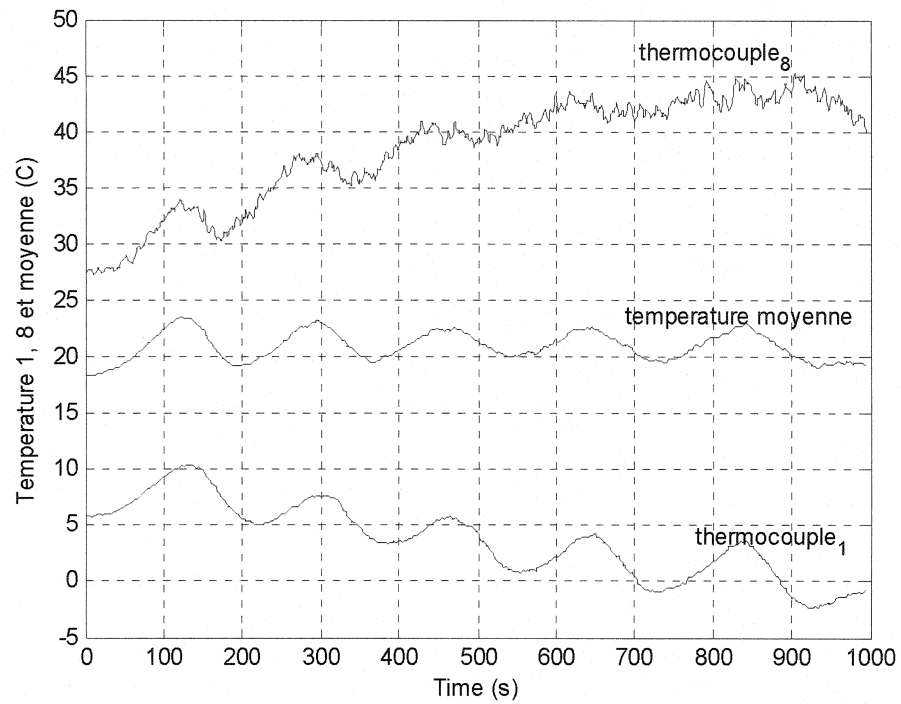


Figure 1.30 : Relais. Réponse températures 1, 8 et moyenne, consigne 20°C, puissance 10W/robot.

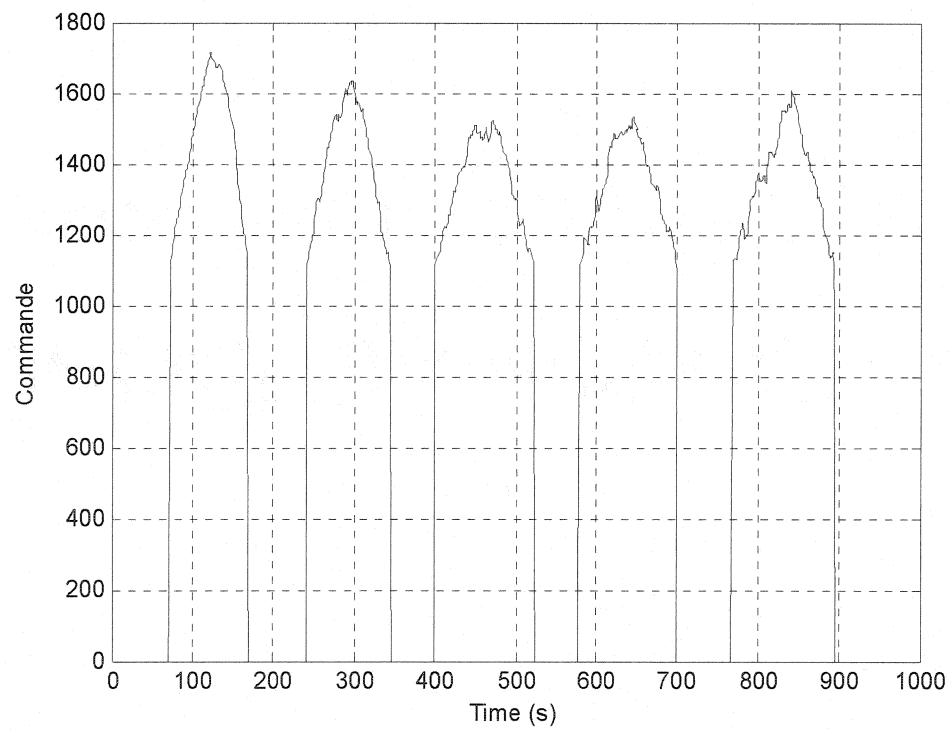


Figure 1.31 : Relais. Commande, consigne 20°C, puissance 10W/robot.

Contrôleur PID :

La deuxième stratégie de contrôle implémentée a été le contrôle PID. Le système de contrôle PID est très utilisé dans milieu industriel. La figure 1.32 montre le contrôleur PID implémenté dans notre module de contrôle externe.

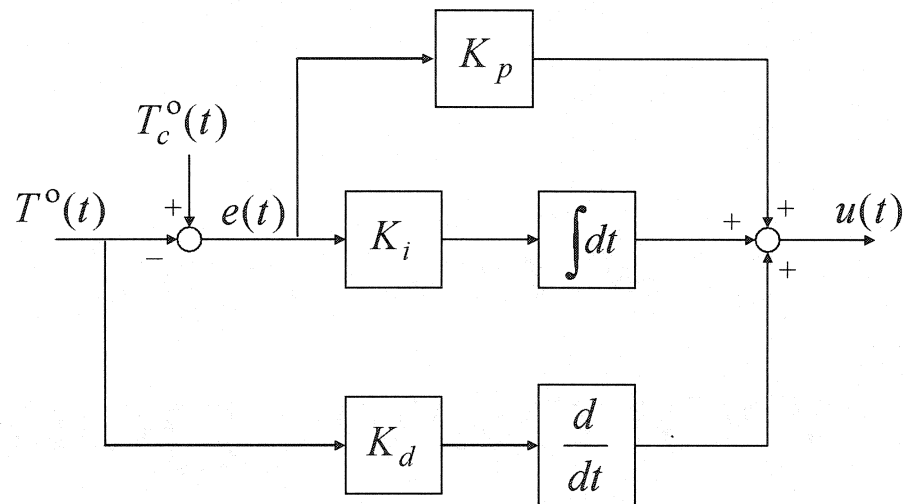


Figure1.32 : Contrôleur PID implémenté.

Il s'agit d'un contrôleur d'action dérivée séparée. En fait, l'action dérivée va réagir aux changements de température de feedback (la moyenne des 8 thermocouples placés sur la surface des NanoWalkers) plutôt qu'à l'erreur entre la température de consigne et le feedback. Un inconvénient de la structure PID est la génération de grandes amplitudes de la valeur de commande lorsqu'il y a des changements brusques au niveau de la consigne. Ce phénomène est dû au terme dérivatif. Pour palier à ce problème la solution consisterait à dériver la température de feedback $T^o(t)$, au lieu de dériver l'erreur entre la température de consigne et le feedback $e(t) = T_c^o(t) - T^o(t)$ [19]. La période d'échantillonnage est d'un seconde.

La figure suivante montre la réponse transitoire de la température moyenne pour arriver à 0°C à partir de la température ambiante (26°C) et la régulation autour de 0°C .

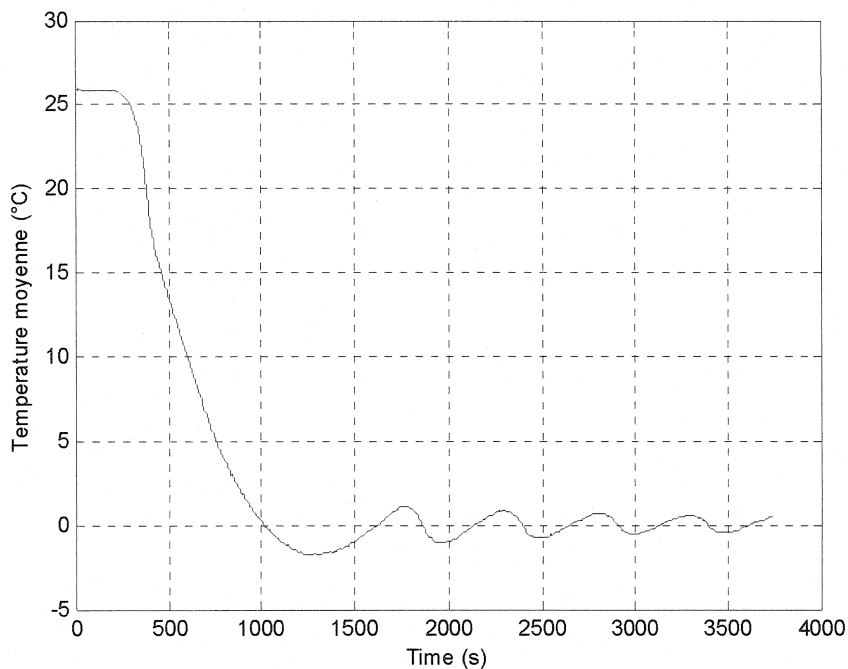


Figure 1.33 : PID. Réponse de la température moyenne, consigne 26°C -> 0°C.

Les résultats de la figure 1.33 montrent une réponse stable avec un dépassement minimum. De façon similaire, le contrôleur PID présente aussi une oscillation de 0.4°C imputé aux délais du système provoqué par la distance que l'azote doit parcourir. $K_p=200$, $K_i=10$ et $K_d=0.5$ sont les valeurs utilisées après la technique d'essai erreur. Notons que l'analyse analytique du contrôleur est très difficile car nous ne connaissons pas le modèle du système.

Lorsqu'on donne une perturbation de puissance, le contrôleur va réguler la température moyenne des thermocouples autour de la consigne qui est de 20°C. Dans la figure 1.34, on voit la courbe de température moyenne obtenue avec une perturbation de 10W par NanoWalker. La réponse est stable mais l'oscillation de la température moyenne est d'environ 5°C. Même si le contrôleur arrive à contrôler la température de feedback autour de la valeur de consigne (20°C), la différence entre les thermocouples 1 et 8 est encore d'environ 40 °C. Dans la figure 1.35 on voit la courbe de la commande.

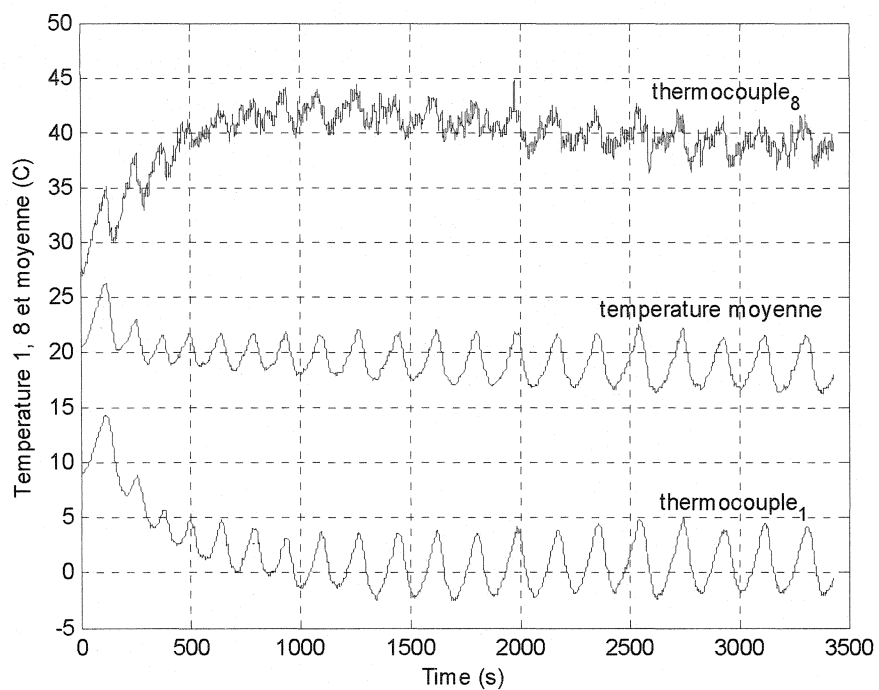


Figure 1.34 : PID. Réponse températures 1, 8 et moyenne, consigne 20°C, puissance 10W/robot.

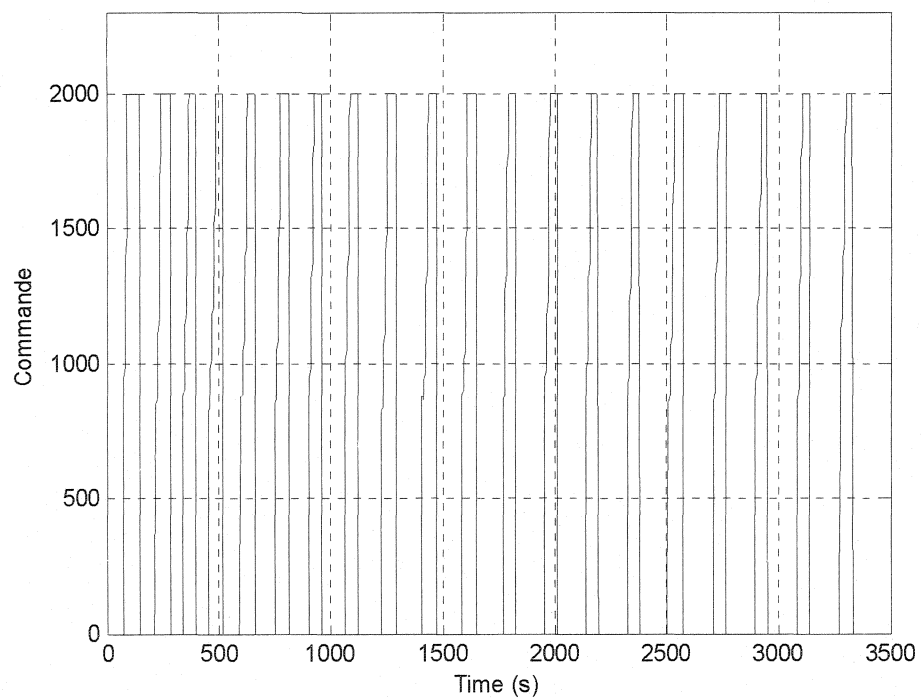


Figure 1.35 : PID. Commande, consigne 20°C, puissance 10W/robot.

1.7. Discussion

Pour résumer, durant cette étude nous avons réalisé les premiers tests de fonctionnement avec la chambre de refroidissement telle qu'elle a été conçue. Ces tests préliminaires nous ont permis de constater que le contrôle industriel de la chambre implémenté dans le PLC était inefficace pour nos conditions de travail. La température n'était pas capable de suivre la consigne. De plus, du fait de l'emplacement des capteurs de température à l'entrée et à la sortie de la chambre, la température de feedback donne une valeur très différente de la température de surface des NanoWalkers.

Nous avons alors apporté des améliorations au programme du PLC en générant une consigne interne pour que la température puisse suivre la consigne de façon contrôlée. En d'autres termes nous avons implémenté un contrôle doux. À partir de la température cible et du temps désiré pour l'atteindre, deux données qui sont paramétrables par l'interface du PLC, le programme génère une consigne de type exponentiel. Ces modifications dans le système de contrôle nous ont permis d'obtenir un régime transitoire stable.

