



Titre: Étude des perturbations vibratoires des dalles de montage dans un
Title: laboratoire de fabrication mécanique

Auteur: Corinne Potvin
Author:

Date: 2005

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Potvin, C. (2005). Étude des perturbations vibratoires des dalles de montage dans
Citation: un laboratoire de fabrication mécanique [Master's thesis, École Polytechnique de
Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7668/>

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

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7668/>
PolyPublie URL:

**Directeurs de
recherche:** Guy Cloutier, & René Mayer
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE DES PERTURBATIONS VIBRATOIRES DES DALLES DE
MONTAGE DANS UN LABORATOIRE DE FABRICATION MÉCANIQUE

CORINNE POTVIN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE MÉCANIQUE)
JUN 2005

© Corinne Potvin, 2005.



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: 978-0-494-16838-7

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-16838-7

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

ÉTUDE DES PERTURBATIONS VIBRATOIRES DES DALLES DE
MONTAGE DANS UN LABORATOIRE DE FABRICATION MÉCANIQUE

présenté par: POTVIN Corinne

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

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

M. BALAZINSKI Marek, Ph.D., président

M. CLOUTIER Guy, Doct, membre et directeur de recherche

M. MAYER René, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. MUREITHI Njuki-William, Ph.D., membre

Je tiens à remercier mes parents pour leur soutien, autant moral que financier, lors de la réalisation de cette maîtrise.

I want to thank Laurie Schweiger for her moral support and her great advice.

And I want to thank Zachary McLeod for his understanding, his patience and his love.

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier MM Guy Cloutier ainsi que René Mayer pour leur direction dans ce travail de recherche.

Je voudrais également souligner l'implication de MM Benoît Furét et Henri Paris. Je désire mentionner l'aide des gens qui m'ont assistée au LRVF, MM Guy Létourneau, Guy Gironne, Clément Bisson, Louida Laliberté, Yan Boutin ainsi que Mme Mélissa Côté.

Et finalement, je désire remercier Cathy Laporte pour les corrections.

RÉSUMÉ

Le sujet de ce mémoire est l'étude de la propagation de perturbations vibratoires des dalles de montage des machines à commandes numériques (MOCN) dans le Laboratoire de recherche en fabrication virtuelle (LRFV) de l'École Polytechnique de Montréal.

En effet, les instruments précis utilisés dans ce laboratoire peuvent être affectés par plusieurs types de perturbations provenant soit des machines fonctionnant dans l'atelier, de la climatisation, de l'éclairage, des systèmes électriques, des gens travaillant dans l'atelier et de perturbations majeures à l'extérieur de l'atelier tels que des travaux de construction. Par contre, nous nous limitons à l'étude de la diffusion possible de perturbations vibratoires entre les dalles de montage. En effet, nous voulons découvrir dans le cadre de cette étude préliminaire si les perturbations sont transmises d'une dalle à l'autre et dans quel ordre de grandeur.

Nous utilisons les travaux de Osama Hunaidi dans le domaine de l'étude des perturbations vibratoires dues à la circulation automobile pour baser nos choix de protocole expérimental et d'équipement. Nous utilisons des accéléromètres qui sont reliés à un système d'acquisition de données pour obtenir les données. Les équipements et conditions d'expérimentation ont été choisis suite à plusieurs tests préliminaires. Nous utilisons des équipements qui sont les mieux adaptés à nos besoins, en ayant une plage de lecture la plus proche possible des mesures effectuées tout en étant réutilisables et compatibles avec l'équipement existant dans le laboratoire.

Nous utilisons différents modèles de calculs connus pour faire une analyse des résultats. Pour caractériser les amplitudes d'accélérations, nous utilisons les racines des carrés moyens centrés qui nous permet d'avoir un indice rapide pour faire une première comparaison des résultats. Pour caractériser l'ordre de grandeur de l'amplitude de déplacement, nous utilisons une double intégrale cumulative selon l'algorithme du trapèze. Nous utilisons le spectre de puissance pour déterminer le

contenu fréquentiel des données obtenues.

Une vérification de l'équipement est tout d'abord réalisée. Nous voulons nous assurer que le type de bases utilisées pour fixer les accéléromètres en place n'a pas d'influence sur les résultats obtenus. Nous effectuons trois types de tests. Tout d'abord, des tests avec une source étalon de vibration et des tests vérifiant chacune des bases simultanément avec une excitation de faible amplitude nous ont permis de vérifier que le contenu fréquentiel des résultats obtenus est très répétable et que l'amplitude variait quelque peu. Une étude de répétabilité à l'aide de la méthode statistique des tests hiérarchisés en analyse de variance a donc été utilisée pour évaluer l'impact du posage des accéléromètres et de l'utilisation de différents types de bases sur l'amplitude. Nous déterminons que la plus grande source de variance n'est pas l'utilisation de bases de types différents mais le posage effectué par l'expérimentateur. De plus, la variance du posage modifie la répétabilité des expériences de l'écart $\pm 2\sigma$ à un écart de $\pm 2\sqrt{5}\sigma$.

Nous réalisons une étude pour évaluer l'impact de l'*excitation de fond* sur les différentes dalles, c'est-à-dire les perturbations qui affectent les différentes dalles lorsqu'aucune machine n'est fonctionnelle. Les résultats indiquent qu'en plus d'une perturbation de fond toujours présente, nous obtenons des phénomènes intermittents qui causent une variation d'amplitude de vibration de 10 à 15%.

Une fois que toutes les vérifications sont effectuées, en utilisant une machine-outil comme élément générateur de vibrations, nous évaluons la transmission des perturbations de la dalle de la machine en mouvement aux dalles voisines. Nous en venons à la conclusion que, si les vibrations de la machine sont transmises sur sa dalle, elles peuvent effectivement être transmises à la dalle voisine. En effet, nous avons observé que les lectures de vibrations doublent sur les dalles voisines avec la machine en mouvement, passant de 25 à 50 nanomètres dans le cas testé.

Ainsi, pour répondre à la problématique énoncée, il y a effectivement une transmission de perturbations, et elle se situe dans l'ordre de grandeur du dixième de

micromètre. La perturbation résulte d'une transmission de surface. Considérant cet ordre de grandeur, les mesures statiques qui comportent des moyennes dans leurs calculs ne seront pas affectées. Quant aux mesures dynamiques, d'autres études seraient nécessaires pour tirer des conclusions satisfaisantes, en incorporant les instruments sur lesquels on veut évaluer l'effet des vibrations dans les tests.

ABSTRACT

The subject of this thesis is the study of the propagation of vibrations through the flagstones of CNC machine tool in the Laboratoire en fabrication virtuelle (LRFV) at École Polytechnique de Montréal.

Precision tools used in that laboratory can be affected by different types of perturbation : machine tool working, air conditioning, lighting, electric systems, people working in the laboratory, or external major perturbations like construction work. However, we limit this study to the possible diffusion of perturbation between the flagstones of the machine tool setup. In this preliminary study, we want to find out if those perturbations are transmitted from one flagstone to another, and with which order of magnitude.

We consulted Osama Humaidi's work in the field of vibration perturbations caused by traffic circulation to base our choice of experimental protocol and equipment. We use accelerometers connected to a data acquisition system to obtain data. The equipment and the experimental conditions were chosen following several preliminary tests. We use equipment which is best suited to our needs, which has a reading range the closest possible to the data we plan to obtain and is reusable and compatible with existing equipment in the laboratory.

We used different known computational models to analyse our results. Using the centered root mean square to characterise acceleration amplitude provides us with a fast way to do a first result comparison. To get an order of magnitude of the displacement amplitude, a double integral is used with the trapeze algorithm. We used the power spectrum to evaluate the frequency content of the acquired data. Equipment verification is the first step. We want to be sure that the type of base used to fix the accelerometers in place does not influence the results. We conduct three types of tests. First, we test with a vibration measurement standard and secondly with three accelerometers simultaneously with a low amplitude perturbation

to verify that the frequency content is really repeatable and that the amplitude varies slightly. A repeatability study with hierarchical design is conducted to evaluate the impact of the accelerometer setup and the use of different types of bases on amplitude. We determine that the most important cause of variation is not the type of base used but the variability in the actual setup done by the tester. Furthermore, the setup variance modifies the experiment repeatability from $\pm 2\sigma$ to $\pm 2\sqrt{5}\sigma$.

We evaluate the impact of the background excitation on the different flagstones when all machines are off. Results indicate that in addition to the background excitation, some intermittent phenomena cause an amplitude variation of 10 to 15 %.

Once all verifications are done, using a machine tool as vibration generator, we evaluate the transmission of perturbations from one machine flagstone to its neighbours. We conclude that if the machine vibrations are transmitted to its flagstone, they may indeed be transmitted to neighbouring flagstones. The vibration readings double with the machine motion, from 25 to 50 nanometers in the tested case.

To answer the initial question, we can conclude that transmission of perturbations does indeed occur, and that it has an order of magnitude of one-tenth of a micrometer. Considering this magnitude, it will not have an impact for static measures which include averages in their computation. Further studies must be conducted to be able to make satisfactory conclusions concerning dynamic measurements.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	ix
TABLE DES MATIÈRES	xi
LISTE DES FIGURES	xvi
LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES	xix
LISTE DES TABLEAUX	xx
LISTE DES ANNEXES	xxi
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 Mise en situation	1
1.2 Problématique générale	2
1.2.1 Tests préliminaires	3
1.2.2 Sources de perturbations	4
1.2.2.1 Autres machines	6
1.2.2.2 Mitsui-seiki HU40-T	6
1.2.2.3 Climatisation	9
1.2.2.4 Éclairage et systèmes électriques	10
1.2.2.5 Gens présents dans l'atelier	10
1.2.2.6 Perturbations majeures à l'extérieur de l'atelier	11
1.2.3 Importance de chaque source de perturbation	11

1.2.4	Sources de diffusion	12
1.2.4.1	Ondes dans l'air	12
1.2.4.2	Ondes dans les solides	13
1.2.4.3	Préoccupations	13
1.3	Problématique spécifique	13
1.4	Littérature	15
1.4.1	Sources de perturbations utilisées	15
1.4.2	Protocole et recommandations	16
1.4.3	À retenir	17
1.5	Méthode utilisée	18
1.6	Organisation du document	19
CHAPITRE 2	MODÈLES DE CALCULS UTILISÉS	20
2.1	Fréquences	20
2.2	Amplitude d'accélération	21
2.2.1	Valeur RCM	22
2.3	Amplitude de déplacement	23
2.3.1	Méthode temporelle	23
2.3.2	Méthode fréquentielle	24
2.3.3	Comparaison des méthodes avec signal théorique	24
2.3.3.1	Introduction d'un bruit aléatoire	27
2.3.4	Comparaison des méthodes avec signal réel	28
2.3.5	Solution retenue	31
2.4	Tests hiérarchisés en analyse de variance	31
2.4.1	Présentation du test	32
2.4.2	Modèle mathématique	33
2.5	Moyen de calculs	35
2.5.1	Gestion des fichiers de données	36

2.5.2	Structure générale	37
CHAPITRE 3 CHOIX DES ÉQUIPEMENTS ET CONDITIONS GÉNÉ-		
	RALES DES TESTS	40
3.1	Choix des équipements	40
3.1.1	Tests préliminaires	41
3.1.2	Critères de choix	42
3.1.3	Choix des équipements	43
3.2	Taux et période d'échantillonnage	44
3.3	Logiciel utilisé	46
3.4	Notation utilisée	47
3.5	Unités des résultats	48
3.6	Conclusion	48
CHAPITRE 4 VÉRIFICATION DES ACCÉLÉROMÈTRES ET DES MODES		
	DE FIXATION	49
4.1	Vérification des fréquences avec une source étalon	50
4.1.1	Description du test	51
4.2	Analyse de variance des différentes composantes de montage	52
4.2.1	Description du test	53
4.3	Vérification simultanée	54
4.3.1	Description du test	55
4.3.2	Montage utilisé	55
4.3.2.1	Éléments de désign	55
4.3.2.2	Réalisation	56
4.4	Tests de l' <i>excitation de fond</i>	57
4.4.1	Description du test	57