Cependant le système reste très lent. La valeur de feedback est défini comme la moyenne de T_{inlet} et T_{outlet} . Lorsque les NanoWalkers commencent à dégager de la chaleur le système n'est pas capable de réagir, puisque la lecture de température est faite à partir de la température de l'environnement de la chambre au lieu de la température des NanoWalkers. Nous avons donc estimé la température de l'environnement pour chaque niveau de dissipation de chaleur. La différence entre le thermocouple 1 et le thermocouple 8 est d'environ 40°C lorsque tous les NanoWalkers dissipent 10W. C'est une différence de température trop grande sachant qu'en réalité le NanoWalker dissipera une puissance de 15W en moyenne.

Mais, dans l'application finale, chaque NanoWalker étant indépendant, on ne pourrait pas deviner quelle doit être la température d'environnement. Rappelons que le but final est de maintenir la température des robots dans l'intervalle de travail. Nous avons développé un contrôleur externe qui calcule l'ouverture de la chambre à partir de la lecture de 8 thermocouples placés sur la surface des NanoWalkers. Les stratégies implémentées ont été le contrôleur Tout-Rien et PID, deux techniques hautement utilisées dans les applications thermiques.

Pour pouvoir répondre aux perturbations de chaleur provoquées par la dissipation de puissance des NanoWalkers, nous avons conçu un contrôleur hybride, relais et contrôle proportionnel à la fois. Avec cette approche nous sommes arrivés à des résultats satisfaisants en régime permanent et régime transitoire. Par contre, la différence entre les thermocouple 1 et thermocouple 8 reste pareil (environ 40°C).

Dans le cas du contrôleur PID externe nous avons implémenté une typologie d'action dérivée séparée. Les résultats en régime permanent et régime transitoire sont bons, mais encore la différence entre les robots près de l'entrée et près de la de la sortie reste a 40°C. De plus, nous constatons toujours une oscillation au niveau du régime permanent. En fait, les conditions du système changent beaucoup avec la pression du réservoir, la quantité d'azote qui reste, l'azote qu'il y a dans l'échangeur et autres facteurs. Alors, il est difficile d'arriver à une réponse sans oscillation avec les gains K_p , K_i et K_d fixes.

CHAPITRE 2 : Système de contrôle de la position d'un minisystème pour applications endovasculaires

2.1. Introduction

Un des défis à relever avant d'être en mesure d'aborder la nanorobotique pour des applications médicales minimalement invasive, est la conception d'un système de propulsion miniaturisé. La difficulté d'allier puissance et miniaturisation est un des problèmes de recherches en cours. Les plus petits systèmes de propulsion existants dépassent l'échelle du millimètre. Il est important de concevoir un système suffisamment petit pour être dirigé dans le corps humain, en connaissant les contraintes biologiques et les limites des technologies actuelles.

L'objectif du projet nommé MR-Sub est de concevoir un robot miniaturisé capable d'être contrôlé par champ magnétique externe pour des applications médicales dans le milieu endovasculaires. Les applications de robots miniatures évoluant dans le corps humain sont très vastes. On peut penser par exemple à une distribution de médicaments ciblée, à de nouvelles possibilités d'imagerie médicale ou bien à plus long terme, à des applications microchirurgicales.

Des recherches sur ce type d'appareil sont actuellement en cours mais elles ont du mal à aboutir. Actuellement, les plus petits moteurs ultrasoniques ont une longueur de 5 à 7 mm et un diamètre de 1 à 2 mm [20]. Ces dimensions ne leur permettent pas d'être fonctionnels in vivo surtout si l'on considère qu'il ne s'agit que du système de propulsion et qu'un appareil complet doté d'un tel moteur serait encore plus gros.

Il existe un moyen élégant de contourner ces difficultés. Il est basé sur l'idée de rendre le système de propulsion externe au microdispositif. Un champ magnétique variable dans l'espace et dans le temps permet de contrôler de façon externe un robot comportant des matériaux ferromagnétiques. C'est sur l'étude de faisabilité de ce concept que le présent projet MR-Sub se penche.

Les appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM) sont au cœur de la mise en pratique du présent concept. En effet, ces appareils sont capables de générer des champs magnétiques ayant les propriétés recherchées. De plus, ils permettent de produire l'imagerie nécessaire au suivi du microdispositif lors de son transit dans le corps humain.

Nous posons comme hypothèse, qu'un gradient de champ magnétique permettrait de contrôler, de façon externe, un dispositif comportant des matériaux sensibles aux champs magnétiques (ferromagnétiques ou polymères actifs) et à ses variations dans l'espace et dans le temps. Le champ magnétique sera généré par un appareil IRM, une technologie utilisée depuis une trentaine d'années [20].

Dans le cadre de ce projet, le travail décrit dans le présent chapitre consiste à faire l'asservissement du champ magnétique pour assurer un contrôle constant du microsystème (représenté par une bille ferromagnétique) dans un milieu où les forces sont variables. Le principal objectif de cette section est de valider les formules théoriques décrivant les différentes forces mises en jeu ainsi que de développer par simulation un contrôle discret à implémenter dans le système réel.

L'étude par simulation est basée sur un montage expérimental en développement qui permet des études préliminaires de la propulsion dans le système cardiovasculaire. Le montage est constitué d'un tube et une bille soumise à un champ magnétique généré par l'IRM.

2.2. Modélisation :

La première étape dans le contrôle d'un système est la modélisation des forces du système. Dans notre cas, il existe deux forces principales qui seront considérées, soit la force de frottement (F_f) et la force magnétique (F_M).

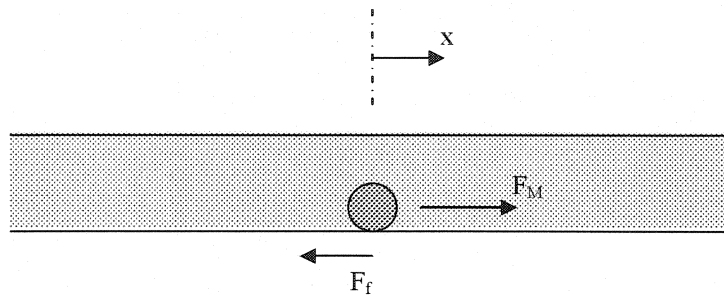


Figure 2.1 : Forces dans le montage du système.

2.2.1. Force de frottement

La force de frottement est considérée ici à cause des particularités du montage. La bille métallique force de friction dynamique lorsqu'elle se déplace. Pour que le mouvement se donne la force magnétique doit être plus grande que la friction statique. Elle est toujours dans le sens contraire du mouvement. Les coefficients de friction statique et dynamique sont ceux du Teflon (PTFE). Le coefficient de frottement dynamique a pour valeur $\mu_d=0.04$, et le coefficient de frottement statique a pour valeur $\mu_s = 0.06$. La force de frottement est fonction de la force normale (F_N) entre la bille et le fond du tube, on a :

$$F_f = \mu_x F_N, \quad (2.1)$$

où $F_N = mg$, la masse fois la force gravitationnel, et μ_x est soit μ_d ou μ_s , dépendamment si la bille est en mouvement ou non.

2.2.2. Force magnétique

La force magnétique sera la force utilisée pour déplacer la bille dans son environnement, généré par l'IRM. Elle est décrite par l'équation 2.2:

$$F_M = MV_M \nabla B, \quad (2.2)$$

où M est la magnétisation du matériau, V_M le volume du dipôle magnétique et ∇B le gradient du champ magnétique

2.2.3. Équation différentielle

En appliquant la deuxième loi de Newton, on obtient l'équation complète décrivant notre système :

$$F_M - |F_F| = ma, \quad (2.3)$$

où m et a sont la masse et l'accélération de la bille. Comme notre objectif est d'asservir le système en position, nous allons réécrire l'équation précédente en fonction de la position [21]. Les valeurs physiques sont définies dans l'annexe D.

$$MV_M \nabla B - |\mu_x mg| = m \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (2.4)$$

2.3. Modèle de simulation

La première étape de la simulation est la conception du modèle de simulation dans Simulink (www.mathworks.com). D'après l'équation 2.4, on obtient le modèle à la figure 2.2 pour notre montage.

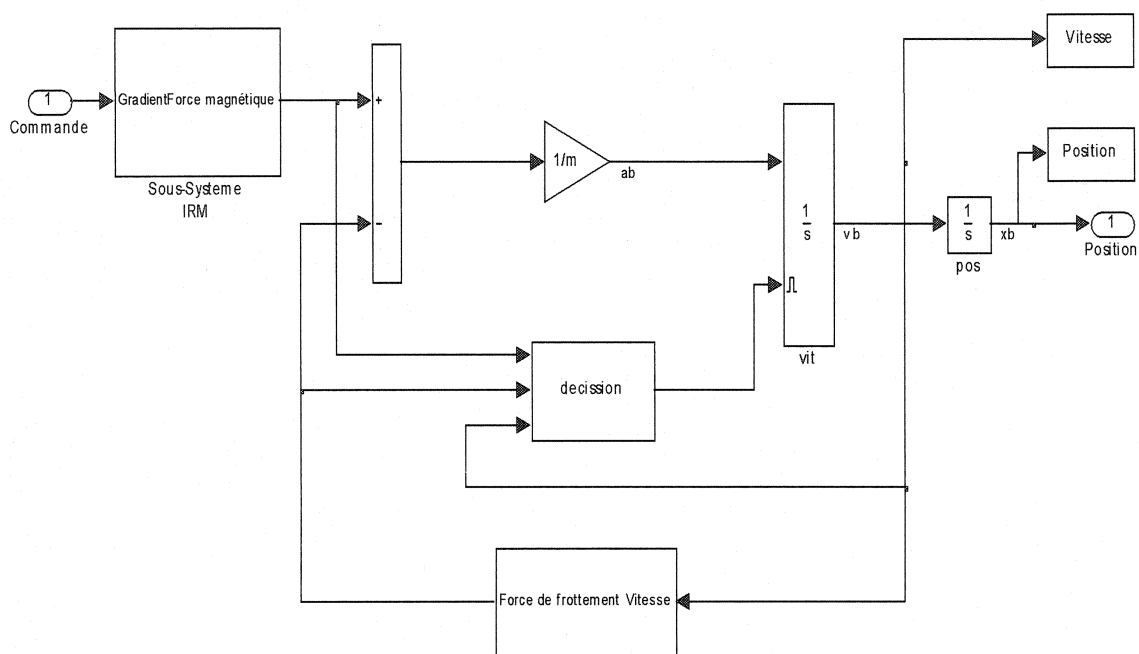


Figure 2.2 : Modèle de simulation du système.

2.3.1. Sous-système IRM

Le bloc «sous-système IRM» représente le modèle du système IRM qui fournit le gradient de champ magnétique externe exerçant une force magnétique sur la bille. En entrée, on envoie la commande qui correspond au gradient du champ magnétique. À la sortie on obtient la force magnétique résultante. Le «sous-système IRM» comprend les éléments suivants. Un bloc de saturation, qui représente la capacité de l'appareil, pour limiter la commande. Ces valeurs correspondent aux limites que peut fournir le système IRM utilisé pour tester notre montage (0.01 Tesla/mètre).

Le bloc suivant modélise les variations maximales que peut fournir l'appareil. Un générateur de créneau est utilisé pour multiplier ce signal. L'amplitude est égale à 1 et la durée de l'impulsion est égale à 10 ms pour le niveau haut et on a une amplitude égale à 0 pendant 2 ms pour le niveau bas. Ceci fourni un gradient équivalent à celui donné par

l'appareil IRM qui fonctionne en mode pulsatif. Enfin, on multiplie le résultat par la magnétisation du matériau (M) et par le volume du dipôle magnétique (V_M) pour obtenir la force magnétique envoyée à la sortie.

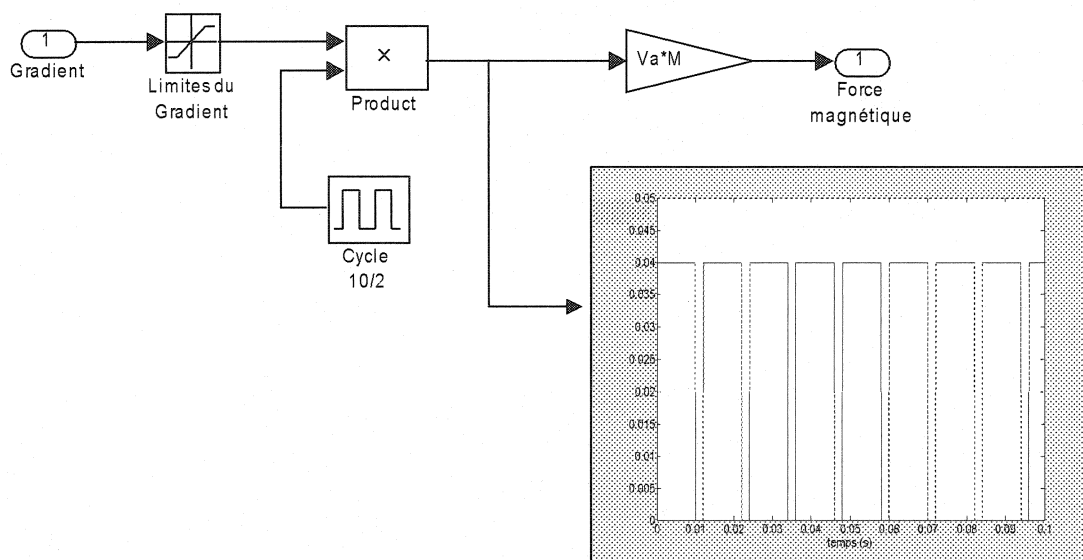


Figure 2.3 : Modèle du sous-système IRM.

2.3.2. Modèle équivalent du sous-système IRM

Le gradient champ magnétique est fourni pour l'appareil IRM de façon non-linéaire avec un cycle à ON et à OFF comme nous l'avons décrit précédemment. Lorsque la signal est OFF le gradient est égal à zéro, donc le système se comporte en boucle ouverte. Cette non linéarité implique des effets non désirables rencontrés lors de la conception d'un contrôleur. Par conséquent nous avons remplacé cette partie par un système équivalent linéaire, et ceci en utilisant une méthode empirique qui permet d'étudier une certaine classe de systèmes non-linéaires. En effet, en employant les techniques fréquentielles utilisées pour l'étude des systèmes linéaires nous remplaçons le bloc du signal pulsé par une valeur équivalente [25]. Le gain équivalent est alors obtenu en calculant la moyenne

du signal pulsé. Par la suite on procède au remplacement du bloc «cycle 10/2» par une valeur constante égale à 0.83 qui correspond à la moyenne du signal pulsé. Dans le diagramme suivant on peut voir la réponse en boucle ouverte du système réel et celle du système équivalent. L'entrée étant un signal sinusoïdal, on peut constater le rapprochement des deux réponses.

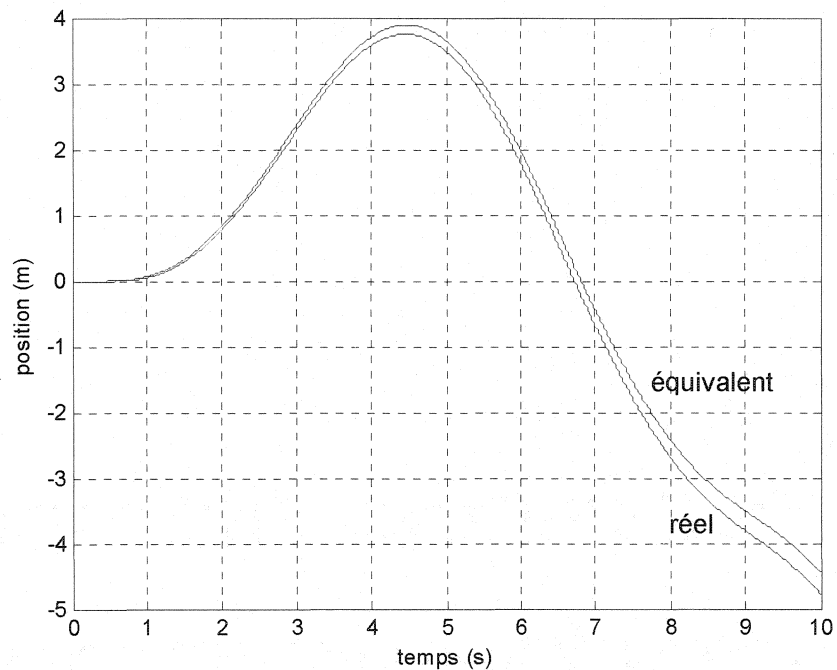


Figure 2.4 : Réponse en boucle ouverte du système réel et l'équivalent.

2.3.3. Force de frottement

Ce sous-système se trouve à l'intérieur du bloc «force de frottement». Le choix du coefficient de friction dépend de l'état de la bille. Si la bille est immobile, on doit utiliser le coefficient de friction statique pour le calcul de la force de frottement. Dans le cas contraire, c'est le coefficient de friction dynamique qui est utilisé. La force est alors obtenu en multipliant le coefficient de friction par la force normale.

On peut voir avec les résultats de simulation représentés à la figure 2.5 la validation du modèle de la force de frottement. En effet, lorsque la vitesse n'est pas égale à 0 la force de frottement utilise le coefficient de friction dynamique (même si est positive ou négative), tandis que si la vitesse est égale à 0 la force de frottement devient statique. Pour la simulation on a pris $\mu_d=0.2$ et $\mu_s=0.5$ et la masse $m=1$.

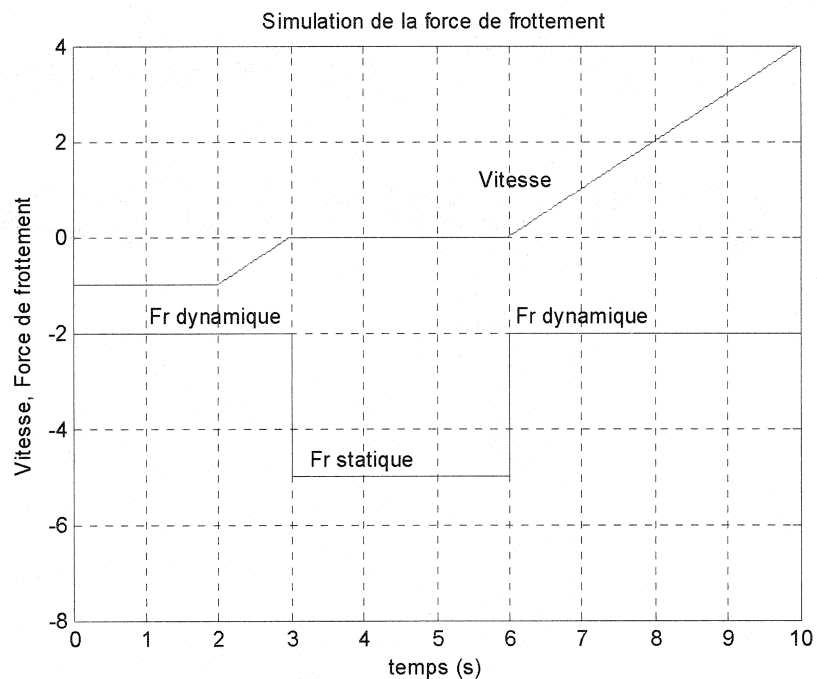


Figure 2.5 : Réponse de la force de frottement pour différentes vitesses.

2.3.4. Bloc de décision

Étant donnée la force de frottement obtenue par simulation, on se rend compte que la force de frottement peut créer un mouvement ce qui n'est pas représentatif de la réalité. Par conséquent, dans un premier temps la force magnétique doit dépasser la force de frottement statique pour que l'élément commence à se déplacer. Pour cela il faut maintenir la valeur de l'intégrateur de vitesse égal à zéro jusqu'à que la force magnétique soit plus grande que la force de frottement statique en ayant toujours la vitesse égale à zéro.

2.4. Le Contrôleur :

L'utilisation du contrôleur PID est la stratégie de contrôle la plus répandue en industrie, Le choix de son utilisation découle directement de cette raison, car nous voulions initialement utiliser un contrôleur simple et reconnu pour l'asservissement de position. Il est notamment utilisé pour des problèmes de contrôle dans des systèmes automatisés ou dans des centres de manufacture. Le contrôleur PID est constitué de trois différents éléments, d'où le surnom de «contrôleur à trois termes» [26]. Les trois termes sont:

P : contrôle proportionnel;

I : contrôle d'intégration;

D : contrôle dérivatif.

L'implantation du contrôleur se fait selon différentes consignes spécifiques à chaque système. Ces consignes incluent entre autres le temps de montée (t_r), le temps nécessaire à l'atteinte de la position de référence, le dépassement (en anglais: «overshoot») et l'erreur en régime permanent (er). Pour une bonne compréhension du fonctionnement d'un contrôleur PID, il faut considérer les trois termes séparément.

2.4.1. Contrôle proportionnel

Le contrôleur proportionnel est un gain pur (K_P) qui agit directement sur le signal d'erreur pour produire la commande à envoyer au système. Il sert principalement à ajuster la vitesse du système. Il permet aussi de réduire l'erreur en régime permanent, sans toutefois l'éliminer selon le système à contrôler.

2.4.2. Contrôle d'intégration

Le contrôleur d'intégration est implémenté en introduisant un intégrateur. Le signal d'erreur est intégré et multiplié par un gain (K_I) pour éliminer l'erreur et assurer la précision nécessaire pour un bon contrôle du système. Par contre, ce contrôleur peut empirer le régime transitoire: présence d'oscillations et temps de montée plus long.

2.4.3. Contrôle dérivatif

Le contrôleur de dérivation est normalement introduit dans la boucle de contrôle pour augmenter l'amortissement, c'est-à-dire améliorer la stabilité du système. Il agit également, de façon positive, sur le dépassement et sur la réponse en régime transitoire. Ceci est effectué en dérivant l'erreur et en la multipliant par un gain K_D . Le tableau qui suit résume les effets des trois termes du contrôleur PID sur la réponse du système.

Tableau 2.1 : Résumé les effets de chacun des éléments du contrôleur PID.

Gain	Temps de montée	Dépassement	Erreur
K_P	Diminue	Augmente	Diminue
K_I	Diminue	Augmente	Élimine
K_D	Petit Changement	Diminue	Petit Changement

Il faut bien noter que ces corrélations ne sont pas tout à fait exactes, car chacun des gains est dépendant des deux autres. En effet, changer un des gains peut avoir un impact sur l'effet des deux autres. Pour cette raison, le tableau n'est utilisé que comme une référence dans la recherche des valeurs des gains.

L'équation générale d'un contrôleur PID est :

$$U = K_p e_r + K_i \int e_r dt + K_d \left(\frac{de_r}{dt} \right), \quad (2.5)$$

où U est la commande à envoyer au système et e_r est l'erreur entre la position désirée et la position actuelle.

2.4.4. Contrôle "anti wind-up"

Le terme intégral d'un contrôleur PID exige une attention spéciale. En fait, lorsque le signal d'erreur entre la consigne et la valeur contrôlée est important pendant longtemps le terme intégral du contrôleur PID peut avoir une valeur élevée, dont l'origine est une valeur de contrôle (U) trop grande que donne la saturation des actuators. Il faut un délai de temps important pour que l'amplitude du terme intégral descende jusqu'à la zone linéaire, en dehors de la zone de saturation. Pour obtenir ceci, l'erreur doit devenir négative, et nous aurons alors un dépassement. Cet effet est connu comme étant le «windup», et il peut provoquer de grands dépassements et oscillations rendant le système en boucle fermée non stable. Il y a plusieurs façons d'éviter cet effet non désirable. Nous avons choisi une valeur de saturation du terme intégral inférieure à la saturation des actuators. Sur la figure 2.6, on peut voir le bloc non-linéaire qu'implémente le dispositif «anti-windup» du contrôleur PID continu.

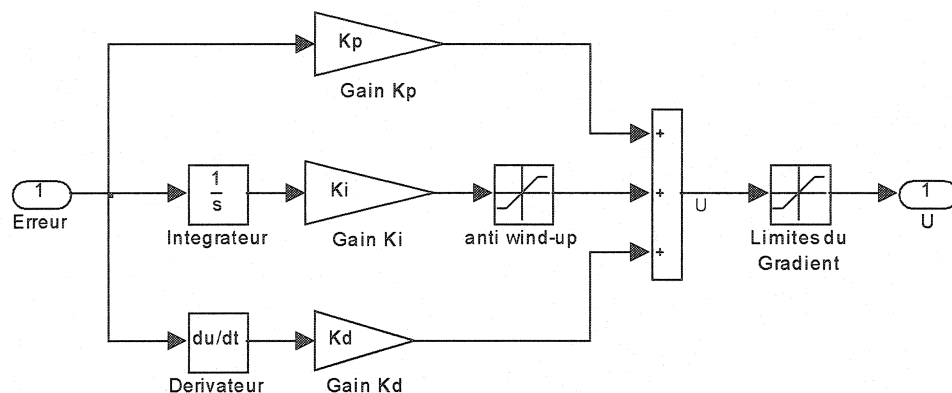


Figure 2.6 : Modèle de simulation du contrôleur PID analogique.

La figure 2.7 montre le modèle de simulation du contrôleur en série avec le système à asservir. La commande U est envoyée au système et il nous retourne la position de la bille. La position est la valeur contrôlée, utilisée pour réévaluer la commande en mode rétroaction («feedback»).

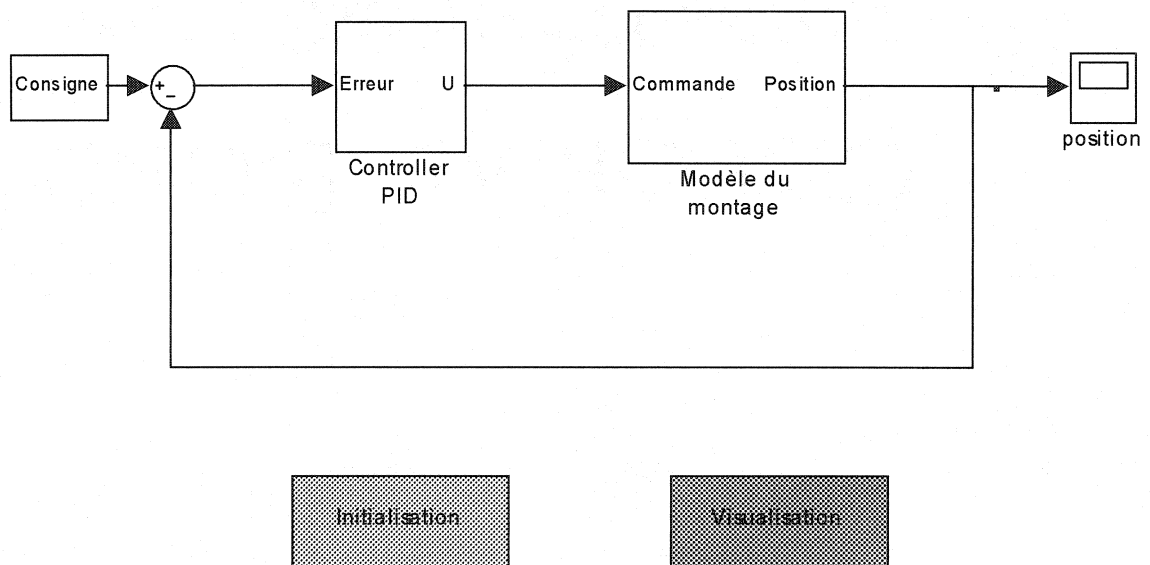


Figure 2.7 : Modèle de simulation du système à asservir.

2.4.5. Réglage des gains du contrôleur

Pour le réglage des gains du contrôleur il y a plusieurs techniques. Pour notre système nous avons calculé les gains par placement de pôles. À partir de l'équation différentielle définie précédemment nous appliquons la transformation de Laplace. Dans le système, le gradient du champ magnétique est l'entrée ou la variable de contrôle. De plus, nous utilisons le gain équivalent du signal du champ magnétique pour linéariser le système.

$$\begin{cases} MV_M \nabla B - |F_F| = ms^2; & (2.6a) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \nabla B = 0,83.U(s); & (2.6b) \end{cases}$$

De la même façon, à partir de l'équation différentielle du contrôleur PID on applique la transformation de Laplace. La valeur du contrôleur qui minimise l'erreur entre la position désirée et la position réelle est égale à la valeur du gradient magnétique.

$$\begin{cases} U(s) = K_p E(s) + \frac{K_i E(s)}{s} + K_d E(s)s; & (2.7a) \\ E(s) = X_c - X; & (2.7b) \end{cases}$$

En développant les quatre équations nous arrivons à l'expression suivante :

$$ms^3 + 0'83MV_M K_d s^2 + 0'83MV_M K_p s + 0'83MV_M K_i = (s + p_1)(s + p_2)(s + p_3), \quad (2.8)$$

où les valeurs des pôles dépendent des paramètres du système et les gains K_p , K_i et K_d du contrôleur PID. Pour que le système soit stable tous les pôles doivent être au semi plan gauche du diagramme de Laplace :

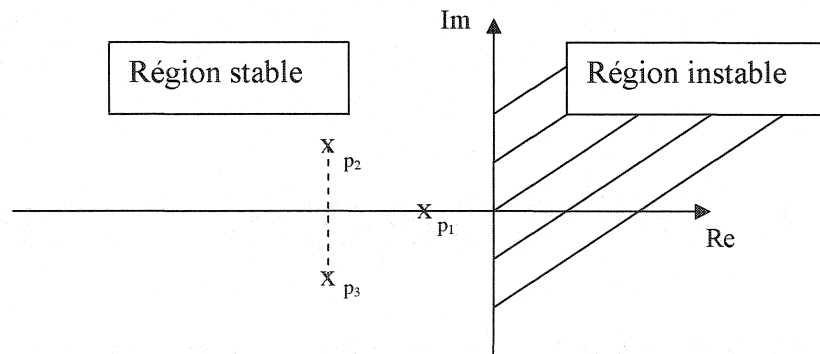


Figure 2.8 : Stabilité sur le diagramme de Laplace.