CHAPITRE 5	TESTS AVEC VIBRATIONS CONTRÔLÉES	59
5.1	Conditions particulières de tests	59
5.2	Tests avec vibration contrôlées	60
5.2.1	Valeur de l'avance commandée	60
5.2.2	Construction du parcours sur machine	62
5.2.2.1	Méthode Matlab	62
5.2.2.2	Axe hypothétique	63
5.2.2.3	Solution retenue	64
CHAPITRE 6	RÉSULTATS	65
6.1	Vérification des fréquences avec une source étalon	65
6.2	Analyse de variance des différentes composantes de montage	66
6.3	Vérification simultanée	68
6.4	Comparaison entre les différents emplacements dans le laboratoire	70
6.4.1	Amplitude des vibrations	71
6.4.2	Fréquences	75
6.5	Tests avec vibrations contrôlées	75
CHAPITRE 7	ANALYSE ET APPLICATIONS	81
7.1	Vérification de l'équipement	81
7.1.1	Comportement en fréquence	81
7.1.2	Comportement en amplitude de vibrations	82
7.1.3	Stratégies pour diminuer les écarts d'amplitude d'accélération	82
7.2	Comparaison entre les différents emplacements dans le laboratoire	84
7.3	Tests avec vibrations contrôlées	85
7.3.1	Lien machine - dalle	86
7.3.2	Lien dalle - dalle	86
7.3.3	Autres types de perturbations contrôlées possibles	87
7.4	Influence sur instruments	88

7.4.1 Recommendations	90
CONCLUSION	92
RÉFÉRENCES	94
ANNEXES	95

LISTE DES FIGURES

FIG. 1.1	Plan du laboratoire de fabrication virtuelle	5
FIG. 1.2	Plan de la MOCN Mitsui-seiki HU40-T	7
FIG. 1.3	Schéma de la problématique	14
FIG. 2.1	Graphique de calcul d'intégrale avec la méthode fréquentielle	26
FIG. 2.2	Intégrale temporelle avec une erreur aléatoire d'amplitude 0,1g	28
FIG. 2.3	Intégrale fréquentielle avec un signal réel	29
FIG. 2.4	Intégrale temporelle avec un signal réel	29
FIG. 2.5	Exemple d'intégrale temporelle avec un signal réel et un filtre passe-haut de Butterworth d'ordre 3	30
FIG. 2.6	Design hiérarchisé d'expérience	32
FIG. 2.7	Légende des schémas de structure Matlab	38
FIG. 3.1	Interface du logiciel Labview	46
FIG. 3.2	Plan de la disposition des machines du LRFV	47
FIG. 4.1	Schéma du montage des accéléromètres sur la source de vi- bration étalon	51
FIG. 4.2	Design hiérarchisé du test	54
FIG. 5.1	Parcours utilisés	63
FIG. 6.1	Spectre de puissance de lectures prises avec source de vibra- tions étalon	66
FIG. 6.2	Graphique de l'amplitude de déplacement	69
FIG. 6.3	Spectre de puissance	70
FIG. 6.4	Spectre de puissance entre 0 et 130 Hz	71
FIG. 6.5	Spectre de puissance des 5 dalles lors des tests de l' <i>excitation</i> <i>de fond</i>	72
FIG. 6.6	Déplacement au sol pour chaque dalle	73
FIG. 6.7	Position de prises de mesure lors des tests simultanés	74

FIG. 6.8	Comparaison des spectres de puissance des résultats de la dalle 2	77
FIG. 6.9	Exemple de l'amplitude de déplacement pour une réplique lors des tests avec machine à l'arrêt	78
FIG. 6.10	Exemple de l'amplitude de déplacement pour une réplique lors des tests avec avance de 337 mm/min	79
FIG. 6.11	Exemple de l'amplitude de déplacement pour une réplique lors des tests avec avance de 1100 mm/min	79
FIG. 6.12	Exemple du spectre de puissance pour une réplique lors des prises de mesure avec machine à l'arrêt	80
FIG. 6.13	Exemple du spectre de puissance pour une réplique lors des prises de mesure avec parcours avec avance de 1100 mm/min	80
FIG. 7.1	Schéma de l'accéléromètre 352B de PCB	83
FIG. I.1	Schéma des fonctions Matlab pour l'amplitude de déplacement	95
FIG. I.2	Schéma des fonctions Matlab pour le calcul du spectre de puissance	96
FIG. I.3	Schéma des fonctions Matlab utilisées lors de la comparaison des méthodes d'intégration numériques	99
FIG. II.1	Système d'acquisition de données utilisé	101
FIG. II.2	Socle à fixer sur source de vibrations étalon (unités MM)	105
FIG. II.3	Montage avec socle et accéléromètre fixé avec base pour cire, base magnétique et base vissée	106
FIG. II.4	Position de test de la source de vibration étalon	107
FIG. II.5	Position de prises de mesure lors des tests simultanés	110
FIG. II.6	Montage des accéléromètres sur le montage circulaire	111
FIG. II.7	Position des accéléromètres au sol	114
FIG. II.8	Position de l'accéléromètre sur le cadre de la machine	114
FIG. II.9	Position de l'accéléromètre fixé sur la broche de la machine	115

FIG. II.10	Parcours utilisés	115
FIG. III.1	Montage circulaire de tests	118

LISTE DES NOTATIONS ET DES SYMBOLES

a :	accélération
A :	amplitude
DAQ :	data acquisition system (Système d'acquisition de données)
F :	fréquence
f_c :	fréquence de coupure
$E(MS)$:	moyenne prévue des carrés (Espected mean square)
F :	avance (Feed)
FAO :	fabrication assistée par ordinateur
FFT :	fast Fourier transform (transformation de Fourier rapide)
g :	$9.8m/s^2$
Hz :	hertz
kHz :	kilohertz
$LRFV$:	Laboratoire de recherche en fabrication virtuelle
m :	mètre
$MOCN$:	machine à commandes numériques
min :	minute
mm :	millimètre
MS :	moyenne des carrées (Mean square)
p :	position
RMS :	root mean square
t :	temps
v :	vitesse
V :	volt
W :	watts

LISTE DES TABLEAUX

TAB. 1.1	Légende de la figure 1.1. plan du laboratoire de fabrication virtuelle	5
TAB. 1.2	Systèmes auxiliaires principaux d'une MOCN	6
TAB. 1.3	Légende de la figure 1.2. composantes de la MOCN Mitsui-seiki HU40-T	8
TAB. 2.1	Tableau des valeurs RCM prises lors des essais simultanés .	25
TAB. 2.2	Tableau des valeurs RCM centrées suite à l'introduction d'un bruit aléatoire	27
TAB. 2.3	Analyse de variance pour un design hiérarchisé à deux facteurs	34
TAB. 3.1	Résumé des choix d'équipement et de condition d'expérimentation	43
TAB. 3.2	Résumé des choix d'équipement et de condition d'expérimentation	48
TAB. 6.1	Valeur RCM moyenne des lectures d'accélération d'une source de vibrations étalon pour la base cirée	65
TAB. 6.2	Analyse de variance pour un design hierarchisé à deux facteurs	67
TAB. 6.3	Tableau des valeurs RCM prises lors des essais simultanés .	68
TAB. 6.4	Valeur moyenne RCM d'accélération lors du test de l' <i>excitation de fond</i>	72
TAB. 6.5	Tableau des valeurs RCM prises lors des vibrations contrôlées	76
TAB. 7.1	Tableau des valeurs de précision et de résolution d'instruments de mesure utilisés dans le LRFV	89
TAB. III.1	Liste des outils	134

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE I	STRUCTURE ET PARTICULARITÉS DU CODE MAT-	
	LAB	95
I.1	Calcul du spectre de puissance et de l'intégrale trapèze	95
I.1.1	Particularités de la FFT sous Matlab	97
I.2	Calcul de la RCM centrée	97
I.3	Calcul des facteurs des tests hiérarchisés en analyse de variance	97
I.4	Autres développements sur Matlab	98
ANNEXE II	PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX	100
II.1	Protocole général	100
II.1.1	Équipement	100
II.1.2	Précautions générales avant réalisation de tests	100
II.1.3	Installation du matériel	102
II.1.3.1	Installation et fixation des accéléromètres	102
II.1.4	Série de tests	103
II.1.5	Format des données	104
II.1.6	Masse des composantes utilisées sur source étalon	104
II.2	Vérification des fréquences avec une source étalon	104
II.2.1	Réalisation des tests	104
II.2.2	Équipement supplémentaire utilisé	105
II.2.3	Position des accéléromètres	106
II.2.4	Réalisation des tests	106
II.2.5	Format de données	107
II.2.6	Notation des fichiers	107
II.3	Analyse de variance des différentes composantes de montage	108
II.3.1	Réalisation des tests	108

II.3.2	Équipement supplémentaire utilisé	108
II.3.3	Réalisation des tests	108
II.3.4	Format de données	109
II.3.5	Notation des fichiers	109
II.4	Vérification simultanée	109
II.4.1	Réalisation des tests	109
II.4.2	Équipement supplémentaire utilisé	110
II.4.3	Position des accéléromètres	110
II.4.4	Réalisation des tests	111
II.4.5	Format de données	112
II.4.6	Notation des fichiers	112
II.5	Tests avec vibrations contrôlées	113
II.5.1	Réalisation des tests	113
II.5.2	Équipement supplémentaire utilisé	113
II.5.3	Réalisation des tests	113
II.5.3.1	Parcours utilisés	115
II.5.4	Format de données	116
II.5.5	Notation des fichiers	116
ANNEXE III	DOSSIER DE FABRICATION DU MONTAGE CIRCULAIRE	
	DE TEST	118
III.1	Pièce à réaliser	118
III.2	Contraintes technologiques	119
III.3	Présentation du dossier	119
III.3.1	Nomenclature de phase	120
III.3.2	Contrats de phase	121
III.3.3	Gamme	124
III.3.4	Isostatismes des différents posages	133

III.3.5 Dessins ou fichiers montage porte-pièces	133
III.3.6 Choix des outils et des conditions de coupe	133
III.3.7 Listes d'outils utilisés par phase	134
III.3.8 Programmes CNC	134
III.3.9 Simulations d'usinages	135

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

1.1 Mise en situation

Le Laboratoire de Recherche en Fabrication Virtuelle (LRFV) est un laboratoire de recherche en usinage haute performance. Le programme de recherche du LRFV vise à développer des modèles prédictifs fins sur les usinages attendus. Le produit final d'un développement de ce genre serait un logiciel de simulation des surfaces usinées tenant en compte (à volonté et selon le besoin) :

- des facteurs géométriques sur la machine-outil ;
- des facteurs géométriques sur la relation entre la pièce et la table et ceux sur la relation entre l'outil et la broche ;
- des facteurs élastiques (quasi-statiques) dans la chaîne mécanique formée allant de la pièce à l'outil en passant par la machine ;
- des facteurs thermiques affectant la pièce à proximité du site de génération du copeau, mais aussi ceux prenant racine aux guidages, aux supports des vis à billes et à l'écrou précontraint ;
- des facteurs dynamiques (inertiels) provenant des mobiles, mais aussi ceux de la chaîne asservie, avec son capteur, sans oublier les effets provoqués par les algorithmes et la subdivision des parcours de l'armoire de commande.

À ces facteurs dits normaux, mais pas toujours désirables du point de vue de l'usinage à produire, s'ajoutent des facteurs parasites devant être évités plutôt que modélisés. Il s'agit des vibrations parasites provenant d'un sous-système de la MOCN

monté sur le même châssis, des vibrations parasites provenant d'une autre machine ou même du trafic routier à l'extérieur, des cycles saisonniers en température ou en humidité relative, des erreurs grossières d'opération, des problèmes relatifs à la surveillance d'usinage ou des dégradations progressives dues au vieillissement.

La prédiction de la surface usinée s'envisage donc avec une finesse variable selon la perspective que l'on adopte. Le plus simple, commercialisé dans des logiciels de FAO comme Vericut, est de prédire la surface usinée dans les conditions nominales du système matière d'oeuvre - montage - machine - outil. Le plus exigeant, et qui n'est pas résolu, serait d'établir cette prédiction en fusionnant les phénomènes géométriques, élastiques, thermiques et dynamiques avec une représentation fine du contact outil-matière, sur une grande surface usinée. Par contre, construire cette représentation n'est pas nécessairement utile.