Après plusieurs essais, de bons résultats ont été atteints. En effet, avec les gains $K_p=160$, $K_i=120$ et $K_d=30$ la réponse du système à un échelon est très bonne. Dans ce qui suit, nous montrons les résultats de simulation obtenus à partir d'une consigne échelon et sinusoïdale. Nous visualisons la consigne et la réponse en position (mètre) sur un diagramme et la valeur de contrôle (Tesla/mètre) sur l'autre:

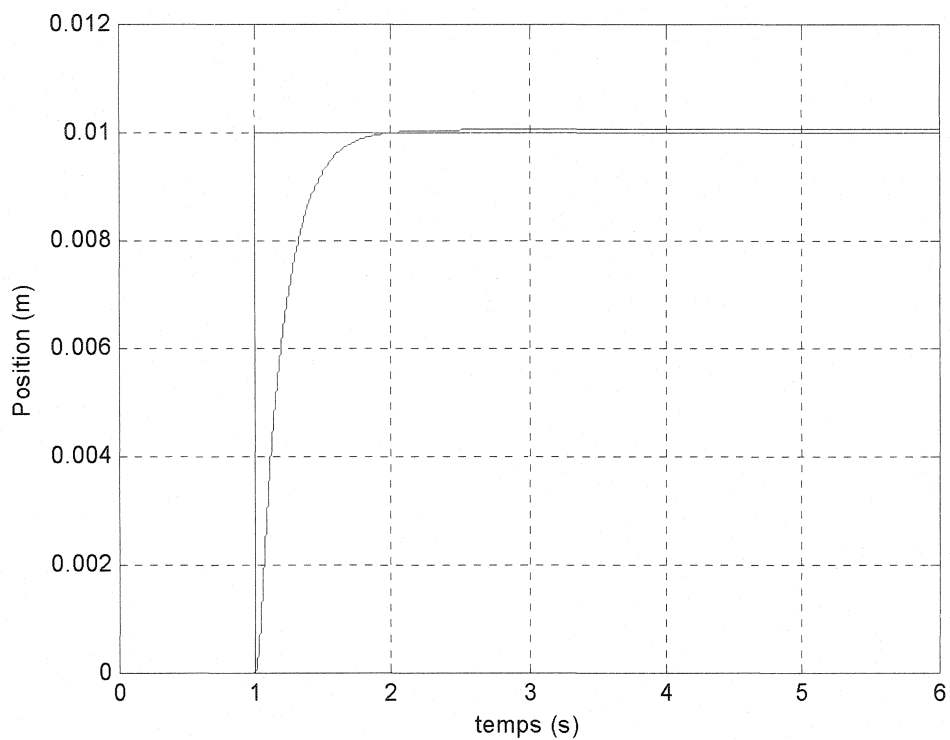


Figure 2.9 : Réponse de la position à un échelon.

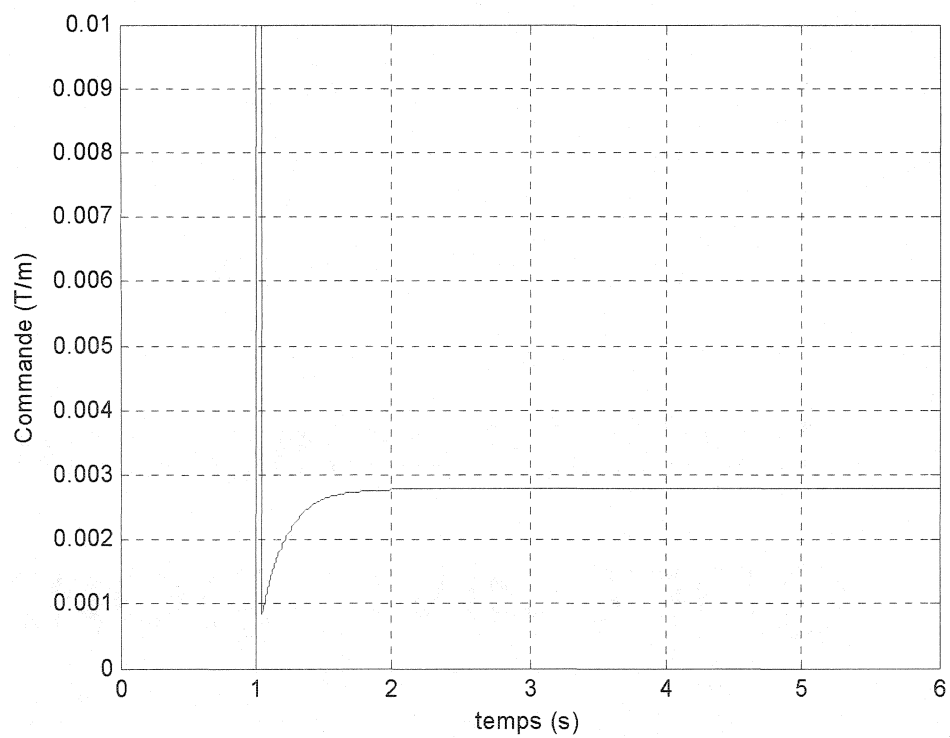


Figure 2.10 : Variation de la commande à un échelon.

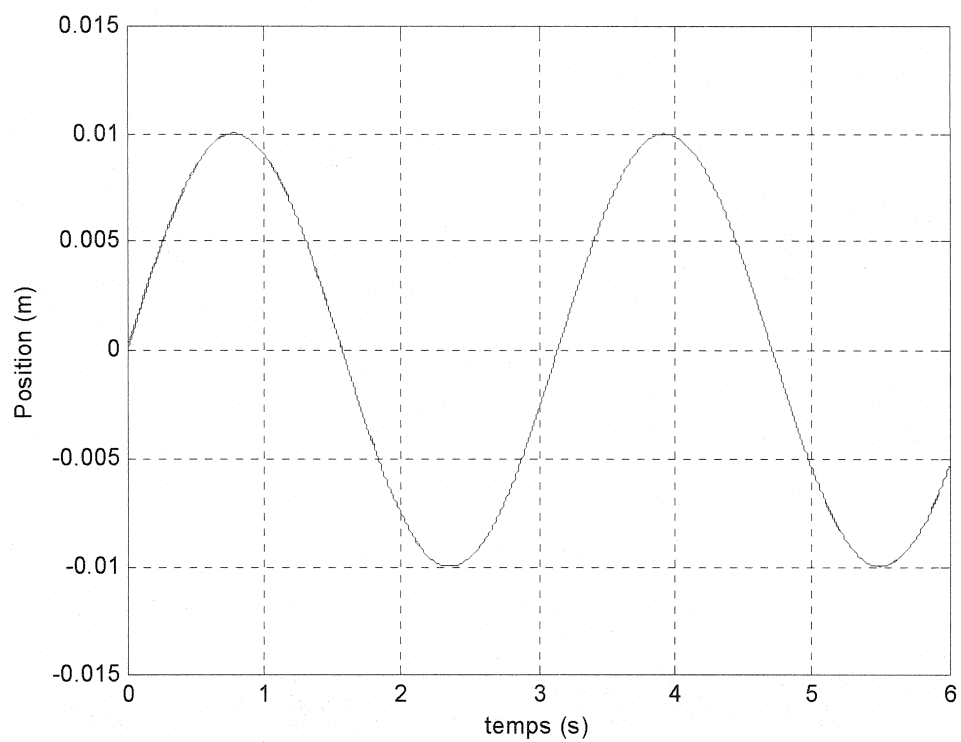


Figure 2.11 : Réponse de la position à une entrée sinusoïdale.

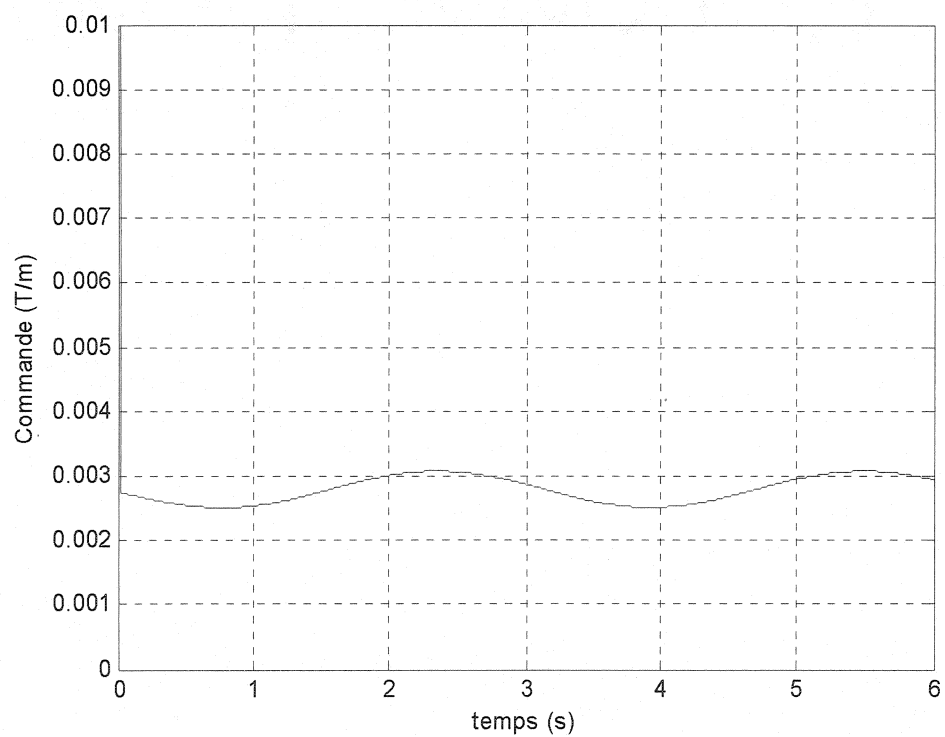


Figure 2.12 : Variation de la commande à une entrée sinusoïdale.

2.4.6. Le système réel

Jusqu'à présent, nous avons utilisé un modèle de simulation à partir des équations différentielles du montage et un contrôleur analogique. Mais dans la réalité le système change. Il faut se rappeler qu'on utilise un appareil IRM commercial pour générer les gradients de champ magnétique. Même si les équations du système physique restent pareilles ce n'est pas possible d'implémenter un contrôleur continu qui va donner le gradient de champ magnétique nécessaire. Il faut accéder au système de contrôle de IRM à partir de la communication de différents postes de travail et envoyer la valeur du gradient de champ magnétique désiré. Par conséquent, il faut concevoir un système de contrôle discret et les protocoles nécessaires pour envoyer la commande à travers les différents postes qui contrôlent l'IRM commercial. Dans le Laboratoire de NanoRobotique il y a plusieurs projets qui portent sur le développement des protocoles de communication. Cette communication entre les différentes parties du système IRM va induire des délais non négligeables dont il faudra tenir compte durant le contrôle discret. Sur la figure 2.13 on peut voir les différents éléments constituant le système réel.

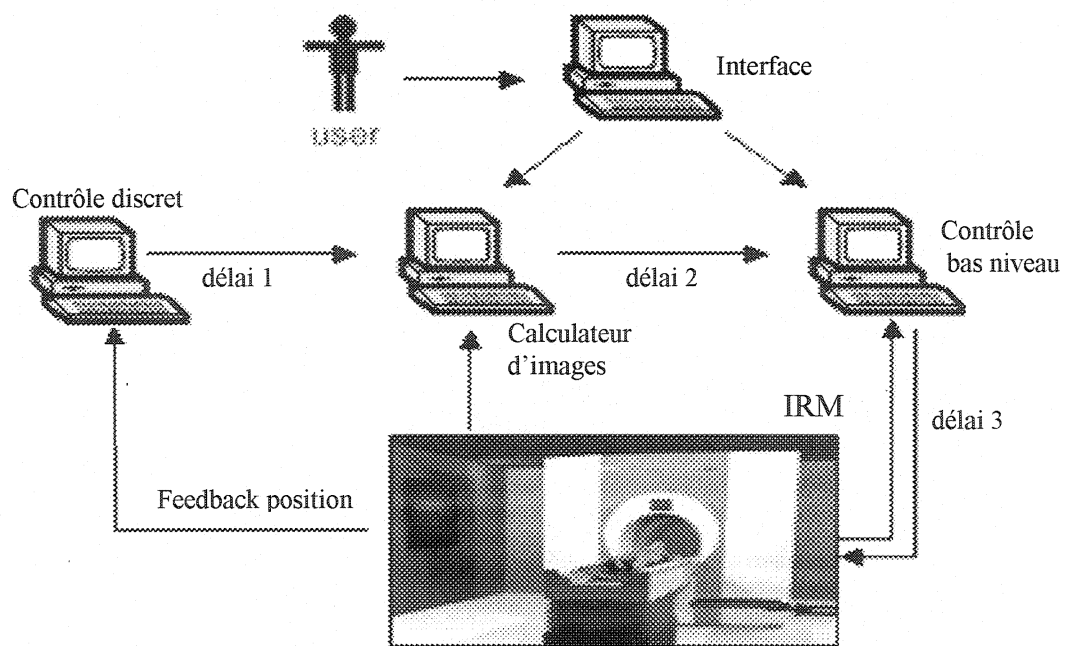


Figure 2.13 : Schéma du système IRM et contrôleur.

Il y a plusieurs façons de faire la synthèse d'un contrôleur discret. Comme, nous avons déjà conçu un contrôleur PID analogique pour le système, nous allons discrétiser le même contrôleur à l'aide de la transformation en «Z». Maintenant le diagramme de blocs est différent.

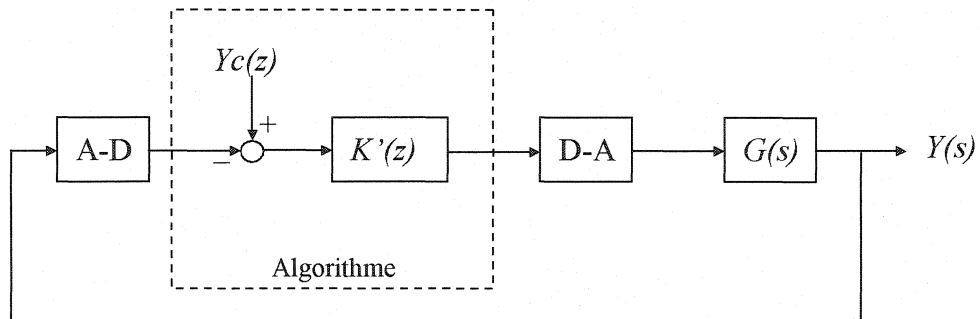


Figure 2.14 : Diagramme de blocs du contrôleur discret.

Où $K'(z)$ est la transformation en Z de notre contrôleur PID analogique $K(s)$:

$$K'(z) = (1-z^{-1})Z\{L^{-1}[K(s)/s]\}. \quad (2.9)$$

Soit la fonction de transfert du contrôleur PID analogique $K(s)$:

$$K(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{K_i s} + \frac{K_d s}{1 + \frac{K_d}{N} s} \right). \quad (2.10)$$

Nous avons ajouté un filtre dans le terme dérivateur avec une constante de temps T_d/N . Le nombre N est généralement entre 3 et 20. Usuellement la valeur $N=10$ est utilisée. Au niveau de la synthèse, la constante de temps T_d/N est négligeable [27]. Il s'agit alors de discrétiser le terme proportionnel, intégral et dérivateur du contrôleur PID de la fonction de transfert $K(s)$. Pour la transformation en Z, nous utilisons la première méthode d'Euler pour discrétiser le terme intégral:

$$\frac{1}{K_i s}, \text{ où } s = \frac{z-1}{h}. \quad (2.11)$$

Par contre, pour discrétiser le terme dérivatif nous utilisons la deuxième méthode d'Euler, pour garantir la stabilité du terme pour n'importe quelle période d'échantillonnage « h » :

$$\frac{K_d s}{1 + \frac{K_d}{N} s} \quad \text{où } s = \frac{z-1}{hz} \quad (2.12)$$

Une fois toutes les transformations faites, nous arrivons à l'expression du contrôleur PID discrétisé des termes séparés:

$$K(z) = K_p \left(1 + \frac{h}{K_i} \frac{1}{z-1} + \frac{N(z-1)}{\left(1 + N \frac{h}{K_d}\right) z-1} \right) \quad (2.13)$$

En utilisant le logiciel Simulink de Matlab, nous développons le modèle de simulation du contrôleur discret. Nous avons déjà discuté à propos de l'effet «windup» du terme intégral du PID à la section 2.4.4. De la même façon, nous allons limiter l'action intégrale du contrôleur. La figure 2.15 montre le modèle de simulation du contrôleur PID discret :

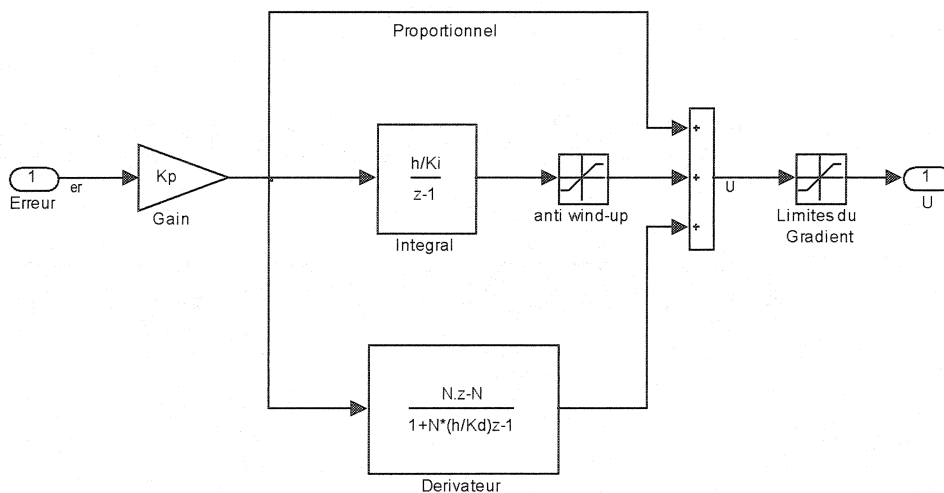


Figure 2.15 : Modèle de simulation du contrôleur discret.

La figure 2.16 montre le bloc du contrôleur PID discret dans Simulink, en série avec le système à asservir. Pour modéliser un système discret un bloc «Zero-Order Hold» a été introduit pour simuler l'échantillonnage du système discret, ainsi que le délai de communication entre les différents postes du système IRM.

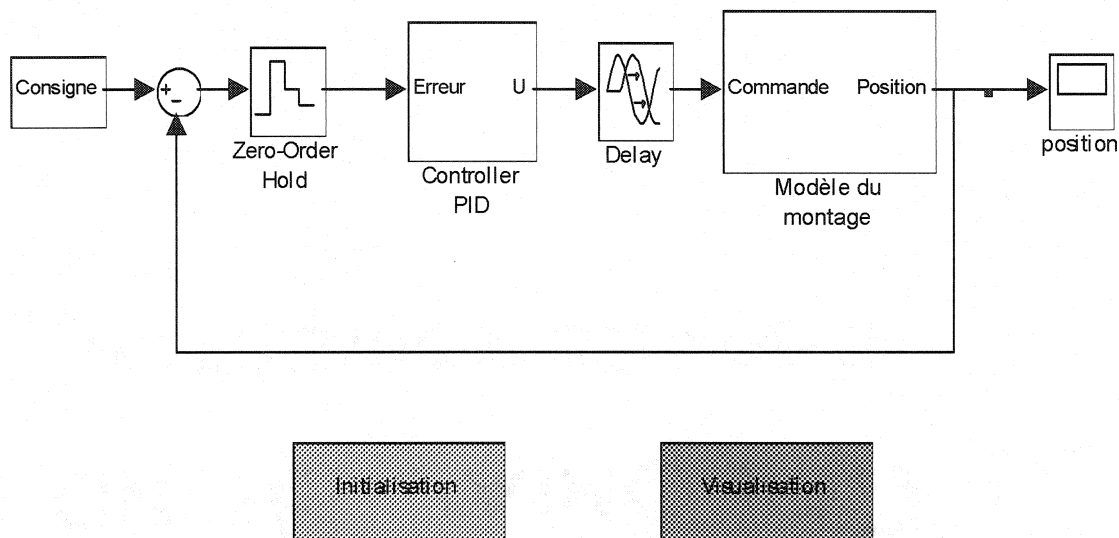


Figure 2.16 : Modèle du système à asservir avec le contrôleur discret.

Dans ce qui suit, nous montrons les résultats obtenus de la simulation du contrôleur discret. Un paramètre très important dans un contrôleur discret est la période d'échantillonnage. En effet, les paramètres du contrôleur dépendent de la période d'échantillonnage. Selon la théorie de Shannon cette période doit être, au moins, deux fois la constante de temps la plus lente du système. Dans le système réel, la contrainte de temps est inconnue, car le protocole de communication et le système d'acquisition de la position sont en cours de développement. Par contre, on estime que la période d'échantillonnage maximum va être de 0.012 secondes pour maintenir la stabilité du système. Mais dans ce cas, si le délai de communication comme celui provoqué par l'acquisition, est plus grand que 0.012 secondes, la stabilité ne peut pas être garantie. Les résultats affichés correspondent à la limite de la période d'échantillonnage ($h=0.012$ secondes) et au *délai*=0.025 secondes et *délai*=0.075 secondes.

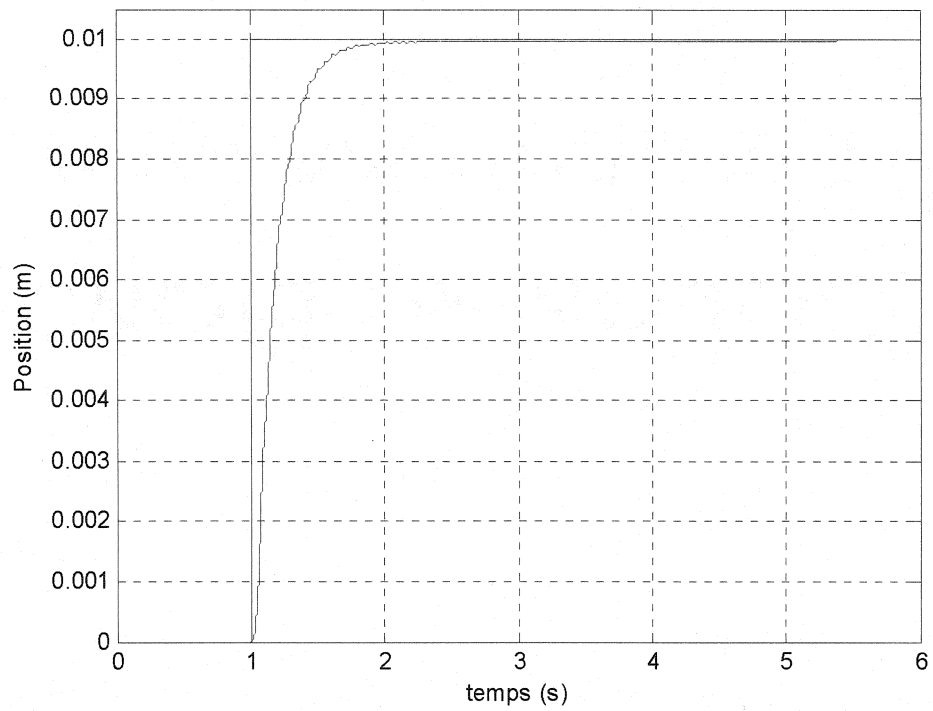


Figure 2.17 : Réponse de la position à un échelon ($h=0.012$ secondes, délai=0).

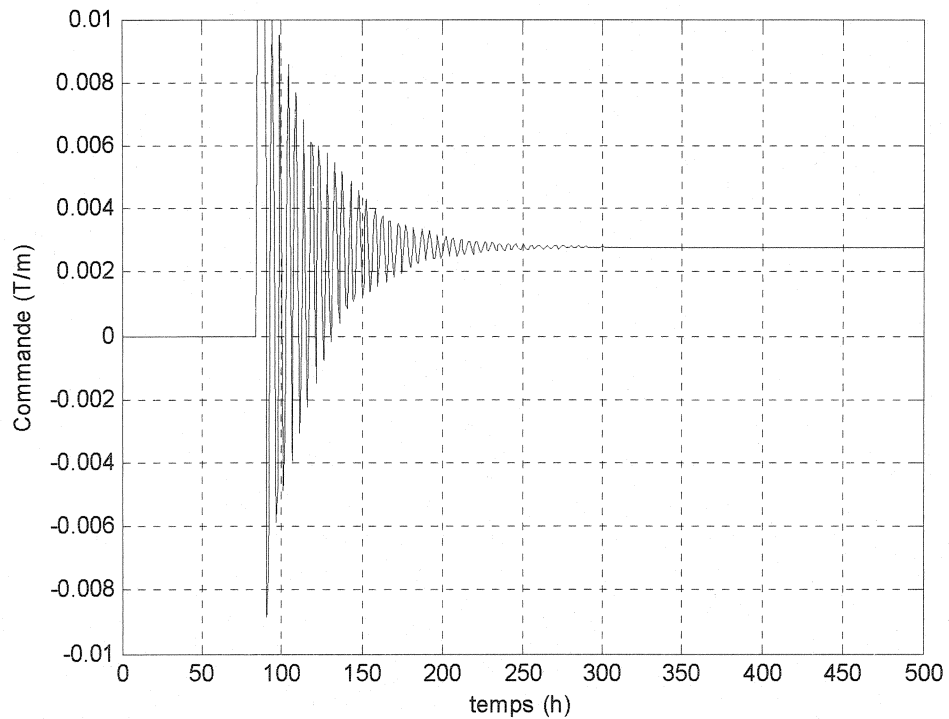


Figure 2.18 : Variation de la commande à un échelon ($h=0.012$ secondes, délai=0).

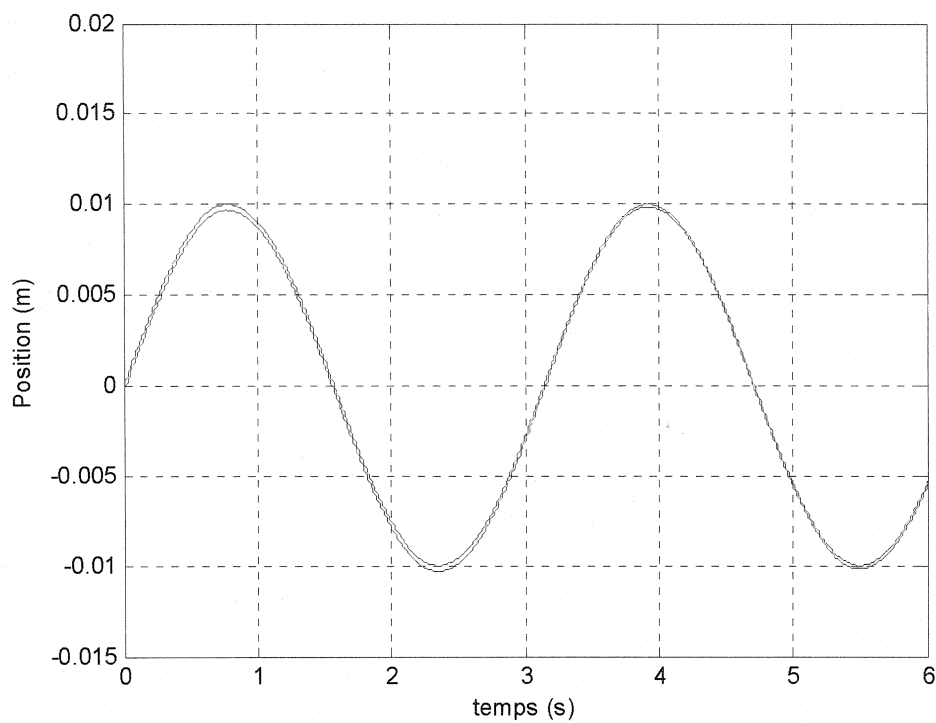


Figure 2.19 : Réponse de la position à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$ secondes, $\text{délai}=0$).

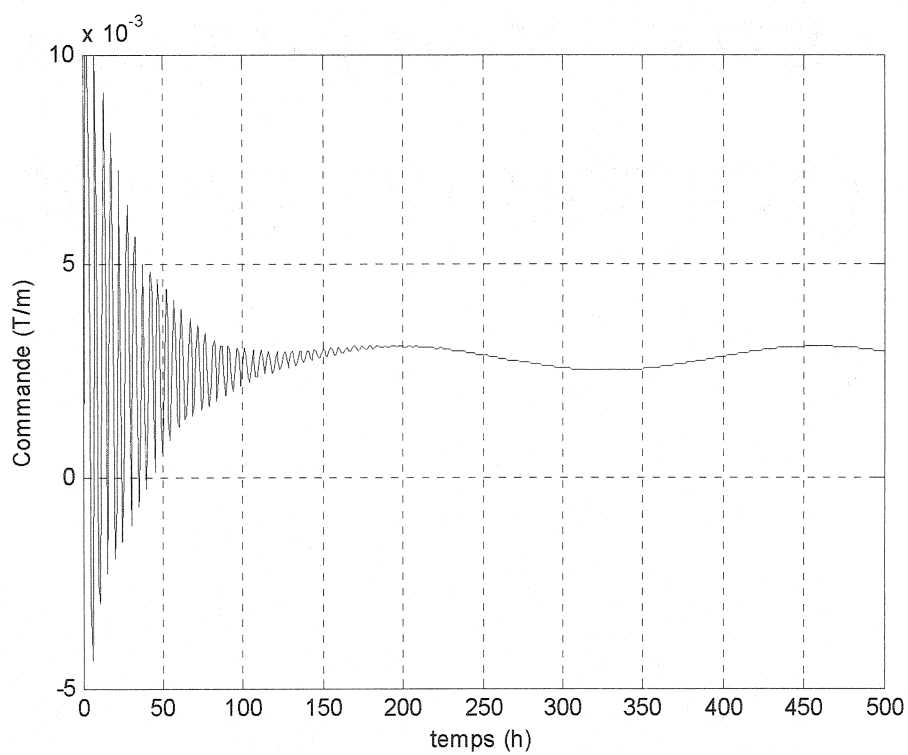


Figure 2.20 : Variation de la commande à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$ secondes, $\text{délai}=0$).