Des facteurs parasites indésirables, on retiendra qu'ils risquent de fausser les mesures sur lesquelles se basera l'identification des paramètres retenus.

1.2 Problématique générale

L'étude concerne le Laboratoire de recherche en fabrication virtuelle (LRFV) de l'École Polytechnique de Montréal. La problématique générale est l'utilisation d'instruments de mesure à haute résolution et sensibilité dynamique dans un environnement perturbé par des vibrations parasites. Les sources physiques sont multiples, tels l'une ou plusieurs des quatre fraiseuses ou le tour en fonctionnement, la climatisation de la salle d'usinage, les compresseurs de la salle de métrologie.

Les instruments utilisés dans cet environnement pour caractériser les machines, comme les interféromètres laser, les barres à billes, les encodeurs à grille, les accéléromètres, ont une très grande précision. En effet, dans certain cas, nous tentons

de caractériser certaines composantes de machine au nanomètre près. A quel point l'environnement de travail perturbe-t-il ces mesures qui se veulent précises ?

Les équipements qui risquent le plus d'être affectés par des perturbations de type vibratoire sont ceux utilisés dans le cadre de mesure dynamique. En effet, dans des tests de nature statique, une série de données prise sur une période de temps donnée nous permet d'éliminer l'effet des perturbations.

1.2.1 Tests préliminaires

Initialement, ce mémoire devait porter sur l'étude de l'effet des vibrations d'un montage en porte-à-faux sur des lectures d'encodeur à grille, commercialisé par Heidenhain sous le nom de KGM. En effet, une analyse comparative devait être faite entre les lectures d'encodeur à grille, l'analyse modale du montage et des lectures d'accéléromètres.

Cependant, certaines fréquences inattendues ont été détectées suite à des calculs et analyses à la fois par les accéléromètres au repos, en mouvement et par l'encodeur à grille. Ces fréquences se retrouvant dans la gamme de celle des phénomènes que nous voulions observer, elles constituaient de sérieuses perturbations, car elles ne pouvaient être filtrées sans affecter les résultats que nous tentions d'analyser. Et considérant que nous retrouvions la fréquence à la fois dans les lectures d'accéléromètres et dans les lectures de KGM, nous ne pouvions conclure à un artefact de mesure d'un des instruments.

Nous avons tenté de faire une vérification rapide pour déterminer la cause. La vérification a été faite à l'aide d'un programme Labview qui présentait le spectre de puissance d'un échantillon de 10 seconde à 10 kHz. Puisqu'à l'époque, il ne s'agissait que d'un outil de diagnostic, aucun enregistrement a été réalisé.

Nous avons utilisé des accéléromètres de sensibilités différentes à différents endroits dans l'atelier sur une semaine, en défaisant et refaisant le montage plusieurs fois. De plus, nous avons isolé ces accéléromètres dans des boîtes avec styromousse pour éviter le bruit dans l'atelier. Nous avons également fait les mêmes tests dans un bureau sur un autre étage pour vérifier si cela était causé par les accéléromètres.

Nous avons retrouvé une fréquence qui revenait toujours dans l'atelier, mais non dans le bureau. Nous avons tenté de refaire les tests dans l'atelier de la même façon un mois plus tard. La fréquence en question avait disparu.

Par contre, nous ne pouvions ignorer l'effet de l'environnement extérieur et des perturbations possibles. Ainsi, nous avons tenté de déterminer les perturbations possibles de l'atelier et leur mode de diffusion.

1.2.2 Sources de perturbations

Différentes sources de perturbations possibles ont été identifiées. Considérant une machine-outil étant l'objet d'une étude, les perturbations peuvent provenir :

- des autres machines (vibrations de fonctionnement, bruits...);
- de la climatisation;
- de l'éclairage et systèmes électriques;
- des gens présents dans l'atelier;
- de perturbations majeures à l'extérieur de l'atelier (constructions).

Chacune de ces sources peuvent avoir un effet négligeable ou considérable sur leur environnement. Nous tenterons d'identifier celles qui ont le plus d'impact sur les instruments utilisés.

Pour nous situer dans le LRFV, nous pouvons nous référer à la figure 1.1.

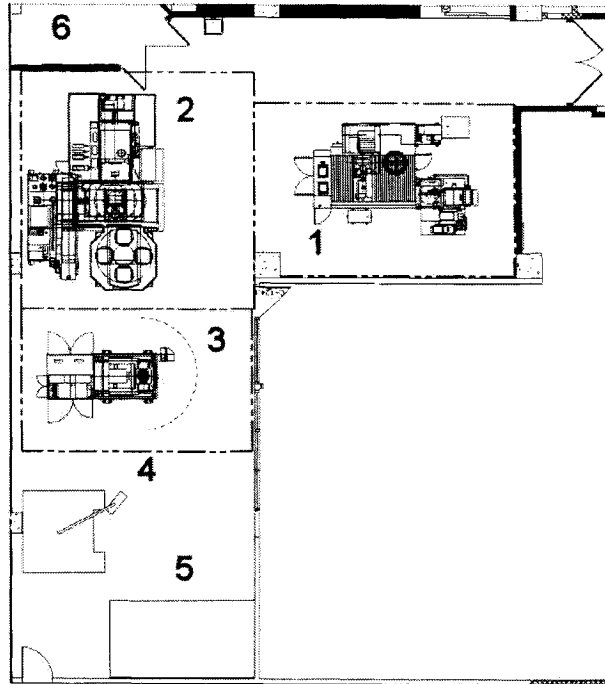


FIG. 1.1 Plan du laboratoire de fabrication virtuelle

numero	
1	MOCN Huron KX-Five
2	MOCN Mitsui-Seiki HU40-T
3	MOCN Mitsui-Seiki VL-30
4	MOCN Matsuura MC760-VX
5	Tour Mazak Nexus 200
6	Salle de climatisation contrôlant les conditions atmosphériques de la salle de métrologie

TAB. 1.1 Légende de la figure 1.1, plan du laboratoire de fabrication virtuelle

1.2.2.1 Autres machines

Le tableau 1.2 présente les systèmes auxiliaires principaux d'une MOCN générateurs potentiels de vibration qui :

- a) produisent des vibrations pendant la formation du copeau
- b) en produisent alors qu'il ne peut y avoir formation du copeau
- c) fonctionnent en tout temps selon les besoins de la machine indépendamment des commandes
- d) sont contrôlables par l'opérateur

Ainsi, il n'est pas possible de trouver une configuration permettant d'isoler tous les systèmes de la MOCN pour caractériser les perturbations engendrées par chaque sous-système.

Système	a)	b)	c)	d)
magasin d'outils		×		×
changeur d'outils		×		×
magasin de palettes		×		×
changeur de palettes		×		×
convoyeur de copeaux	×	×		×
systèmes hydrauliques	×	×	×	
systèmes de refroidissement	×	×	×	
broche	×	×		×
axes de déplacement	×	×		×

TAB. 1.2 Systèmes auxiliaires principaux d'une MOCN

1.2.2.2 Mitsui-seiki HU40-T

Pour illustrer la complexité de cette situation et la difficulté reliée à la caractérisation des perturbations causées par une machine en mouvement, prenons pour exemple la MOCN Mitsui-Seiki HU40-T que possède le LRFV et illustrée à la figure 1.2.

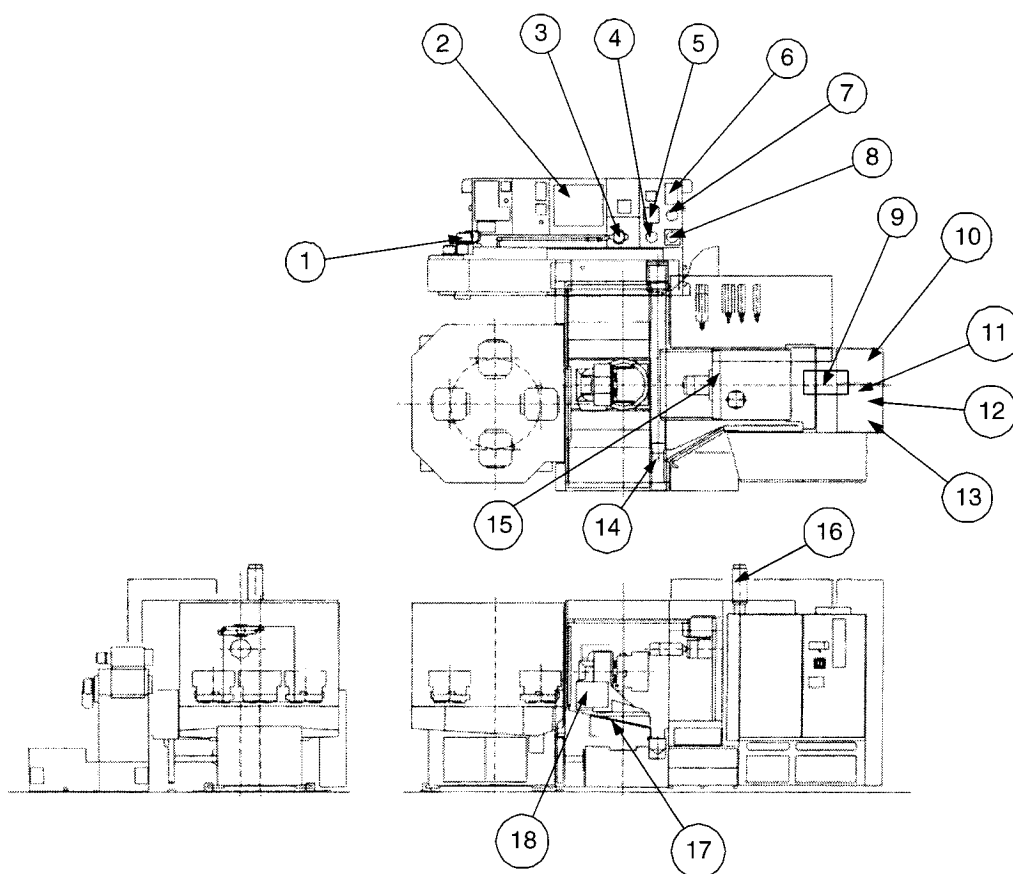


FIG. 1.2 Plan de la MOCN Mitsui-seiki HU40-T

No	Composantes	Dépendant de la commande	Indépendant de la commande
1	Moteurs du convoyeur	×	
2	Régulateur automatique de temp. d'huile		×
3	Moteur de la pompe du filtre du convoyeur		×
4	Pompe de côté du moteur		×
5	Moteur de la pompe du liquide de refroidissement du moteur		×
6	Moteur de l'écumoir de l'huile		×
7	Contrôleur du moteur de la pompe		×
8	Moteur de la pompe de vidange		×
9	Servo-moteur de l'axe Z	×	
10	Moteur de la pompe hydraulique		×
11	Moteur de la pompe de lubrifiant		×
12	Moteur de pulvérisation d'huile		×
13	Moteur pompe air - huile		×
14	Moteur intérieur du convoyeur de copeaux	×	
15	Broche	×	
16	Servo-moteur de l'axe Y	×	
17	Servo-moteur de l'axe B	×	
18	Servo-moteur de l'axe C	×	

TAB. 1.3 Légende de la figure 1.2. composantes de la MOCN Mitsui-seiki HU40-T

Les systèmes principaux de la MOCN sont identifiés sur la figure 1.2 et la légende au tableau 1.3, sauf pour les composantes du changeur de palette. Certains composants comme les moteurs des axes de la machine de même que les moteurs du convoyeur de copeaux sont directement liés aux commandes de l'opérateur et pourraient être facilement identifiés et isolés. Par contre, la plupart de ces systèmes sont des systèmes qui agissent de façon indépendante des commandes et des mouvements de la machine. En effet, les systèmes hydrauliques et de refroidissement fonctionnent au moment où les niveaux d'huile et de température requièrent un ajustement ou en tout temps. Dans les deux cas, il est impossible d'isoler ou d'identifier ces systèmes à l'aide de déplacements ou d'actions demandées à l'armoire de commande.