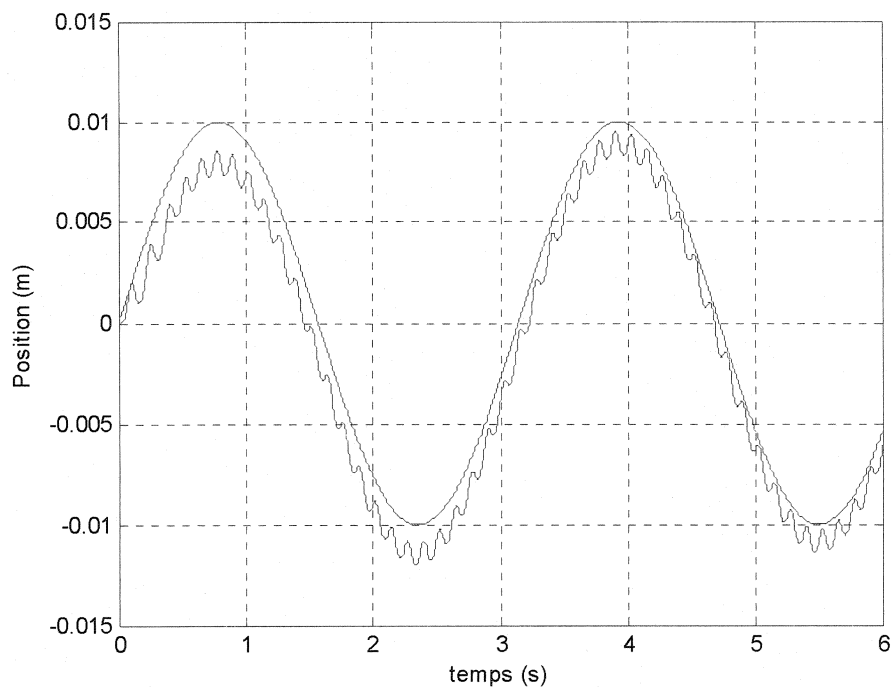


Figure 2.21 : Réponse de la position à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$ sec., délai=0.025 sec.).

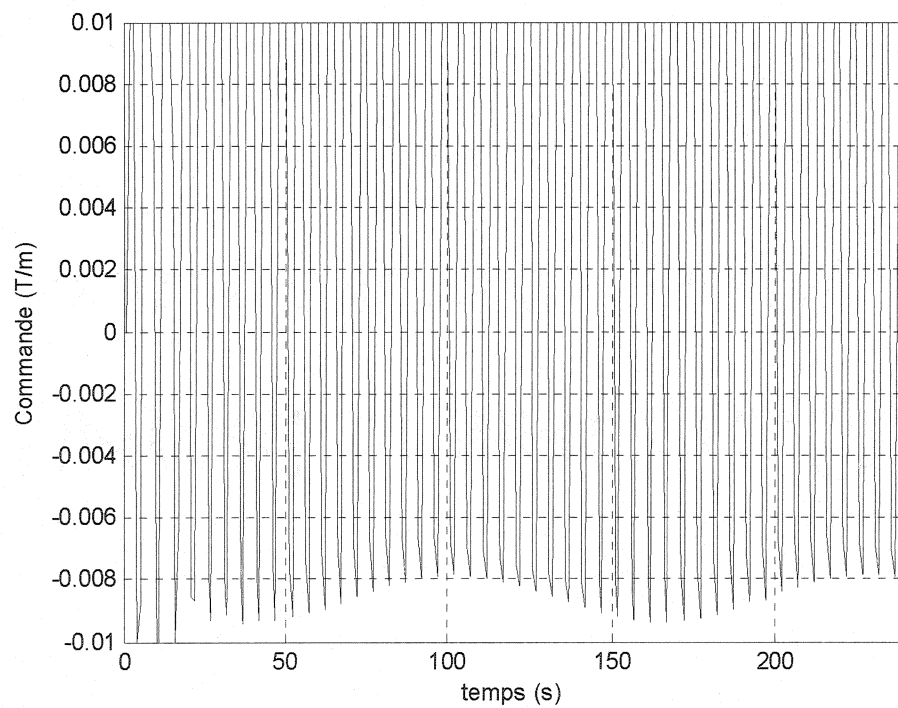


Figure 2.22 : Variation de la commande à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$ sec., délai=0.25 sec.).

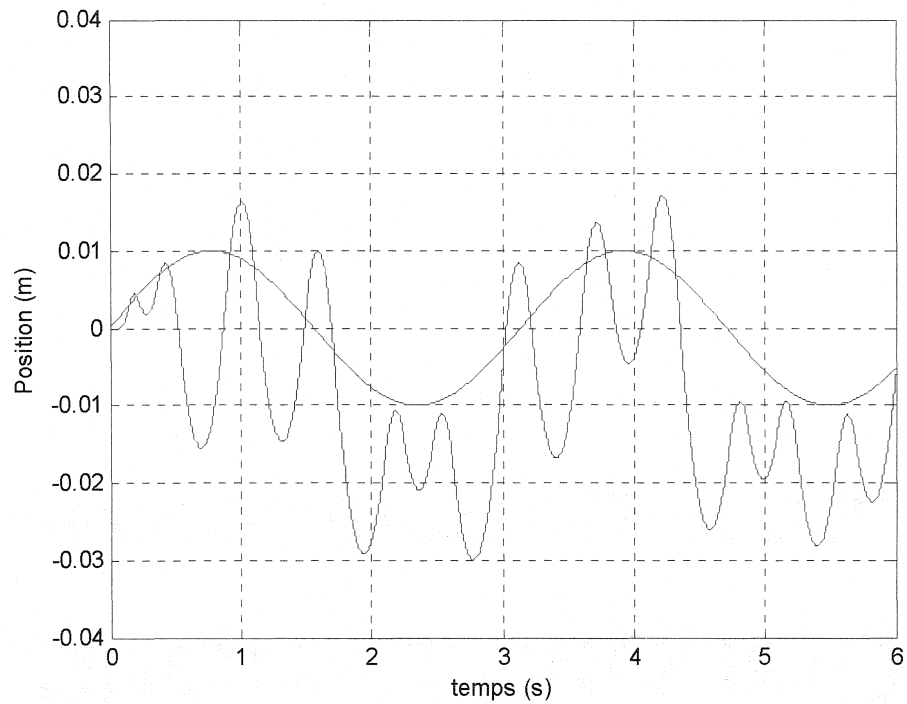


Figure 2.23 : Réponse de la position à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$ sec., délai=0.075 sec.).

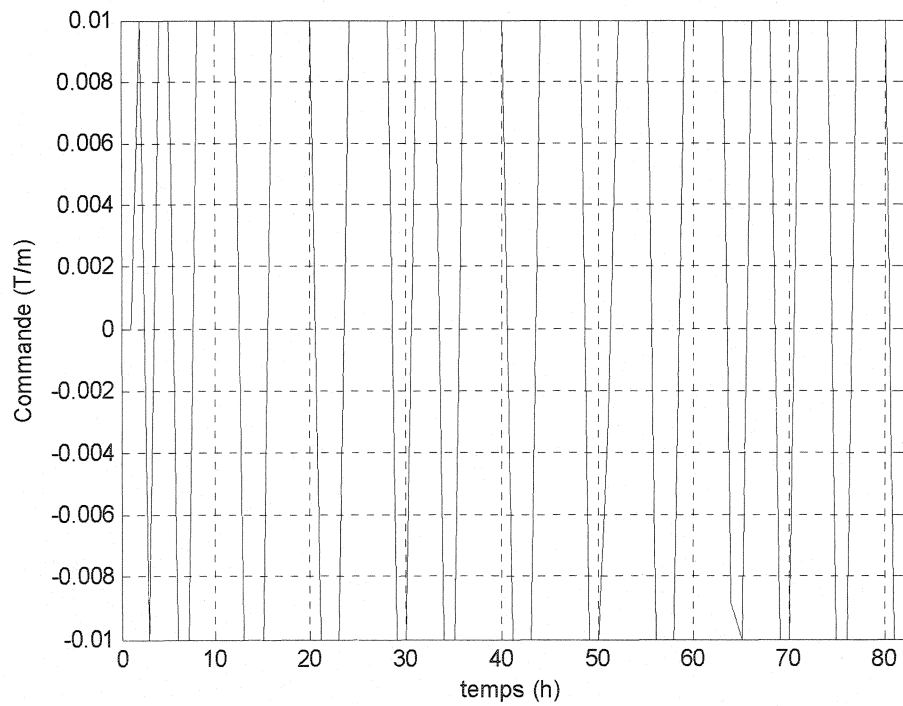


Figure 2.24 : Variation de la commande à une entrée sinusoïdale ($h=0.012$ sec., délai=0.075 sec.).

2.4.7. Implémentation du contrôleur discret

Dans le système réel, le programme de contrôle sera exécuté sur un ordinateur, lequel va communiquer avec le système IRM. Le but est donc de développer un programme qui permet d'implémenter le contrôleur PID discret. À partir de la fonction de transfert discrète, on applique la transformation inverse de Z. La figure 2.25 montre le diagramme de blocs de notre régulateur PID avec la séparation de termes.

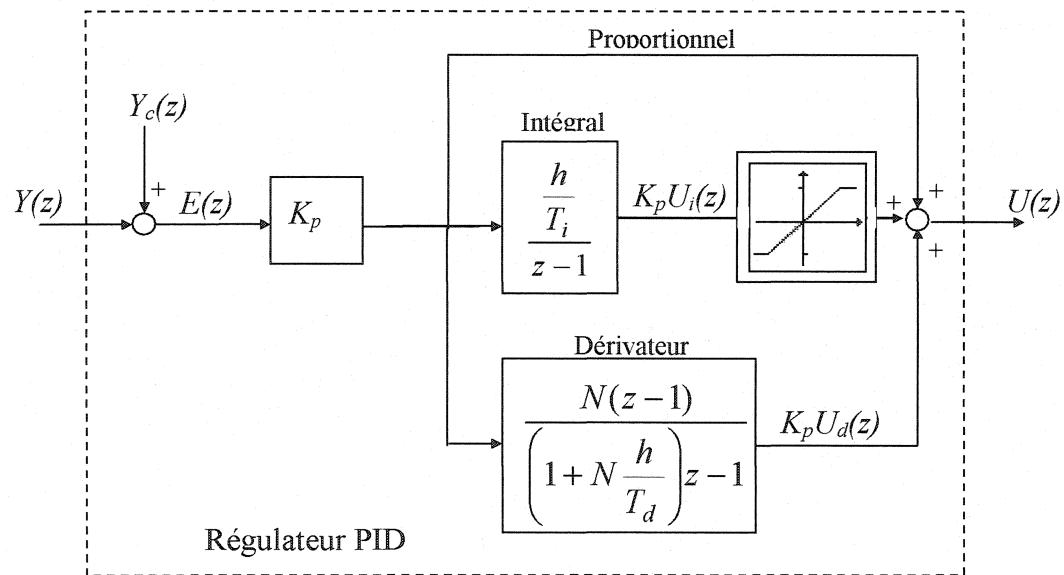


Figure 2.25 : Diagramme de blocs du contrôleur PID discret avec « anti-windup ».

On définit les fonctions de transfert discrètes des termes intégral et dérivateur :

$$U_i(z) = \frac{h}{T_i} \frac{E(z)}{z-1} ; \quad (2.14a)$$

$$U_d(z) = \frac{N(z-1)}{\left[1 + N \frac{h}{T_d} \right] z - 1} E(z) . \quad (2.14b)$$

Où encore, avec puissances négatives:

$$U_i(z) = \frac{\frac{h}{T_i} z^{-1}}{1 - z^{-1}} E(z); \quad (2.15a)$$

$$U_d(z) = \frac{N(1 - z^{-1})}{1 + N \frac{h}{T_d} z^{-1}} E(z). \quad (2.15b)$$

Nous pouvons alors coder l'algorithme :

$$e(kh) = y_c(kh) - y(kh); \quad (2.16a)$$

$$u_i(kh) = u_i(kh-h) + \frac{h}{T_i} e(kh-h); \quad (2.16b)$$

$$u_i(kh) = \begin{cases} u_{i,max} & \text{si } K_p u(kh) > u_{i,max} \\ u_i(kh) & \text{si } K_p u(kh) \in [-u_{i,max}, u_{i,max}] \\ -u_{i,max} & \text{si } K_p u(kh) < -u_{i,max} \end{cases}; \quad (2.16c)$$

$$u_d(kh) = \frac{T_d}{T_d + Nh} \{u_d(kh-h) + N[e(kh) - e(kh-h)]\}; \quad (2.16d)$$

$$u(kh) = K_p [e(kh) + u_i(kh) + u_d(kh)]. \quad (2.16e)$$

A chaque impulsion d'horloge, l'algorithme du programme doit lire la valeur de la position (1), calculer la valeur de la commande (2) et envoyer cette valeur, à travers les différents postes de l'environnement de travail de l'IRM grâce aux protocoles de communication (3).

Une fois que la commande a été envoyée, l'algorithme doit mettre à jour les variables du contrôleur PID, pour la prochaine impulsion d'horloge (4).

$$e(kh-h) = e(kh); \quad (2.17a)$$

$$u_i(kh-h) = u_i(kh); \quad (2.17b)$$

$$u_d(kh-h) = u_d(kh). \quad (2.17c)$$

Dans la figure 2.26 on représente l'ordre d'exécution de l'algorithme. Pour voir l'implémentation de l'algorithme dans un programme C++ il faut se référer l'annexe D.

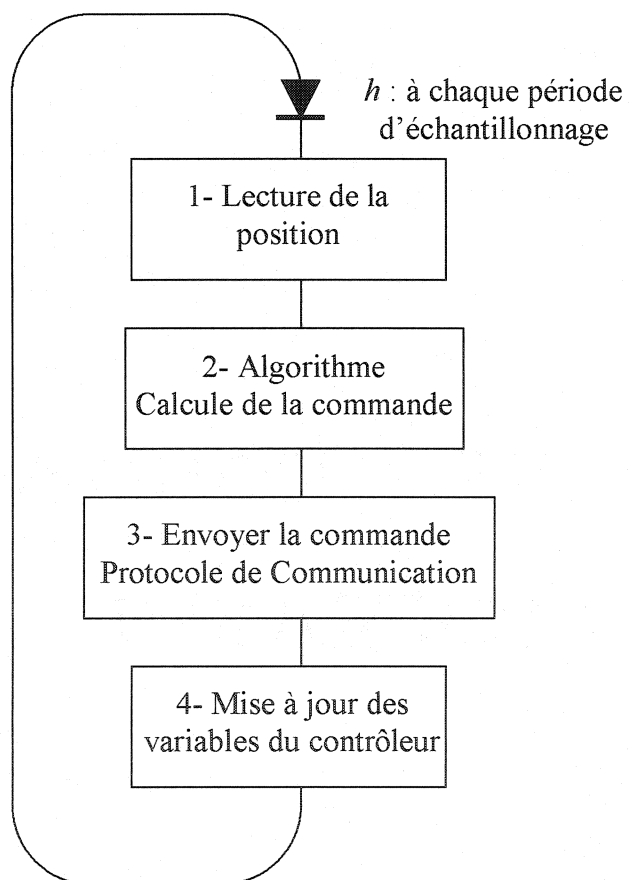


Figure 2.26 : Ordre d'exécution de l'algorithme du contrôleur discret.

2.5. Discussion

À partir de l'hypothèse qu'un gradient de champ magnétique permet de contrôler, de façon externe, un dispositif comportant des matériaux sensibles aux champs magnétiques (ferromagnétiques ou polymères actifs), nous avons validé les formules théoriques décrivant les différentes forces du montage de simulation constitué d'un tube et une bille soumise à un gradient de champ magnétique généré par un appareil IRM. Nous avons utilisé un modèle de système très simplifié qui prend en compte les forces les plus significatives (nous avons par exemple négligé la force d'écoulement bien présente dans le système réel).

Nous avons développé un contrôleur de type PID pour l'asservissement du gradient de champ magnétique, stratégie de contrôle la plus communément utilisée en industrie. Pour le réglage des gains du contrôleur nous avons utilisé la technique de placement de pôle et nous avons obtenu des résultats satisfaisants pour le contrôleur analogique.

Par contre, dans le système réel, le programme du contrôleur sera exécuté sur un ordinateur qui communiquera avec l'IRM. Nous avons alors conçu un contrôleur discret à partir du contrôleur PID analogique développé pour le système. Ce dernier a été discrétisé à l'aide des transformations d'Euler.

Un paramètre très important dans un contrôleur discret est la période d'échantillonnage. Selon la théorie de Shannon, il faut utiliser une fréquence d'échantillonnage égale à au moins deux fois la constante de temps la plus lente du système pour maintenir la stabilité du contrôle. Dans notre cas, la période d'échantillonnage (h) doit être au moins de 0.012 secondes. En respectant cette contrainte, les résultats obtenus dans la simulation sont satisfaisants en ce qui concerne la stabilité et la rapidité.

Dans le système réel, la valeur de la commande doit être envoyée à travers deux machines avant d'arriver au contrôle de bas niveau de l'IRM. Par conséquent, nous allons avoir un délai pour la communication entre les différents postes de travail. Une autre source de retard est induite par l'acquisition de la position. Le temps de calcul de l'algorithme du contrôleur discret est négligeable par rapport aux délais d'acquisition et communication. Pour que le système de contrôle soit stable, l'addition de toutes ces sources de délais doit être plus petite que 0.012 secondes.

Dans le cadre du projet MR-Sub, les parties correspondant à la communication avec l'IRM et l'acquisition de la position sont en cours de développement. Pour cette raison, nous n'avons pas pu tester notre système de contrôle sur place. Par contre, la simulation en utilisant MATLAB peut nous donner une première approche sur le système réel.

Conclusions

Ce chapitre porte sur la conclusion globale de mes travaux de maîtrise. Je résume les notions présentées tout au long du mémoire et propose des améliorations à apporter au projet pour les travaux futurs.

Résumé du travail accompli

Ce travail contribue aux études d'analyse et contrôle de deux systèmes nanorobotiques. La plus part des nanosystèmes qui ont atteint un certain degré de maturité ont besoin de techniques de contrôle adaptées. L'application du contrôle dans ce domaine est très diversifiée, car il y a plusieurs aspects de contrôle. Nous nous sommes intéressé plus particulièrement à deux applications développées au Laboratoire de NanoRobotique de l'École Polytechnique de Montréal: Contrôle de température de l'environnement de travail du NanoWalker et contrôle de la position d'un microsystème par gradient de champ magnétique fourni par un appareil médical type IRM. Ces deux systèmes de contrôle sont très différents et donnent des exemples de contrôle en nanorobotique où les contraintes sont différentes.

Dans le premier chapitre nous avons abordé le projet NanoWalker. Le travail décrit par ce chapitre porte sur le développement d'un système de contrôle de température capable de maintenir la température des robots dans l'intervalle thermique d'opération (0°C - 70°C). En premier lieu, nous avons procédé à l'optimisation du système d'acquisition des données et à la modélisation du système thermique. Les tests préliminaires nous ont permis de constater que le contrôle industriel de la chambre de refroidissement implémenté dans le PLC était inefficace pour nos conditions de travail. Nous avons alors appliqué un contrôle doux au niveau du programme PLC, qui a permis d'obtenir un régime transitoire stable. Cependant nous avons relevé un problème important posé par

l'emplacement des thermocouples connectés au PLC. En effet, ces thermocouples n'indiquent pas la température à surface des NanoWalkers. Pour pallier à ce problème nous avons développé un contrôleur externe. Les stratégies choisies consistent en l'implémentation du contrôleur Tout-Rien et PID, deux techniques hautement utilisées dans les applications thermiques. Avec ces approches nous avons obtenu des résultats satisfaisants en régime permanent et régime transitoire. Cependant la différence entre le thermocouple 1 et le thermocouple 8 est d'environ 40°C lorsque tous les NanoWalkers dissipent 10W. C'est une différence de température qui est trop grande sachant qu'en réalité chaque NanoWalker dissipera une puissance de 15W de moyenne.

Dans le deuxième chapitre nous avons travaillé sur le projet MR-Sub. À partir de l'hypothèse, qu'un gradient de champ magnétique généré par un appareil IRM, permette de contrôler, de façon externe, un dispositif, nous avons validé les formules théoriques décrivant les différentes forces du montage de simulation. Nous avons par la suite conçu un contrôleur analogique de type PID pour l'asservissement cause du fait que le PID est très répandue dans le monde industriel. Pour le réglage des gains du contrôleur nous avons utilisé la technique de placement de pôles. Par contre, dans le système réel, le contrôleur doit être discret. À partir du contrôleur PID analogique conçu, nous avons alors procédé à sa discrétisation à l'aide des transformations d'Euler. Les résultats de simulation obtenus sont très satisfaisants.

Travaux futurs et améliorations

La durée d'un projet de maîtrise étant toujours limitée, il demeure des parties du travail qui ne sont pas raffinées comme on le souhaiterait en d'autres termes on se satisfait d'une version fonctionnelle mais non optimale des systèmes de contrôle. Et comme pour tout autre projet des problèmes nouveaux ou inattendus surviennent lors de la réalisation.

Cette section fait état du travail qui reste à faire et des améliorations que nous préconisons pour l'amélioration des systèmes de contrôle.

Le problème le plus important que nous avons rencontré dans le système de refroidissement a été la différence de température de 40°C entre le thermocouple 1 et le thermocouple 8 lorsque tous les NanoWalkers dissipent 10W. Ce phénomène est très ennuyant pour n'importe quelle stratégie de contrôle que l'on utiliserait. Nous avons alors cherché les sources d'une telle différence parmi les quelles nous avons trouvé:

- Le flux d'air froid circule de l'entrée de la chambre vers la sortie, et l'air perd son pouvoir de refroidissement durant ce trajet;
- La chaleur dissipée par les NanoWalkers situés à l'entrée va se rajouter à celle des NanoWalkers qui suivent;
- La chambre a un volume d'air très grand;
- Avec seulement un diffuseur d'air froid et une action de contrôle on doit contrôler la température de 100 sous-systèmes indépendants.

Pour diminuer cette différence de température nous suggérons quelques pistes:

- Utilisation un Multi diffuseur d'air froid;
- Limitation du volume;
- Utilisation d'une plateforme giratoire;
- Prévoir si cela est possible un travail intermittent des NanoWalkers;
- Effectuer l'analyse du parcours du flux d'air et le canaliser plus efficacement.

Un autre problème que nous avons rencontré est l'oscillation de la courbe de température en régime permanent. Dans le cas du contrôleur tout rien, il est normal d'avoir des petites oscillations. Par contre, le contrôleur PID n'est pas capable de réduire cette oscillation à cause du fait que le modèle du système n'est pas connu et les

paramètres du système ne sont pas constants. En fait, les conditions du système changent beaucoup avec la pression du réservoir, la quantité d'azote qui reste ou l'azote qu'il y a dans l'échangeur. Alors, il est difficile d'atteindre une réponse sans oscillation avec les gains Kp , Ki et Kd fixes. Une alternative à tester serait d'implémenter un contrôleur PID «auto-tuning».

Dans le cadre du projet MR-Sub, les parties correspondant à la communication avec l'IRM et l'acquisition de la position étant en cours de développement, nous n'avons pas pu tester notre système de contrôle. Nous sommes conscients que la contrainte de temps est très importante dans le contrôleur discret. Il faudra par conséquent caractériser les délais imposés par le système et en tenir compte pour le contrôle. De plus, nous avons utilisé un modèle du système très simplifié en utilisant seulement les forces les plus significatives. Dans les futures simulations il faudra tenir compte des autres forces mises en jeu dans le système (la force d'écoulement,...) pour se rapprocher plus du système réel.

Considérations finales

La nanotechnologie est un domaine multidisciplinaire émergent où les scientifiques venant de chaires de recherches de la physique, de la chimie, de la biologie et de l'ingénierie trouvent ici un des champs de travail les plus intéressants. Parmi toutes les disciplines, l'automatique joue un rôle très important et rencontre beaucoup de nouveaux défis car lorsqu'on parle de miniaturisation, de travail à l'échelle nanométrique, de systèmes de propulsion etc. de nouvelles contraintes apparaissent.

Ce projet a permis l'analyse des contraintes et le développement de techniques de contrôle efficaces pour deux applications complètement différentes de systèmes nanorobotiques.

Liste des références

- [1] MARTEL S., CERVERA OLAGUE L., BAUTISTA COVES FERRANDO J., RIEBEL S., KOKER T., SUURKIVI J., FOFONOFF T., SHERWOOD M., DYER R., AND HUNTER I., "General description of the wireless miniature NanoWalker robot designed for atomic-scale operations," *Proceedings of SPIE: Microrobotics and Microassembly*, Vol. 4568, pp. 231-240, Newton, MA, Oct. 29-31, 2001
- [2] MARTEL, S., SHERWOOD, M., HELM, C., DE QUEVEDO, W.G., FOFONOFF, T., DYER, R. et al. 2001. "Three-legged wireless miniature robots for mass-scale operations at the sub-atomic scale". *2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), May 21-26 2001*. Seoul: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 4, P. 3423-3428.
- [3] MARTEL S. AND HUNTER I., "Piezo-drive circuits for amplitude modulated locomotion for miniature wireless robots," *Proceedings of SPIE: Microrobotics and Microassembly*, Vol. 4568, pp. 199-209, Newton, MA, Oct. 29-31, 2001
- [4] MARTEL S., ROUSHDY O., SHERWOOD M., AND HUNTER I., "Optical high resolution positioning system for miniature robot," *Proceedings of SPIE: Microrobotics and Microassembly*, Vol. 4194, Boston, MA, pp. 121-128, Nov. 5-6, 2000
- [5] MARTEL, S., KOKER, T., HUNTER, I. 2001. "Main design issues for embedding onto a wireless miniature robot, a scanning tunneling positioning system capable of atomic resolution over a half-meter diameter surface area". *Microrobotics and Microassembly III, Oct 29-30 2001*. Newton, MA, United States: The International Society for Optical Engineering. 4568, P. 68-77.

- [6] MARTEL, S., KOKER, T., RIEBEL, S., SHERWOOD, M., SUURKIVI, J., HUNTER, I. 2001. "An infrastructure suited for supporting a fleet of wireless miniature robots designed for atomic-scale operations". *Microrobotics and Microassembly III, Oct 29-30 2001*. Newton, MA, United States: The International Society for Optical Engineering . 4568, P. 221-230.
- [7] MARTEL, S., RIEBEL, S., KOKER, T., SHERWOOD, M., HUNTER, I. 2001. "Large-scale nanorobotic factory automation based on the nanowalker technology". *8th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA 2001), Oct 15-18 2001*. Antibes-Juan les pins: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2, P. 591-597.
- [8] MARTEL, S., EMBLER, J., RIEBEL, S., GIBBONS, J., HUNTER, I. 2001. "A novel heat dissipation approach for high-powered miniature robots". *Microrobotics and Microassembly III, Oct 29-30 2001*. Newton, MA, United States: The International Society for Optical Engineering. 4568, P. 241-251.
- [9] MARTEL S., SCHINDLER A., BAUMANN G., RIEBEL S., AND BOITANI T. *Cooling platform for an automated nanofactory based on a fleet of miniature robots designed for atomic scale operations*, IEEE Automation 2003, Taiwan, May 8-11, 2003
- [10] PAN, S.H., HUDSON, E.W., DAVIS, J.C. 1999. "He refrigerator based very low temperature scanning tunneling microscope ". *Review of Scientific Instruments*. 70:2. 1459.
- [11] ANDREAS SHINDLER, *Development of a Cooling System for Miniature Robots (NanoWalker)*. Montréal, École Polytechnique, Chaire en nano-robotique, 2002
- [12] FRANK P. INCROPERA, DAVID P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. DeWitt, Chapitre 1-2-3-4-5-6-7-9-12, WILEY, USA, 4th edition 1996, 886 p.

- [13] GENEST, JEAN-DANIEL: *Transfert de Chaleur dans une "Nanofactory"*. Montréal, École Polytechnique de Montréal, Chaire en nanorobotique, 2002
- [14] TREMBLAY, CHARLES C.: *Dissipation de Chaleur du NanoWalker*. Projet intégrateur, Montréal, École Polytechnique, Chaire en nanorobotique, 2002
- [15] MANKIEWICZ, MARTIN: *Système de contrôle d'environnement pour Nanowalkers*. Projet intégrateur, Montréal, École Polytechnique, Chaire en nanorobotique, 2002
- [16] GEN, G., GEARY, G. M. *On performance and tuning of PID controllers in HVAC systems*, Second IEEE Conference on Control Applications, September 13 – 16, 1993, Vancouver. P. 819 – 824.
- [17] RALF MOROS, *Temperature Control Simulation*. [En Ligne] Germany. <http://techni.tachemie.uni-leipzig.de/rege/> (Page consultée le 18 février 2004)
- [18] TRIANGLE RESEARCH INTERNATIONAL, Inc. *The Embedded Super PLCs. M-series PLC User's Manual*. [En Ligne] <http://www.tri-plc.com/> (Page consultée le 18 février 2004)
- [19] OGATA, KATSUHIKO. *Ingenieria de Control Moderna*, Tercera Edicion, Prentice Hall, 1998
- [20] MATHIEU, J-B. *Contrôle d'un minisystème pour applications endovasculaires par champ magnétique de type IRM – Étude préliminaire*, PFE avril 2002

- [21] J-B. MATHIEU, S. MARTEL, L. YAHIA, G. SOULEZ, G. BEAUDOIN,
Preliminary studies for using magnetic resonance imaging systems as a mean of propulsion for microrobots in blood vessels and evaluation of ferromagnetic artefacts, CCECE v7, 2003
- [22] KASTLER,B., VETTER, D., PATAY, Z., Germain, *Comprendre l'IRM*, 3e édition;
Collection d'imagerie radiologique 2000, chapitre 3
- [23] R. E. HENDRICK, P. D. RUSS, J. H. SIMON, *MRI: principles and artifacts*,
Raven Press, 1993
- [24] ROBERT S. HILLMAN, KENNETH A. *Hematology in Clinical Practice*, Third
Edition, McGraw-Hill, 2002
- [25] DE SANTIS, ROMANO. *Analyse des asservissements non linéaires*. École
Polytechnique de Montréal. Département de génie électrique.
- [26] WILKIE J., JOHNSON M., KATEBI R. *Control Engineering, an introductory
course*, Palgrave, 2002, P. 531 – 535
- [27] GALARZA, J. *Control de Sistemas por Ordenador*, Escuela Superior Politécnica
de Mondragon, 2000