La complexité d'un tel système rend difficile l'analyse de toutes les sources de perturbations qu'une machine peut créer. Par contre, il est possible de faire l'étude comparative entre l'état de la machine à l'arrêt, l'état de la machine sous tension et l'état de la machine lors d'un déplacement et de l'activité des moteurs connus. En effet, on peut utiliser la MOCN comme générateur de perturbations, pour comparer l'état sans perturbation (machine à l'arrêt) et avec perturbation (machine sous tension ou en mouvement).

1.2.2.3 Climatisation

Pour le LRFV, la climatisation provient de deux sources. Il y a tout d'abord la climatisation centrale qui alimente également les locaux des services informatiques (salles des serveurs) et la bibliothèque. Si elle est une source de vibrations décelables, la faute revient probablement aux conduites et à leur configuration. Ensuite, adjacent au laboratoire d'usinage et à la salle de métrologie du LRFV, on retrouve la salle de climatisation servant au contrôle des conditions atmosphériques de la salle de métrologie. Ainsi, les systèmes de compresseurs sont installés sur une dalle

adjacente aux dalles des machines. De plus, ces systèmes génèrent des ondes sonores audibles.

La difficulté de caractérisation des climatisations est qu'elles sont gérées par des cycles dépendant du besoin de l'environnement et non de cycles que l'on peut prédire à l'avance. De plus, il ne s'agit pas de l'environnement de l'atelier d'usinage du LRFV, mais d'une partie de l'école ou du laboratoire de métrologie.

1.2.2.4 Éclairage et systèmes électriques

L'éclairage dans le laboratoire d'usinage du LRFV est un éclairage standard par tubes fluorescents qui pourrait créer à la fois des perturbations sonores et de vibration. Lors de l'analyse préliminaire des lieux, il a été identifié à l'aide d'un microphone que les boîtes de transformateur électrique des machines créaient des vibrations de 240 Hz. Ainsi, cette source de perturbation est identifiable, mais il est impossible de l'éliminer.

1.2.2.5 Gens présents dans l'atelier

Le LRFV est un laboratoire de recherche où plusieurs personnes travaillent. En effet, techniciens, ingénieurs, étudiants au baccalauréat et aux cycles supérieurs y réalisent des travaux de recherche ou en collaboration avec l'industrie. Ainsi, les activités adjacentes du personnel, telles que l'utilisation de treuils pour transporter des charges lourdes, le déplacement de chariots ou de tout autre équipement dans le laboratoire pourraient créer des perturbations indésirables.

1.2.2.6 Perturbations majeures à l'extérieur de l'atelier

Présentement, le campus de l'Université de Montréal subit plusieurs changements. En effet, nous assistons à un vaste champ de construction avec la réalisation de plusieurs nouveaux pavillons. Lors de constructions, des travaux d'excavation et de dynamitage sont effectués. De plus, le trafic routier de camions lourds est augmenté.

Lors de tests avec interféromètre laser à l'été 2003, il a été possible de réaliser l'impact d'une explosion sur les lectures prises. Si une explosion survenait lors de prise de lectures, il était nécessaire de reprendre la mesure puisque les lectures étaient décalées par rapport à l'origine.

Ainsi, on ne peut négliger totalement les effets de l'environnement extérieur de l'école. Le passage de camions lourds qui fait le déchargement sur le quai près du laboratoire de métrologie et le nouveau laboratoire de structure à proximité du LRFV sont également des sources potentielles de perturbations.

1.2.3 Importance de chaque source de perturbation

Il est à présent important de se demander s'il est important de caractériser chacune des sources de perturbations rencontrée dans le LRFV. Ce qu'il faut tenter de trouver est l'effet de chacune de ces sources de perturbations, pour déterminer une priorité d'action. En effet, si on détermine qu'une cause de perturbation est d'un ordre de grandeur 3 fois plus importante qu'une autre, il vaut mieux s'attarder à la plus importante. C'est pourquoi il serait intéressant de connaître l'ordre de grandeur des perturbations pour ensuite déterminer les plus importantes à traiter et à analyser en profondeur, pour minimiser l'impact général des perturbations dans le laboratoire.

1.2.4 Sources de diffusion

Les perturbations vibratoires peuvent être diffusées de deux façons :

- onde dans le domaine aérien :
- onde dans le domaine solide :

La différence entre les deux se situe au niveau de leur mode de diffusion. Une source de perturbations peut créer les deux types de bruits. Par contre, leur causes et leurs effets ne seront pas les mêmes.

1.2.4.1 Ondes dans l'air

Ces vibrations sont créées par un mouvement d'un corps dans un fluide tel que l'air ou l'eau. Dans le cas qui nous préoccupe, nous travaillons avec des mouvements dans l'air. Dans ce cas-ci, ce sont les ondes qui créent un mouvement cyclique ou vibratoire qui portent à réflexion, tel qu'un outil en rotation ou un débit d'air provenant de la climatisation.

La difficulté des ondes dans l'air est qu'elles se déplacent dans toutes les directions et peuvent être réfléchies ou absorbées (selon le matériau) par les murs, les sols ou toute autre surface. De plus, elles peuvent passer à travers les solides. L'utilisation d'un microphone permet de déterminer des vibrations dans un certain éventail de fréquences audibles. Un anémomètre est utilisé pour caractériser les déplacements d'air importants (ce qui n'est pas applicable ici).

1.2.4.2 Ondes dans les solides

Ces vibrations sont créées par des impacts sur un solide. L'impact peut provenir d'un autre solide ou d'un fluide. En effet, un déplacement d'air important sur une mince tôle d'acier peut créer une vibration dans cette tôle. La méthode habituellement utilisée pour caractériser ces vibrations est l'utilisation d'accéléromètres fixés sur la surface qui subit ou crée les perturbations. En recueillant les données accélérométriques, il est possible de déterminer différents paramètres des vibrations tels que les fréquences contenues dans le signal de même que leur amplitude grâce à un spectre de puissance.

1.2.4.3 Préoccupations

Dans le cas qui nous préoccupe, c'est l'effet sur les solides des perturbations environnantes qui nous intéresse. Les perturbations peuvent provenir des deux types d'ondes. Par contre, il est nécessaire d'identifier l'effet sur des solides uniquement. En effet, le but est de caractériser l'effet des perturbations sur les instruments précis. Ces instruments sont des solides.

Les ondes dans l'air pourraient affecter certains modes de mesures, tels qu'un interféromètre laser lors de mesures dynamiques. Par contre, pour limiter l'étendue du présent travail, la caractérisation des ondes dans l'air est laissée de côté.

1.3 Problématique spécifique

Certaines mesures ont déjà été prises pour tenter de limiter la diffusion des perturbations parasites. L'une d'entre elles est de construire des dalles de béton indé-

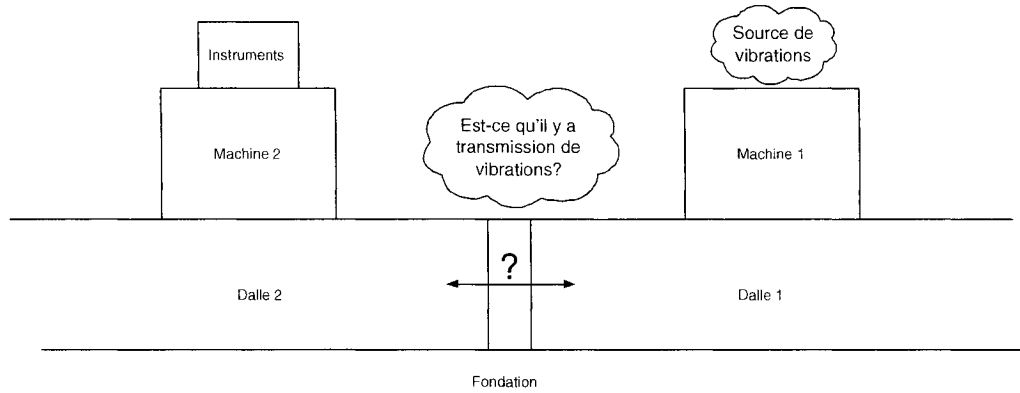


FIG. 1.3 Schéma de la problématique

pendantes pour chaque machine-outil, pour éviter la diffusion des vibrations d'une machine à l'autre. En effet, des dalles de béton de 1 m d'épaisseur dans le cas des dalles des machines 1, 2 et 3 (voir figure 1.1) et de 0.245 m d'épaisseur (10 ") dans le cas des machines 4 et 5 et de la dalle de l'entrée du laboratoire qui reposent sur un lit de gravier. Les dalles sont reliées entre elles par des joints en aluminium. Cependant, certains tests préliminaires faits avec d'autres équipements laissent croire que ce système n'isolait pas les machines de la façon souhaitée, et que certaines perturbations seraient transmises par le sol.

Pour ces raisons, ce travail repose principalement sur l'étude du passage de vibrations d'une dalle à une autre dans le LRFV pour voir s'il y a effectivement diffusion des vibrations, les conséquences de cette transmission, et les précautions nécessaires lors de l'utilisation d'équipements précis. La figure 1.3 représente un schéma simple de la problématique. Ici, le but est de faire une étude préliminaire des conditions rencontrées. En effet, nous voulons déterminer s'il y a des perturbations qui sont transmises. Plus précisément, nous tentons de vérifier si les perturbations de l'environnement affectent réellement les autres équipements et dans quel ordre de grandeur.

1.4 Littérature

Les travaux réalisés concernant notre problématique et nos circonstances particulières sont peu nombreux. Par contre, nous avons trouvé des travaux déjà existants avec un rapprochement, surtout pour aider à valider les méthodes de travail utilisées.

On peut associer l'identification des perturbations de machines-outils pour des dalles de béton aux travaux effectués pour évaluer l'influence des vibrations automobiles sur une structure.

La méthode de travail utilisée dans les travaux de Osama Hunaidi de l'institut de recherche en construction, dans un document publié en 2000¹, inspiré de publications précédentes^{2 3} se rapproche de ce que l'on désire effectuer. L'auteur tente de déterminer l'effet des vibrations causées par la circulation automobile. En effet, ces vibrations représentent un potentiel d'endommager des bâtiments et également créent du mécontentement dans la population. Les caractéristiques des perturbations que l'auteur tente de caractériser sont le niveau de vibration, les fréquences dominantes et les fonctions de transfert.

1.4.1 Sources de perturbations utilisées

Pour répondre à sa problématique, Hunaidi utilise deux moyens de perturbations pour lesquels il prend des données. Tout d'abord, l'auteur utilise la source elle-même de perturbation, soit des véhicules dont la masse et les caractéristiques sont

¹HUNAIID, Osama. «La vibration des bâtiments sous l'effet de la circulation»

²HUNAIID, Osama, TREMBLAY, Martin. «Traffic-induced building vibrations in Montréal»

³AL-HUNAIID, M.O., RAINIER, J.H., TREMBLAY, M. «Control of traffic-induced vibration in buildings using vehicle suspension system»

connues pour simuler certaines situations que l'on peut rencontrer. Par exemple, utiliser un autobus avec les caractéristiques connues auquel on ajoute une certaine masse répartie pour simuler les passagers. Le véhicule circulait dans la rue en face de l'édifice sujet de l'étude. Ensuite, l'auteur utilise un système qui consiste en une masse de 125 kg qui tombe d'une distance d'environ 1.2 m sur une cible instrumentée dont la force maximale générée est d'environ 100 kN. L'auteur considérait que ce système était proche de la force dynamique générée par un autobus qui voyage sur une irrégularité de la route. Ce système était installé dans l'espace de stationnement de l'édifice sujet de l'étude.

1.4.2 Protocole et recommandations

Les principaux éléments du protocole d'expérimentation de Hunaidi sont :

- l'utilisation d'accéléromètres de type Sunstrand Q-Flex ayant une sensibilité de 10 V/g et une réponse en fréquence linéaire dans la plage de 0 à 300 Hz. Ces accéléromètres intègrent continuellement l'accélération si nécessaire ;
- fréquence d'échantillonnage de 500 Hz ;
- le système d'acquisition de données 16 canaux est relié à un ordinateur ;
- pour éviter les fréquences alias, le signal était filtré avec un filtre passe-bas à 125 Hz ;
- les accéléromètres sont installés aux endroits critiques de la structure que l'on tente d'analyser ;
- les accéléromètres sont installés à l'aide d'un ruban adhésif des deux côtés sur des surfaces lisses telles que le bois. Sur des surfaces de béton, les accéléromètres étaient montés sur des petites plaques d'aluminium qui étaient fixées avec de la colle epoxy.