Annexe A : Spécifications de la chambre

Standard Equipment (Chamber)

Internal dimensions	• 1300 x 1200 x 1200 mm (W x H x D)
External dimensions	• 1500 x 1400 x 1400 mm
Interior finish	• Stainless steel
Exterior finish	• Epoxy coated mild steel, painted dark blue
Insulation type	• Foamed-in-place polyurethane ($k=0.017$ W/m ² K)
Window	• 600 x 400 mm with shade
Arm ports	• 2 x 222 mm diameter with butyl gloves
Air lock	• 250 x 150 x 170 mm (W x H x D) • Airlock is fitted with a purge valve to reduce intake of air
Inlet helium diffuser	• 600 x 300 x 600 mm (W x H x D)
Outlet helium diffuser	• 600 x 300 x 600 mm • Adjustable fins on inlet diffuser and filter mount on outlet diffuser
Mounting	• Flat rubber mount pad
Illumination	• Built-in fluorescent (top-side mount)
Primary electrical connection	• 120 VA/ 60 Hz/ 1-phase/ 15 A
Helium connection	• 12.7 mm tube
Vent outlet	• 12.7 mm adjustable from 12.7 – 50.8 mm
Vacuum breaker	• Included
Cable Ports	• Top 2 x 160 mm diameter • Back 2 x 160 mm diameter
Cooling System (remote)	
Type	• Remote liquid nitrogen exchanger
Connections	• 9.5 mm LN ₂ / 50.8 mm NPT vent
Capacity	• 4.4 kW
Minimum temperature	• -185 °C

Ventilation	· Fan forced, max. 3.4 m ³ /min
Ducting	· 101.6 mm diameter, insulated
Special note	· System to be insulated from chamber to eliminate vibrations
Dimensions	· 254 x 406 x 457 mm
Other features	· Built-in 120VA/ 60 Hz/ single phase outlet · Built-in cryogen injection for liquid nitrogen including manual isolation valve, automatic injection valve and necessary relief valves

Interface

- External interface through RS-232C or RS-485 communication (Temperature set point can be remotely adjusted via computer)

Performance

Cool down rate at maximum load (1500 Watts)	· Minimum of 7.5 minutes from 20 °C to -70 °C at start up conditions
LN₂ consumption	· Approx. 12 kg/h at maximum heat load and steady state conditions

Annexe B : Communication PC-PLC

4.12 Read Variable - Integers (A to Z)

Command Format

R	V	I	alphabet	*	↻
---	---	---	----------	---	---

A,B,C...Z

Response Format

R	V	I	16 ⁷	16 ⁶	16 ⁵	16 ⁴	16 ³	16 ²	16 ¹	16 ⁰	*	↻
---	---	---	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---	---

8 Hexadecimal Digit for 32-bit Integer

E.g. To read the value of the variable "K", send host-link command "RVIK*". If variable K contains the value 123456₁₀ (=1E240₁₆), PLC will send the response string as "RVI0001E240*".

4.13 Read Variable - Strings (A\$ to Z\$)

Command Format

R	V	\$	alphabet	*	↻
---	---	----	----------	---	---

A,B,C...Z

Response Format

R	V	\$	a	a	a	a	a	a	*	↻
---	---	----	---	---	---	-----	-----	---	---	---	---	---

ASCII characters of the string (variable length)

E.g. To read the value of the string variable "M\$", send host-link command "RVSM*". If variable M\$ contains the string "Hello World", the PLC will send the response string as "RV\$hello World*".

4.14 Read Variable - Data Memory (DM[1 to DM(4000)

Command Format

R	V	D	16 ³	16 ²	16 ¹	16 ⁰	*	↻
---	---	---	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---	---

0001 to 0FA0 (4000₁₀)

Response Format

R	V	D	16 ³	16 ²	16 ¹	16 ⁰	*	↻
---	---	---	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	---	---

4 Hexadecimal Digit for 16-bit Integer

E.g. To read the value of DM[3800], send host-link command "RVD0810*". If variable DM[3800] contains the value 12345₁₀ (=3039₁₆), PLC will send the response string as "RVD03039*".

4.26 Write Variable - Integers (A to Z)**Command Format**

W	V	I	alphabet	16^7	16^6	16^5	16^4	16^3	16^2	16^1	16^0	*	↻
---	---	---	----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---	---

A,B,C...Z 8 Hexadecimal Digits for 32-bit integer

Response Format

W	V	I	*	↻
---	---	---	---	---

E.g. To assign variable "K" to number 56789₁₀ (=0DD5₁₆), send hostlink command "WVIK00000DD5*".

4.27 Write Variable - Strings (A\$ to Z\$)**Command Format**

W	V	\$	alphabet	a	a	a	a	*	↻
---	---	----	----------	---	---	-----	-----	---	---	---	---

A,B,C...Z

ASCII characters of the string (variable length)

Response Format

W	V	\$	*	↻
---	---	----	---	---

E.g. To assign the string "T100MD+ Super PLC" to the string variable PS, send hostlink command "WV\$PT100MD+ Super PLC*".

4.28 Write Variable - Data Memory (DM[11 to DM4000])**Command Format**

W	V	D	16^3	16^2	16^1	16^0	16^3	16^2	16^1	16^0	*	↻
---	---	---	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---	---

16-bit Index to array
0001 to 0FA0 (4000₁₆)

16-bit Integer Data

Response Format

W	V	D	*	↻
---	---	---	---	---

E.g. To write the value 1234₁₀ (=4D2₁₆) to DM[1000], send hostlink command "WVD03E804D2". (1000₁₀ = 3E8₁₆)

4.15 Read Variable - System Variables

This command allows you to read all the M-series PLC's 16-bit system variables such as the inputs[], outputs[], relays[], counters[], timers[], timers' P.V., counters' P.V., CLK[] and DATE[]. Although inputs, outputs etc. are also accessible via the "RI", "RO", "RR"... commands, the RVS command can access them as 16-bit words instead of as 8-bit bytes in those commands. For the 32-bit system variable HSCPV[], use the "RVH" command described in the next section to access it. It may be more conventional for some SCADA software driver to use a single header command "RVS" to access all the I/O, varying only the "type" number to access different I/O types.

The RVS command also can be used to access the internal variables used to store ADC, DAC and PWM values obtained during the latest execution of the ADC(), setDAC or setPWM statement. These are however not system variables in TBASIC sense. E.g. it is illegal to use ADC[2] to access the ADC channel #2 in TBASIC (you have to use the ADC(2) function instead). An 8-bit hexadecimal number is used to denote the "type" of system variable, as shown in the following table:

System Variable	type
input[]	01
output[]	02
relay[]	03
timer[]	04
ctr[]	05
timerPV[]	06
ctrPV[]	07

System Variable	type
clk[]	08
date[]	09
-	0A
ADC*	0B
DAC*	0C
PWM*	0D

* Not a system variable in TBASIC

Command Format



type (01 to 0D) - denote the type of system variable to access.
 Index (01 to 1F) - index into the array, starting from 01.

Response Format



4 Hexadecimal Digit for 16-bit integer

CRYOTRONIX

20-09-2002Rev.0

Climate Control Chamber Manual**PLC program parameters****Variable Assignment Table for PLC**

Variable	Designation	Value	Limits	Memory
A	Input 1 - up arrow - increase set value	0 or 1		
B	Input 2 - down arrow - decrease set value	0 or 1		
C	Proportional control factor			
D	Derivative factor			
E	Integral factor			
F	1 minute operation timer			
G				
H	PID calculated value for output to LN2 valve			
I	Primary counter for scrolling menus	0,1,2 ...		
J	Secondary counter for scrolling menus	0,2,4 ...		
K	Alarm counter	0 or 1		
L	Calculated temperature/time rate			
M	Current temperature set value (SV)			
N	Temperature/time input value from memory			
O	Oxygen minimum purge value in %	3	0 to 21	2
P	Oxygen maximum purge value in %	5	1 to 21	3
Q	Relative humidity (RH) maximum value in %	5		4
R	Blower speed in RPM	1200	0 to 1200	5
S	Chamber pressure maximum	0.5	0 to 2	6
T	Cooling stage counter	0,1,2 ...999	999=off	
U	Choice of thermocouple for control	1,2 or 3		7
V	Process value (PV) temperature			
W	Menu level determinant for ladder logic			
X	Menu level determinant for ladder logic			
Y	Input parameter for settings			
Z	Timer counter parameter	0		

CRYOTRONIX

20-09-2002R ev.0

Climate Control Chamber Manual**String Variables**

Variable	Designation	Value	Limits	Memory
A\$	Control parameter for inputs 1 thru 6 (buttons)			
B\$				
C\$				
D\$				
E\$				
F\$				
G\$				
H\$				
I\$	Type of injection I=indirect : D=direct			
J\$				
K\$	Horn silence parameter	0 or 1		
L\$				
M\$	Alarm message			
N\$				
O\$				
P\$	Whole number display			
Q\$	Decimal number display			
R\$				
S\$				
T\$	Maximum temperature differential between	40 Celsius		
U\$	ADC(1) reading , oxygen			
V\$	ADC(2) reading , RH			
W\$	ADC(3) reading , pressure			
X\$	ADC(4) reading , TC1 , inlet temperature			
Y\$	ADC(5) reading , TC2 , outlet temperature			
Z\$	ADC(6) reading , TC3 , exhaust temperature			



20-09-2002Rev.0

Climate Control Chamber Manual

Analog Inputs / Outputs

Variable	Designation	Range	Zero offset lower limit	Full scale offset upper limit
ADC(1)	Oxygen , OT1	40 %	800	4060
ADC(2)	Relative humidity , HT1	100 %	800	4060
ADC(3)	Pressure , PT1	2" wc	650	4060
ADC(4)	Inlet temperature , TC1	-100 to 100 Celsius	876	4092
ADC(5)	Outlet temperature , TC2	-100 to 100 Celsius	820	4092
ADC(6)	Exhaust temperature , TC3	-100 to 100 Celsius	860	4092
ADC(7) or DAC#1	Blower speed	0 to 1200 RPM	0	4092
ADC(8) or DAC#2	Liquid nitrogen valve setting	0 to 100 %	820	4092

Annexe C : Code contrôleur externe

```

void DAQManager::CalculeCommande ()
{
    if(m_pSetup->m_bPidRelais) //Calcul du relais
    {
        Erreur = (Temperature-Consigne);
        Inters=ValeurOn-(Kp*E2);

        if(Erreur >= E2)
        {
            Commande = (Kp*Erreur) + Inters;
            if (Commande >= Ki) Commande=Ki;
        }
        else if(Erreur <= E1)
        {
            Commande = 0;
        }
        else if((Erreur < E2) && (Erreur > E1) && (OldCommande == 0))
        {
            Commande = 0;
        }
        else if((Erreur < E2) && (Erreur > E1) && (OldCommande == ValeurOn))
        {
            Commande = ValeurOn;
        }
        else Commande = 0;
    }

    else //Calcul du PID
    {
        Erreur = (Consigne-Temperature);
        ActionIntegralAccu += Erreur;

        // Anti Windup
        if (ActionIntegralAccu > iMax) ActionIntegralAccu = iMax;

        ActionIntegral=Ki*ActionIntegralAccu;
        ActionDerivative=Kd*(Temperature - Temperature_1);

        if (Consigne < Temperature)
        {
            Commande=Kp*Erreur + ActionIntegral + ActionDerivative + 820; //820: offset
            if (Commande > 2000) Commande= 2000;
        }
        else
        {
            Commande=0;
            ActionIntegralAncien=0;
        }

        Temperature_1=Temperature; //Mise à jour

        //Envoie la commande au PLC
        char command[50];

        sprintf(command,"WVIH%08X*",int(Commande));
        m_Serial.SendPLC(command);
    }
}

```

Annexe D : Paramètres de simulation et PID discret

```

%-----
%Nom de fichier : ini_model_PID.m
%
%Auteur : Haritz Macicior
%
%Date : 15/11/2003
%
%Description : Valeurs de tous les parametres nécessaires pour décrire
%              correctement le déplacement d'une bille métallique a travers
%              un fluide contenue dans un tube en plastique. Ces parametres
%              sont tous en unités SI.
%-----

% Parametres du tube
%-----

% Rayon
rt = 0.0254/8;

% Aire
At = pi*rt^2;

% Parametres de la bille
% Matériau : 1010/1020 Carbon Steel (d=1/8")
% masse volumique : 0.284 lb/po^3 = 7861.06517404 kg/m^3
%-----

% Rayon
rb = 0.0254/16;

% Volume
Vb = 4*(pi*rb^3)/3;

% Aire frontal
Af = pi*rb^2;

% Masse volumique
rhob = 7861.06517404;

% Masse
m = Vb * rhob;

% Coefficient de trainée
Cd = 0.04;

% Caractéristiques magnétiques
M = 1330684;
Va = Vb;

% Coefficient de la friction
%-----

g = 9.8;
b = 0.002;
mus = 0.06;
mud = 0.04;

```

```
% Force magnétique
%-----

% Gradient du champ
GB = 18e-3;

% Magnétisation de la bille
Fm = Va*M;

% Contrôleur PID analogique
%-----

% Gain du controleur
Kp=160;
Ki=120;
Kd=30;

% Controller Discrete
%-----

% Periode de echantillonnage
h=0.012;

% Gain du controleur
Kp=6.5;
Ti=5;
Td=0.15;
N=10;

% Delais
d=0.01;
```

```

/*****
* Fonction: PID.cpp
*
* Description: Contrôleur PID discrete
*
* Author: Haritz Macicior
*
* Date: 21-4-04
*****/

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <PID.h>

float Kp,Ti,Td,N,h;

float Consigne, Position;
float Erreur, Erreur_1;
float ActionIntegral, ActionIntegral_1, ActionIntegralMax;
float ActionDerivative, ActionDerivative_1;
float Commande;

void main(void)
{
    initialiser();
    while(1);
}

void initialiser(void)
{
    Erreur_1=0;
    ActionIntegral_1=0;
    ActionDerivative_1=0;
    h=0.01*(0.045/4); //Periode d'echantillonnage
    Kp=120;           //Gain du controleur
    Ti=50;
    Td=5;
    N=10;

    //Initialiser la routine d'interruption pour chaque "h"
}

void interrupt(void)
{
    Consigne=LectureConsigne();
    Position=LecturePosition();
    Erreur=Consigne-Position;

    //Algorithme PID
    ActionIntegral=ActionIntegral_1 + (h/Ti)*Erreur_1;

    //Anti-windup
    if (ActionIntegral > ActionIntegralMax) ActionIntegral=ActionIntegralMax;
    else if (ActionIntegral < -ActionIntegralMax) ActionIntegral=-ActionIntegralMax;

    ActionDerivative=(Td/(Td+(N*h)))*(ActionDerivative_1 + (N*(Erreur - Erreur_1)));

    Commande=Kp*(Erreur + ActionIntegral + ActionDerivative);

    EnvoyerCommande(Commande);

    //Mise a jour
    Erreur_1=Erreur;
    ActionIntegral_1=ActionIntegral;
    ActionDerivative_1=ActionDerivative;
}

```