De plus, l'auteur présente certaines précautions à prendre durant la planification et la réalisation de l'expérience :

- il faut placer les accéléromètres à des endroits où il n'y a pas de distorsion sur le plan des vibrations mesurées ;
- l'analyse des données doit se faire selon des modes opératoires établis. En effet, il faut fixer les protocoles et les méthodes d'analyse avant la réalisation des tests ;
- l'appareillage de mesure devrait avoir une résolution et une sensibilité suffisante pour distinguer le signal du bruit ;
- l'instrumentation (accéléromètres principalement) aux endroits critiques que l'on tente de caractériser. Les mesures devraient être réalisées à des endroits où les niveaux de vibration reflètent le but de l'évaluation ;
- le degré de détail de l'analyse des signaux vibratoires dépend de la nature de l'objet de l'étude. Pour une évaluation préliminaire, on peut se contenter de trouver la valeur de crête du signal vibratoire, et de déterminer la fréquence dominante. Pour une analyse plus approfondie, il faut recourir à des méthodes plus poussées, comme l'analyse spectrale.

1.4.3 À retenir

De ces travaux, nous retenons plusieurs éléments au niveau de la source de perturbation, du protocole expérimental ainsi que des recommandations de Hunaidi. Cela se reflète lors de la présentation de la méthode utilisée pour faire face à ce problème à la section suivante.

1.5 Méthode utilisée

La méthode que l'on désire utiliser se rapproche beaucoup de celle utilisée dans les travaux de Humaidi. Pour mesurer les vibrations, la méthode préconisée est donc l'utilisation d'accéléromètres fixés sur des composantes clés à analyser. Ainsi, un système d'accéléromètres - conditionneur de signal - système d'acquisition de données (DAQ) est utilisé, ce qui est très semblable à ce qui a été utilisé dans les travaux de Humaidi, et ce qui est également utilisé dans les cas d'analyse modale d'outils et de composantes mécaniques. Cette méthode nous permet d'obtenir des mesures d'accélération.

Puisque le LRFV utilise la technologie ICP de PCB pour ses accéléromètres et conditionneur de signal, nous adoptons cette technologie, même si la technologie Q-Flex serait plus appropriée pour des tests de nature sismique. Le choix des accéléromètres est discuté plus en détail à la section 3.1.2. De plus, nous utilisons des types de bases fournies par PCB avec leurs accéléromètres. Pour chaque surface étudiée, nous choisissons la base fournie la plus adaptée et nous voulons nous assurer que peu importe le mode de fixation, nous aurons des résultats équivalents.

Ce travail porte sur une analyse préliminaire. Ainsi, les méthodes de bases d'analyse de signaux vont être utilisées. Puisque ce qui nous intéresse est surtout le contenu fréquentiel des résultats obtenus, la méthode d'analyse principale retenue est l'analyse spectrale, ou l'utilisation du spectre de puissance des résultats. Cependant, puisque nous tentons également de voir l'effet direct de ces vibrations sur de possibles instruments, l'amplitude de déplacement due aux vibrations est également étudiée. Également, nous allons utiliser la machine comme élément perturbant lors des tests, de la même façon qu'un autobus avec une masse répartie a été utilisé dans les travaux de Humaidi.

Les tests vont tout d'abord consister à vérifier l'équipement et certaines hypothèses au niveau du mode de fixation. Puis nous allons caractériser l'environnement normal de travail avec les machines sans alimentation électrique, ce que nous appellerons l'*excitation de fond*. Ensuite, nous ferons des tests avec une machine fonctionnant pour voir l'effet de la transmission des vibrations et faire les comparaisons nécessaires.

1.6 Organisation du document

Le chapitre 2 de ce document porte sur les modèles de calculs utilisés et sur les moyens utilisés pour implémenter ces modèles. Le chapitre 3 discute du choix des équipements, logiciel et des conditions d'expérimentation communes pour la réalisation des tests. Le chapitre 4 discute des protocoles expérimentaux des tests préliminaires alors que le chapitre 5 présente le protocole expérimental du test pour tenter de répondre à la problématique. Le chapitre 6 présente les résultats obtenus durant les différents tests. Finalement, le chapitre 7 analyse les résultats et présente certaines recommandations et applications des résultats obtenus.

CHAPITRE 2

MODÈLES DE CALCULS UTILISÉS

Ce chapitre présente les méthodes de calcul utilisées lors de l'analyse des résultats en vibrations. Pour chaque analyse à effectuer, nous allons discuter de la théorie y étant rattachée, des différentes possibilités de traitement numérique et finalement des choix des méthodes de calcul retenues.

Les principaux éléments présentés sont :

- l'analyse des fréquences ;
- l'amplitude de l'accélération ;
- l'amplitude des déplacements dus à ces vibrations ;
- la méthode des tests hiérarchisés dans l'analyse de variance lors d'expériences ;
- les moyens de calculs et la gestion des fichiers.

2.1 Fréquences

Cette section présente la méthode utilisée pour retrouver et comparer les fréquences entre elles, soit le spectre de puissance. Pour calculer le spectre de puissance, nous calculons d'abord la transformée rapide de Fourier¹ dont l'unité est la même que le signal traité (ici, en g). Elle permet de décomposer un signal dans le domaine temporel en un signal dans le domaine fréquentiel, en fonction des fréquences.

¹Fast Fourier transform ou FFT en anglais

La FFT provient de la transformée de Fourier, dont l'équation est :

$$X(f) = F \{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\pi ft} dt, \quad (2.1)$$

où $x(t)$ est le signal dans le domaine temporel, $X(f)$ est la résultat de la FFT et le symbole F est l'opérateur de la fonction de Fourier.

Le résultat d'une FFT est exprimé en fonction des fréquences, allant de -fc à fc (fc pour fréquence de coupure).

La puissance mécanique d'une vibration en g^2/Hz est calculée à l'aide d'un spectre de puissance. L'utilisation d'un spectre de puissance permet de comparer la puissance des amplitudes des diverses fréquences. Nous perdons cependant l'information au sujet de la phase du signal. Le spectre de puissance $S_{xx}(f)$ d'une fonction dans le domaine temporel $x(t)$ est définie par :

$$S_{xx} = X^*(f)X(f), \quad (2.2)$$

où $X^*(f)$ est la conjuguée complexe de $X(f)$.

2.2 Amplitude d'accélération

Dans cette section, nous voulons trouver un moyen de caractériser les amplitudes d'accélération pour nous permettre de comparer nos résultats. Nous allons utiliser une racine des carrés moyens centrés. L'avantage de cette méthode est de nous donner un indice unique pour chaque prise de mesure à caractériser.

2.2.1 Valeur RCM

La racine des carrés moyens² est une donnée statistique de la magnitude d'une quantité qui varie dans le temps. Pour un signal vibratoire, la moyenne ne peut être utilisée puisque sa valeur serait de zéro. Quant aux valeurs crête à crête maximales, elles deviennent trompeuses si une perturbation ponctuelle affecte la mesure.

Pour un fichier de données comportant N valeurs $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$, la valeur RCM (x_{rcm}) se calcule selon :

$$x_{rcm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}}. \quad (2.3)$$

En pratique, la moyenne du signal est préalablement retranchée de chaque lecture pour annuler l'effet de non-stabilisation de certains accéléromètres (surtout pour les tests utilisant des accéléromètres différents). Le calcul s'effectue donc sur les valeurs centrées :

$$x_{rcm \text{ centre}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_N - \bar{x})^2}{N}}. \quad (2.4)$$

Un autre avantage de cette méthode, outre de donner un indice unique pour chaque prise de mesure à caractériser, est qu'elle est facile à utiliser et à implanter.

²La racine des carrés moyens (RCM) est connue sous le nom de *Root Mean Square* (RMS) en anglais.

2.3 Amplitude de déplacement

Dans cette section, nous discuterons du moyen utilisé pour calculer l'amplitude de déplacement à l'aide des signaux d'accélération recueillis. En effet, il est intéressant de connaître l'amplitude de déplacement puisque plusieurs instruments utilisés en laboratoire, comme l'interféromètre laser et la barre à bille, prennent des mesures de déplacement et c'est surtout à ce niveau que l'on peut juger de l'impact réel de ces vibrations sur ces équipements. Prenant des mesures d'accélération, nous devons intégrer ces signaux deux fois pour obtenir la position.

2.3.1 Méthode temporelle

Les formules d'intégration classiques sont :

$$v(t) = v(0) + \int_0^t a(t)dt, \quad (2.5)$$

$$s(t) = s(0) + v(0)t + \int_0^t \int_0^t a(t)d^2t. \quad (2.6)$$

Plusieurs méthodes d'intégration simples à implanter sont disponible. Les équations présentées sont celles de l'implantation, donc ne contiennent pas les facteurs d'erreur.

Celle du trapèze est définie par l'équation suivante :

$$\int_{x_2}^{x_1} f(v)dx \cong (x_2 - x_1) \times \frac{f(x_1) + f(x_2)}{2}. \quad (2.7)$$

Celle de Boole est définie par l'équation suivante :

$$\int_{x_4}^{x_1} f(v)dx \cong (x_4 - x_1) \times \frac{f(x_1) + 3f(x_2) + 3f(x_3) + f(x_4)}{8}. \quad (2.8)$$

La valeur de $v(0)$ est inconnue.

2.3.2 Méthode fréquentielle

Une autre méthode a également été considérée, pour tenter d'éviter le problème des conditions initiales, surtout lors de la deuxième intégrale pour calculer l'accélération à partir de la vitesse. Cette méthode consiste à utiliser la propriété suivante de la transformée de Fourier :

$$\int_t^{-\infty} v(\tau) d^n \tau = \frac{V(\varpi)}{(j\omega)^n} + \pi V(0) \bullet \delta(\omega). \quad (2.9)$$

La méthode utilisée est de calculer la FFT d'un signal, traiter la double intégrale dans le domaine fréquentiel, et de calculer la FFT inverse pour le résultat.

2.3.3 Comparaison des méthodes avec signal théorique

Nous avons fait des tests comparatifs avec les fonctions de trapèze et Boole ³. Les fonctions utilisées sont celles du cours *MTH2210 - Analyse numérique* au baccalauréat à l'École Polytechnique. De plus, nous avons comparé à ces méthodes la fonction de Matlab *cumtrapz*, qui fait le calcul cumulatif de l'intégrale par la méthode du trapèze. Nous avons codé l'intégrale fréquentielle avec Matlab.

³Référence FORTIN, André. *Analyse numérique pour ingénieurs*. Editions de Polytechnique.

Les méthodes ont tout d'abord été testées avec l'intégrale d'une fonction connue, soit $\cos 2\pi t$, ayant comme intégrale analytique $\frac{1}{2\pi} \sin 2\pi$ avec conditions initiales $V(0) = 0$. Nous avons tout d'abord fait l'analyse avec un échantillon de fréquences de 1000 Hz sur 5 secondes. Comme première analyse, nous avons calculé les valeurs RCM centrées de ces quatre fonctions, dont les résultats se retrouvent au tableau 2.1.

Méthode	Valeur RCM centrée de la dérivée du signal
Valeur théorique	0,11253
Trapèze	0,11244
Boole	0,11216
Cumtrapz	0,11253
Fréquentielle	0,12656

TAB. 2.1 Tableau des valeurs RCM prises lors des essais simultanés

Pour une intégrale cumulative, la fonction de Boole est moins précise que celle du trapèze, puisque pour chaque intervalle de calcul, nous devons utiliser 4 points recueillis. Ainsi, la fonction finale contient moins d'information et devient moins précise. Également, la méthode du trapèze cumulative de Matlab est plus précise que celle codée. Les fonctions fournies par les logiciels commerciaux sont optimisées pour être aussi précises que possible même si leurs algorithmes de départ sont simples.

Ainsi, le choix logique pour les méthodes d'intégration dans le domaine temporel est la fonction *cumtrapz* de Matlab. En effet, le problème des valeurs initiales est le même pour chacune des méthodes, alors nous choisissons la méthode la plus robuste pour la suite. De plus, lors de l'utilisation de la fonction test à 10 kHz pour une durée de 10 secondes (l'équivalent des tests), les temps de calcul pour les fonctions codées étaient jusqu'à 100 fois plus longs que pour la fonction *cumtrapz*.

On remarque que, alors que les résultats des RCM des intégrales dans le domaine temporel sont sensiblement les mêmes, l'erreur de l'intégrale fréquentielle est su-

périeure à celle de la fonction trapèze. Si l'on observe la figure 2.1. comparant les résultats théoriques et ceux obtenus avec l'intégrale fréquentielle, on observe ce que l'on découvre à l'équation 2.10.

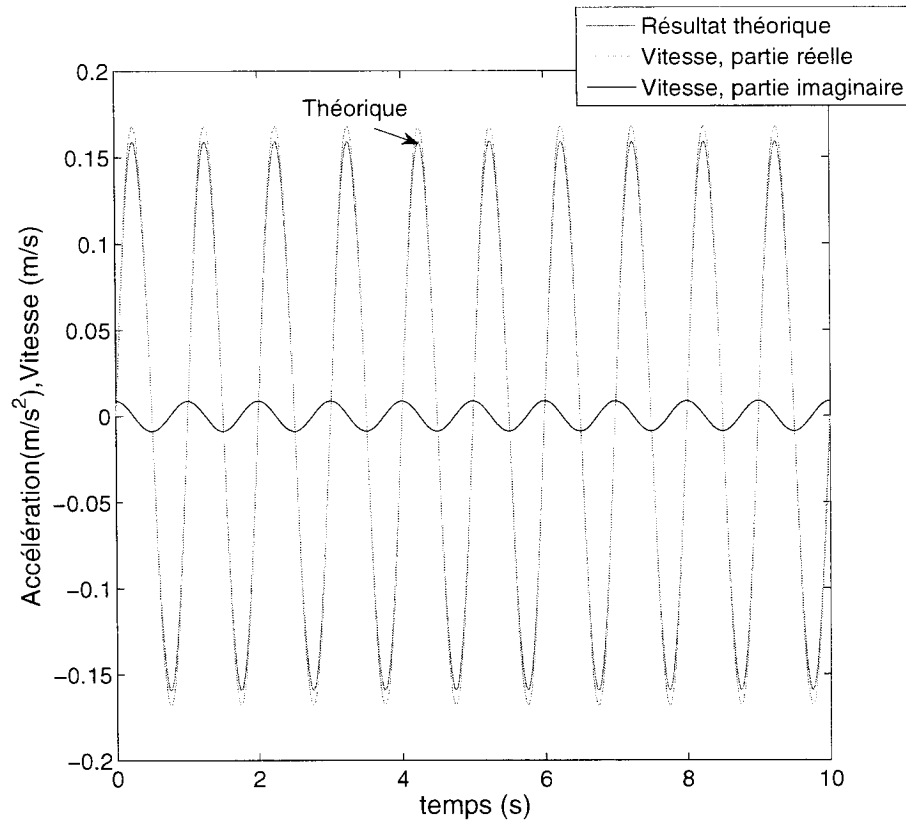


FIG. 2.1 Graphique de calcul d'intégrale avec la méthode fréquentielle

$$A_{max}Reel - A_{max}Imag = A_{max}Theo. \quad (2.10)$$

où $A_{max}Reel$ est l'amplitude maximale de la partie réelle de l'intégrale ;

$A_{max}Imag$ est l'amplitude maximale de la partie imaginaire du signal ;

$A_{max}Theo$ est l'amplitude maximale du signal théorique.

Suite au calcul de l'équation 2.9, nous obtenons une partie imaginaire au résultat lors du passage du domaine fréquentiel au domaine temporel. Cette erreur est due principalement à des erreurs de calculs numériques. Avec un sinus, cette erreur demeure petite et ne nous empêche pas de déterminer l'ordre de grandeur du signal.

2.3.3.1 Introduction d'un bruit aléatoire

Maintenant, comparons les méthodes *cumtrapz* et fréquentielle suite à l'introduction d'un bruit de nature aléatoire. La fonction teste à 10 kHz pour une durée de 10 secondes. Les résultats des RCM centrées se retrouvent au tableau 2.2. La valeur RCM centrée théorique est toujours de 0,11254.

Ratio (bruit/amplitude d'accélération)	0	0,0001	0,001	0,01	0,1
Méthode					
Temporelle	0.11254	0.11253	0.11244	0.11234	0.17593
Fréquentielle	0.11879	0.11879	0.11879	0.11879	0.11879

TAB. 2.2 Tableau des valeurs RCM centrées suite à l'introduction d'un bruit aléatoire

On peut remarquer que l'intégrale fréquentielle n'est pas affectée par un bruit de nature aléatoire alors que l'intégrale temporelle est affectée. En effet, considérant la nature de l'intégrale, l'erreur cumulative s'additionne pour ainsi donner un profil en pente comme illustré à la figure 2.2.

La méthode fréquentielle est la plus robuste face à un bruit aléatoire. Par contre, l'amplitude du signal pour la méthode temporelle est plus précise. Avant de prendre une décision sur la méthode, testons les méthodes avec un fichier de résultats réels.

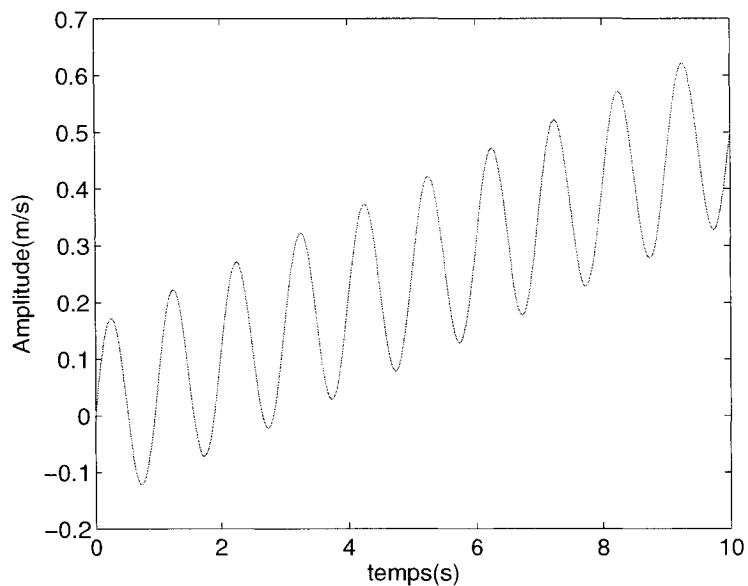


FIG. 2.2 Intégrale temporelle avec une erreur aléatoire d'amplitude 0,1g

2.3.4 Comparaison des méthodes avec signal réel

Puisque la méthode fréquentielle semble être la plus robuste, nous allons analyser son comportement avec un signal réel. Le signal utilisé ici est une lecture prise au sol lorsque les machines sont à l'arrêt, avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz sur une période de 10 secondes. À la figure 2.3, nous retrouvons le résultat de l'intégrale, la partie imaginaire du signal, de même que la lecture de l'accéléromètre, convertie en m/s^2 .

Ainsi, on remarque que l'erreur de l'intégrale (la partie imaginaire) est du même ordre de grandeur que celle du résultat de l'intégrale. De plus, nous ne distinguons pas ce que l'on recherche vraiment, c'est-à-dire l'amplitude des vibrations.

Pour la méthode temporelle, nous obtenons un profil de type rampe que l'on peut distinguer à la figure 2.4.

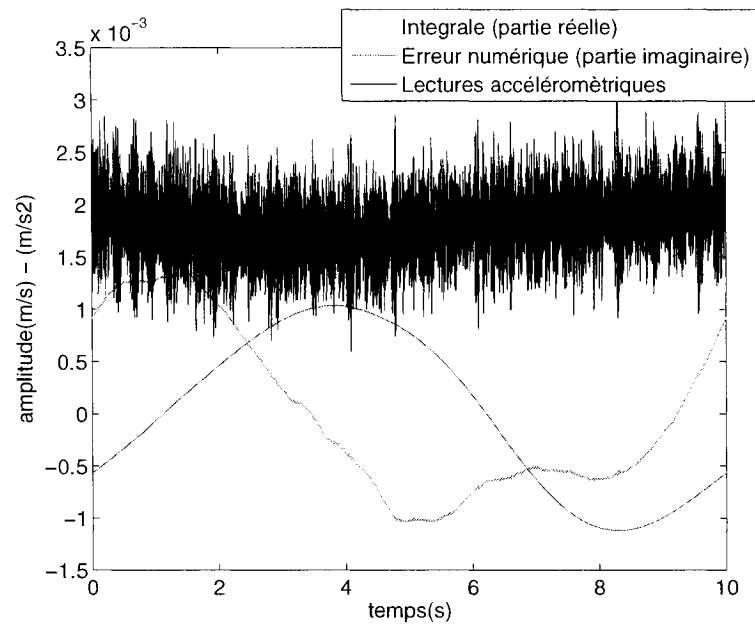


FIG. 2.3 Intégrale fréquentielle avec un signal réel

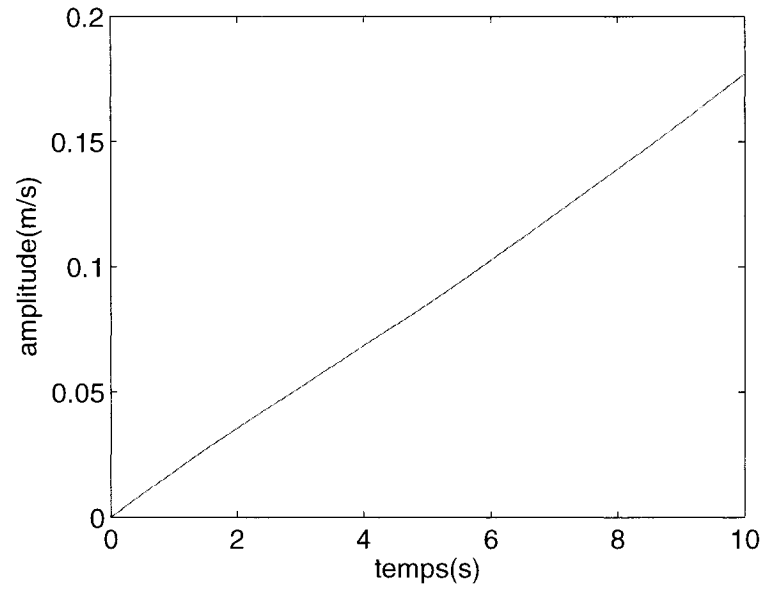


FIG. 2.4 Intégrale temporelle avec un signal réel

Nous tentons d'utiliser un filtre passe-haut Butterworth d'ordre 3 pour ramener la moyenne de la courbe à zéro. Un filtre d'ordre plus élevé donne une réponse divergente. Le résultat est présenté à la figure 2.5. Nous tentons différentes fréquences de coupure pour sélectionner la plus basse possible.

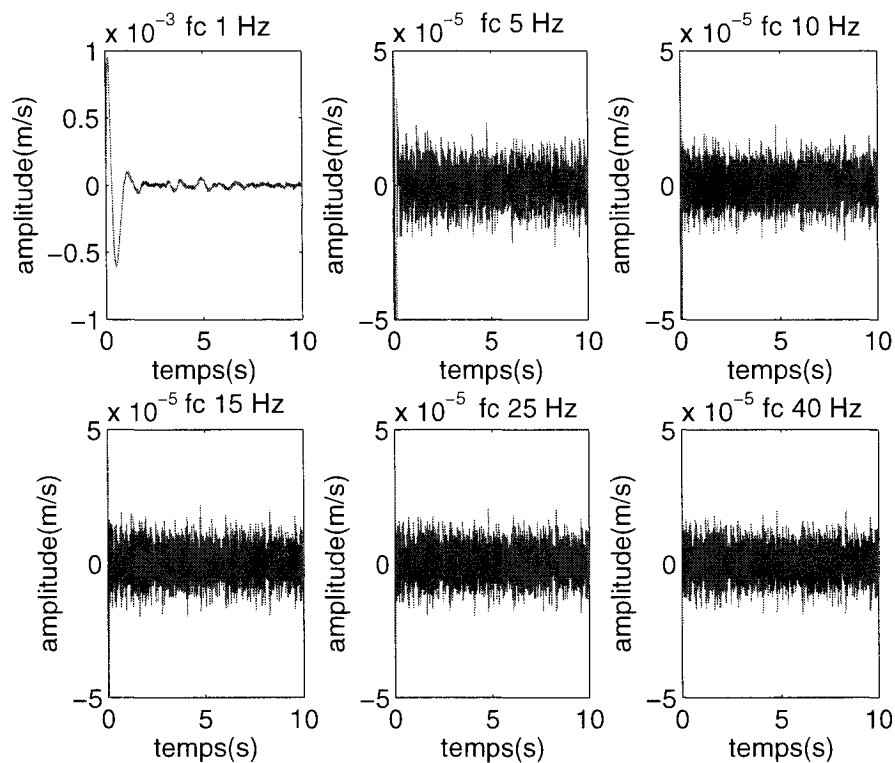


FIG. 2.5 Exemple d'intégrale temporelle avec un signal réel et un filtre passe-haut de Butterworth d'ordre 3

Le filtre de Butterworth est un filtre simple qui est précis en amplitude mais qui déphase le signal. Dans le cas qui nous préoccupe, puisque c'est l'ordre de grandeur qui nous intéresse, nous ne nous soucions pas de ce déphasage. En filtrant à de basse fréquence, nous sacrifions la partie du signal qui se retrouve dans les fréquences en bas de 10 Hz. Par contre, nous pouvons connaître l'ordre de grandeur de l'effet des autres fréquences.

2.3.5 Solution retenue

Dans la présente situation, ce qui nous intéresse ici est plus d'estimer l'ordre de grandeur de l'amplitude du déplacement causé par ces vibrations. Nous désirons ainsi savoir si les vibrations provenant d'une autre machine ont réellement des effets, et leur ordre de grandeur. Les valeurs exactes dépendent de la machine utilisée et du travail effectué.

L'utilisation de l'intégrale en domaine temporel selon l'algorithme du trapèze, avec l'utilisation d'un filtre de Butterworth d'ordre 3 sur les signaux d'entrée est la solution retenue. En effet, il nous est impossible de calculer l'amplitude des vibrations avec la méthode fréquentielle.

2.4 Tests hiérarchisés en analyse de variance

Le modèle de tests hiérarchisés en analyse de variance est présenté. Nous utilisons ce modèle pour l'étude de variance lors de l'étude des différentes bases avec la source étalon afin de vérifier l'hypothèse que les résultats obtenus par chaque type de base sont les mêmes peu importe la base de montage.

Lors d'une expérimentation ayant plusieurs composantes, il est intéressant de connaître l'impact de chaque variance de ces composantes sur la variance totale pour des raisons de répétabilité et de reproductibilité des résultats, de même que pour voir si certains facteurs influencent réellement les données obtenues. Selon le type d'expérience effectué, il faut choisir le bon modèle d'étude pour arriver aux bonnes conclusions. L'analyse de la variance permet d'élaborer des modèles fortement dépendants de la structure expérimentale et de sa séquence ; la validité de la conclusion dépend entièrement du respect de cette interdépendance.

2.4.1 Présentation du test

Le modèle présenté est le suivant :

In certain multifactor experiments the levels of one factor (e.g., factor B) are similar but not identical for different levels of another factor (e.g. A). Such an arrangement is called a nested or hierarchical design, with the levels of factor B nested under the levels of factor A.⁴

Ce modèle est donc utilisé pour une étude où les différents paramètres ne s'influencent pas mutuellement. En effet, pour un design hiérarchisé, (voir figure 2.6), les données de B11 n'ont pas de lien et n'influencent pas les données prises en B21.

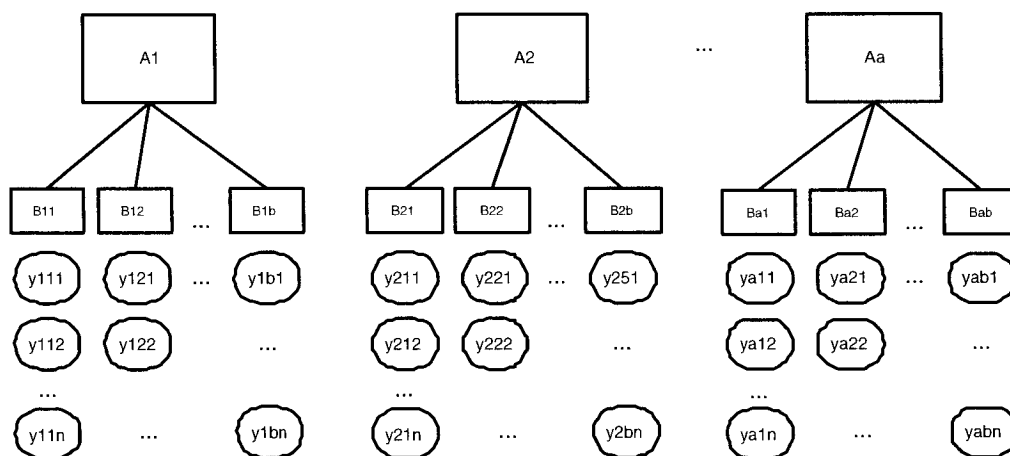


FIG. 2.6 Design hiérarchisé d'expérience

Un exemple de cas est un fabricant de pièces qui achète du matériel brut de 3 fournisseurs, et qui, de chaque fournisseur, achète 3 lots différents. Ce fabricant veut tester la pureté du matériel pour tous les lots. Le premier lot du premier fournisseur n'a aucun lien avec le premier lot du deuxième fournisseur. En effet, il

⁴MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiment*

n'y a aucune interaction entre les lots de fournisseurs différents. La numérotation des lots n'a aucune importance, elle n'est utilisée que pour pouvoir les repérer. On pourrait aussi bien dire que les lots du premier fournisseur sont les lots 1, 2 et 3, ceux du deuxième fournisseur 4, 5 et 6, et ceux du troisième fournisseur 7, 8 et 9.

Si, par contre, chaque lot d'un fournisseur représentait des particularités propres au lot (par exemple, le lot 1 pour tous les fournisseurs doit avoir de telles caractéristiques, le lot 2 telles caractéristiques et ainsi de suite), ainsi, les facteurs de variances seraient croisés et cette méthode ne serait pas applicable.

2.4.2 Modèle mathématique

Pour le modèle linéaire statistique suivant :

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_{j(i)} + \epsilon_{(ij)k} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (2.11)$$

où μ représente la moyenne du processus ;

τ_i représente l'effet sur le modèle du paramètre A ;

$\beta_{j(i)}$ représente l'effet sur le modèle du paramètre B ;

$\epsilon_{(ij)k}$ représente les effets sur le modèle des éléments constants, tels que les instruments de mesure.

Comme indiqué dans la figure 2.6, il y a a éléments du facteur A, b éléments du niveau B dans chaque niveau de A, et n répliques de chacun.

Pour un modèle mixte fixe-aléatoire (A fixe, B aléatoire), voici les équations pour :

- La moyenne prévue des carrés ⁵ de A

$$E(MS_A) = \sigma^2 + n\sigma_B^2 + \frac{bn \sum \tau_i^2}{a-1}. \quad (2.12)$$

- La moyenne prévue des carrés de B dans A

$$E(MS_{A(B)}) = \sigma^2 + n\sigma_B^2. \quad (2.13)$$

- La moyenne prévue des carrés de l'erreur

$$E(MS_e) = \sigma^2. \quad (2.14)$$

Le tableau 6.2 nous présente les différentes composantes des moyennes au carré⁶.

Source de variation	Somme de carrés (SC)	Degrés de liberté (ddl)	Moyenne des carrés
A	$\sum_i \frac{y_{i..}^2}{bn} - \frac{y_{...}^2}{abn}$	$a - 1$	SC_A/ddl_A
B dans A	$\sum_i \sum_j \frac{y_{ij.}^2}{n} - \sum_i \frac{y_{i..}^2}{bn}$	$a(b - 1)$	$SC_{B(A)}/ddl_{B(A)}$
Erreur	$\sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}^2 - \sum_i \sum_j \frac{y_{ij.}^2}{n}$	$ab(n - 1)$	SC_E/ddl_E
Total	$\sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk}^2 - \frac{y_{...}^2}{abn}$	$abn - 1$	

TAB. 2.3 Analyse de variance pour un design hiérarchisé à deux facteurs

⁵Expected mean square en anglais (E(MS))

⁶Mean Square en anglais (MS)

Pour évaluer la valeur des facteurs σ_β^2 et $\sum \tau_i^2$, nous utilisons la distribution F pour vérifier l'hypothèse que ces composantes sont nulles.

En effet, si l'on se rapporte aux équations des moyennes de carrée prévues 2.12.2.13 et 2.14, et à la définition de ce qu'est le facteur F, les rapports des moyennes au carré sont :

$$F_0 = \frac{MS_A}{MS_{B(A)}} \cong \frac{\sigma^2 + n\sigma_\beta^2 + \frac{bn \sum \tau_i^2}{a-1}}{\sigma^2 + n\sigma_\beta^2} \quad (2.15)$$

et

$$F_0 = \frac{MS_{B(A)}}{MS_E} \cong \frac{\sigma^2 + n\sigma_\beta^2}{\sigma^2} \quad (2.16)$$

.

En utilisant le test F, il est possible de vérifier modulo une certaine marge d'erreur si le ratio entre les deux moyennes au carré est 1, donc si les facteurs que l'on recherche ici (σ_β^2 et $\sum \tau_i^2$) sont nuls.

τ_i peut être représenté par

$$\hat{\tau}_i = \bar{y}_{i..} - \bar{y}_{...} \quad (2.17)$$

et σ_β^2 par

$$\hat{\sigma}_\beta^2 = \frac{MS_{B(A)} - MS_E}{n}. \quad (2.18)$$

2.5 Moyen de calculs

Dans cette section, nous présentons l'implémentation de la théorie pour le calcul numérique. De plus, nous présentons la structure et la gestion des données que nous avons développées pour la gestion des fichiers pour le calcul numérique.

Le traitement numérique a été codé et utilisé sous Matlab 6.0, 6.5 et 7.0. Le code Matlab a été réalisé dans le but d'être capable de tracer rapidement des graphiques afin d'accélérer l'analyse des résultats et de minimiser la modification du code une fois fonctionnel.

Il y a quatre principaux développements numériques qui ont été effectués :

- le calcul des fréquences avec le spectre de puissance ;
- le calcul des amplitudes des déplacements, à l'aide de l'intégrale trapèze ;
- le calcul des amplitudes d'accélérations, à l'aide de la RCM centrée ;
- le calcul des facteurs des tests hiérarchisés en analyse de variance.

De plus, pour des raisons de tests, d'autres fonctions ont été codées à fin d'évaluation.

2.5.1 Gestion des fichiers de données

Les fichiers de données sont transformés en fichier *.m (extension Matlab) manuellement, en transformant le fichier d'entrée en une matrice ayant comme nom de variable *pt* pour permettre une interchangeabilité directe, peu importe le fichier de données d'entrée.

De plus, les fichiers sont nommés afin de permettre d'automatiser l'appel de ceux-ci, en tentant d'utiliser des chiffres pour représenter certaines réalités. Par exemple, au lieu de nommer plusieurs emplacements dans les noms de fichiers, nous allons numéroter chacun des emplacements.

2.5.2 Structure générale

Pour chaque développement de calcul numérique, nous avons tenté de garder la même structure quand elle s'applique. Nous fractionnons les calculs à effectuer selon certains types de fichiers.

Quatre types de fichiers sont utilisés (voir figure 2.7) :

- les fonctions de base ;
- les fonctions intermédiaires ;
- les fonctions de traitement ;
- les fichiers script.

Les fichiers des fonctions de bases sont les fichiers contenant les équations théoriques. Elles sont soit codées avec Matlab ou sont des fonctions déjà fournies dans le logiciel Matlab.

Les fonctions intermédiaires sont celles qui utilisent les fonctions de base pour obtenir les résultats des calculs. Dans certains cas, cette fonction trace également les graphiques.

Les fonctions de traitement reçoivent en entrée un nom générique de fichier. Par exemple, si pour un type de test nous voulons comparer différentes répliques entre elles, et que le nom des fichiers pour ce type de test est TestX (X étant la réplique), la fonction reçoit en entrée une variable *chaîne de caractères* contenant 'Test'. La fonction de traitement va se charger d'appeler toutes les répliques, et d'appeler la fonction intermédiaire appropriée pour faire le traitement chaque fois où c'est nécessaire. De plus, cette fonction trace les figures où l'on retrouve plus d'un graphique dans la même figure (*subplot*).

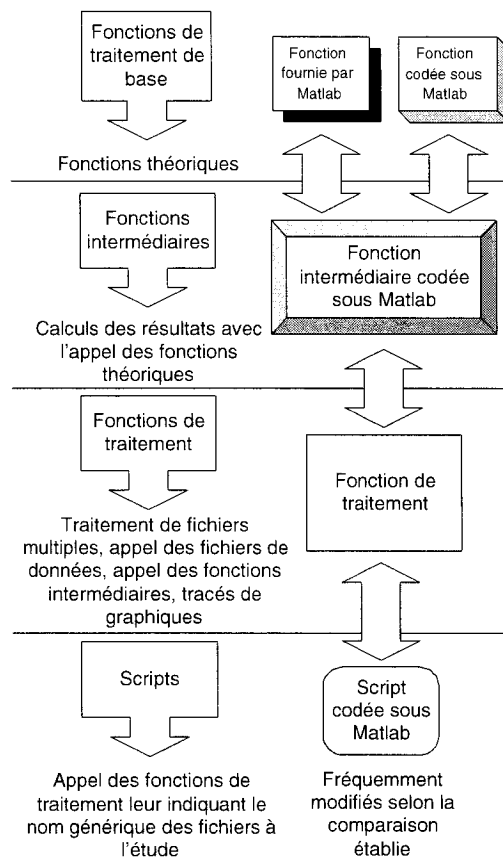


FIG. 2.7 Légende des schemas de structure Matlab

Les fichiers scripts, contrairement aux autres types de fichiers, sont ceux qui subissent le plus de modifications. En effet, une fois que les autres fichiers fonctionnent, ils ne sont plus modifiés. Par contre, les fichiers scripts sont fréquemment modifiés, selon la comparaison que l'on veut effectuer. Ils font appel au fichier de traitement approprié, lui indiquant la variable de type *chaîne de caractères* lui permettant de faire l'appel aux bons fichiers de données. Également, les scripts permettant de faire tracer les graphiques nécessaires à l'analyse sont conservés pour permettre de retracer les graphiques si nécessaire afin de faire des modifications visuelles ou faire des analyses (Zoom, recadrage).

A l'annexe I se retrouve les schémas logiques pour l'organisation des fichiers sous Matlab.

Maintenant que les modèles de calculs ont été choisis et implantés, nous pouvons maintenant recueillir les données qui vont nous permettre d'obtenir des résultats pour faire une analyse et répondre à la problématique.

CHAPITRE 3

CHOIX DES ÉQUIPEMENTS ET CONDITIONS GÉNÉRALES DES TESTS

Une fois les moyens de calculs développés, nous connaissons le type de données nous devons recueillir afin d'obtenir des résultats voulus. Établir un protocole commun d'expérimentation s'impose pour permettre de comparer les résultats obtenus durant chaque test effectué, autant entre les répliques qu'entre les différents tests. En effet, pour pouvoir comparer le plus efficacement possible les résultats, nous tentons d'utiliser le plus possible dans tous les tests les mêmes équipements possédant les mêmes caractéristiques et dans les mêmes conditions de fonctionnement.

Ce chapitre présente les éléments communs utilisés, d'un test à l'autre :

- l'équipement utilisé ;
- les taux et période d'échantillonnage ;
- le logiciel utilisé ;
- la notation utilisée ;

On peut retrouver les équipements précis utilisés à l'annexe II.

3.1 Choix des équipements

Comme indiqué précédemment, les tests consistent principalement à prendre des mesures d'accéléromètre à des endroits appropriés dans certaines conditions. Lorsque on parle d'endroits appropriés, on fait référence à des endroits où les niveaux de vibration reflètent ce que l'on veut déterminer et le but de l'évaluation. Quant aux conditions particulières, nous tentons de faire les tests dans les conditions qui en-

traînent le moins de perturbations extérieures, surtout au niveau de celles que l'on peut contrôler plus facilement comme la circulation de gens dans le laboratoire et les machines en fonctionnement.

Les instruments utilisés sont des accéléromètres, reliés à un conditionneur de signal. lui-même relié à un système d'acquisition de données¹ connecté à un ordinateur. Un logiciel contrôle l'acquisition aux niveaux des taux d'échantillonnage, de la cueillette et de la sauvegarde des données. La liste des équipements utilisés à tous les tests et dont le choix est discuté ici sont :

- les accéléromètres
- le conditionneur de signal
- le système DAQ

3.1.1 Tests préliminaires

Des tests préliminaires nous ont permis de déterminer le meilleur type d'équipement et leurs caractéristiques. On désigne par tests préliminaires une série de tests et de savoir faire qui ont été développés durant une année de tests avec ce type d'équipement :

- tests d'analyse modale avec le logiciel Cutpro ;
 utilisation de conditionneurs de signal individuels pour accéléromètre et marteau ;
- tests de diagnostic présentés à la section 1.2.1 ;
- tests réalisés pour fixer et déterminer les meilleures conditions pour ajuster les protocoles expérimentaux finaux.

¹Data acquisition (DAQ) en anglais

Des tests ont été faits à l'aide d'accéléromètres que le LRFV possède, soit des accéléromètres PCB ayant des sensibilités de 100 à 1000 mV/g. et des plages de lectures de ± 50 g crête à crête. Nous utilisons d'un système DAQ ayant une carte d'acquisition de données 12 bits. Ces tests préliminaires ont été réalisés avec des conditionneurs de signal individuels pour chaque accéléromètre et alimentés par des batteries.

Nous devions utiliser un gain d'au moins 10 au conditionneur pour obtenir des lectures satisfaisantes. Et avec ce gain, il était difficile de distinguer le signal du bruit. De plus, les données d'accélération donnaient des résultats avec seulement 2 ou 3 valeurs qui étaient difficilement intégrables, indiquant que le degré de discrétisation n'était pas assez élevé. De plus, nous obtenions des résultats inégaux dus aux conditionneurs utilisés. En effet, l'alimentation fournie par les batteries n'était pas toujours égale d'un conditionneur à l'autre. Nous en sommes venus à cette conclusion à la suite de tests avec deux accéléromètres à la fois qui lisaient des données semblables. De plus, le gain était difficilement ajustable en n'ayant que 3 options.

Suite à ces tests, nous avons fait les choix d'équipement en considérant l'expérience passée.

3.1.2 Critères de choix

Pour limiter le bruit et avoir une discrétisation à paliers des données, nous allons tenter de choisir un système DAQ plus précis et des accéléromètres mieux adaptés. Il faut rechercher des accéléromètres ayant une étendue de mesure petite (puisque l'amplitude maximale que les accéléromètres doivent lire est de 1g RCM, l'étendue de fréquence de la source de vibration étalon), mais couvrant des fréquences

jusqu'à 500Hz. Par contre, nous avons également des critères d'ordre pratique et économique à respecter, soient la compatibilité et la réutilisation de l'équipement. Le laboratoire utilisant la technologie ICP de la compagnie PCB, nous avons tenté de trouver le meilleur choix d'accéléromètres utilisant cette technologie, pour des raisons de compatibilité et d'utilisation future. De plus, nous voulons pouvoir utiliser ces accéléromètres pour des tests sismiques de basses et hautes fréquences (jusqu'à 10 Hz).

Également, pour éviter la variance due à l'utilisation de conditionneurs de signaux individuels, nous voulons choisir un conditionneur sur lequel nous avons plusieurs entrées et dont la source d'alimentation est la même pour chaque canal. Ainsi, nous éliminons une source de variance, puisque la source d'alimentation à tous les canaux d'acquisition est la même. Également, pour des besoins de compatibilité et de réutilisation de l'équipement, nous voulons utiliser la technologie ICP de PCB.

3.1.3 Choix des équipements

Les choix d'équipement effectués se retrouvent au tableau 3.1.

Équipement	Choix
Accéléromètres	PCB 352B
Conditionneur de signal	ICP 481A03
Système DAQ	Système PXI Carte 24 bits

TAB. 3.1 Résumé des choix d'équipement et de condition d'expérimentation

Les équipements présentés ont la particularité d'être compatibles avec la technologie du LRFV. Le laboratoire possède déjà le conditionneur et le système DAQ.

Les accéléromètres sélectionnés sont les accéléromètres PCB de modèle 352B. Ils ont un bon compromis entre l'étendue de mesure petite (± 5 g crête à crête) et

l'étendue de fréquence (de 2 à 10000 Hz avec une précision à 5%). Ces caractéristiques permettent d'avoir un gain de 1 au conditionneur tout en permettant la réutilisation des accéléromètres dans d'autres tests de nature sismique caractérisant de plus grande fréquences, contrainte lors de l'achat de ces accéléromètres. Pour obtenir des étendues de mesure plus petites, il faudrait utiliser des accéléromètres capacitifs, qui ont une étendue de fréquence autour de 100 à 300Hz.

L'utilisation d'un système avec une carte DAQ 24 bits (de protocole PXI) a permis une meilleure discrétisation du signal au niveau du convertisseur analogique/numérique, et donc d'obtenir un signal plus facilement intégrable.

Le conditionneur de signal choisi répond aux critères de choix présentés. La source d'alimentation est électrique provenant d'une prise de courant conventionnelle. De plus, les gains peuvent être entrés numériquement ce qui assure une plus grande flexibilité, ainsi que plusieurs autres options disponibles contrôlées de façon numérique.

3.2 Taux et période d'échantillonnage

Pour permettre de comparer les résultats entre eux de manière plus simple, les mêmes taux d'échantillonnage ont été pris pour tous les tests effectués :

- 5 kHz
- 10 kHz
- 13 kHz
- 20 kHz
- 50 kHz (facultatif)

Les fréquences que nous tentons de caractériser se situant sous 1 kHz, l'utilisation de la fréquence d'échantillonnage à 5 kHz serait suffisante. Par contre, puisque de nombreux tests précédents avec d'autres appareils (l'encodeur à grille KGM par exemple) ont été faits sur la même machine à une fréquence de 10 kHz, la fréquence de 10 kHz est la fréquence de base pour les tests, c'est-à-dire la fréquence à laquelle les calculs et l'analyse des résultats des calculs sont effectués.

Les tests sont effectués à plusieurs fréquences différentes dans le but de vérifier la présence de fréquences aliases. En effet, une fréquence réellement produite par le phénomène devrait se retrouver dans les prises de mesures à toutes les fréquences. Ainsi, si nécessaire, il est possible d'identifier et d'éliminer les perturbations dues à la fréquence d'échantillonnage. De plus, l'utilisation de fréquences plus élevées nous permet d'utiliser ces données si nécessaire pour l'observation de phénomènes en plus hautes fréquences pour des situations futures.

La période d'échantillonnage se situe entre 5 et 10 secondes, selon les tests effectués. Cette période de temps est suffisante pour obtenir des résultats satisfaisants lors de la réalisation des calculs sur les données. De plus, nous désirons obtenir les effets instantanés et non une moyenne des phénomènes. En effet, ce sont les phénomènes intermittents qui nous intéressent ici.

Pour chaque test, les mesures sont prises 3 fois, pour assurer de la validité des résultats. De plus, toutes les mesures effectuées, à l'exception de l'étude de répétabilité sont prises au moins à deux moments différents, également pour assurer de la validité des résultats.

3.3 Logiciel utilisé

Le logiciel utilisé lors de la prise de données a été codé sous LabView 6.0 dont l'interface se retrouve à la figure 3.1. Le logiciel permet de prendre des acquisitions à une fréquence d'échantillonnage et pour une période définie par l'utilisateur. De plus, nous faisons un affichage en temps réel pour visualiser le contenu des résultats. Également, un déclencheur a été programmé et peut-être utilisé au besoin.

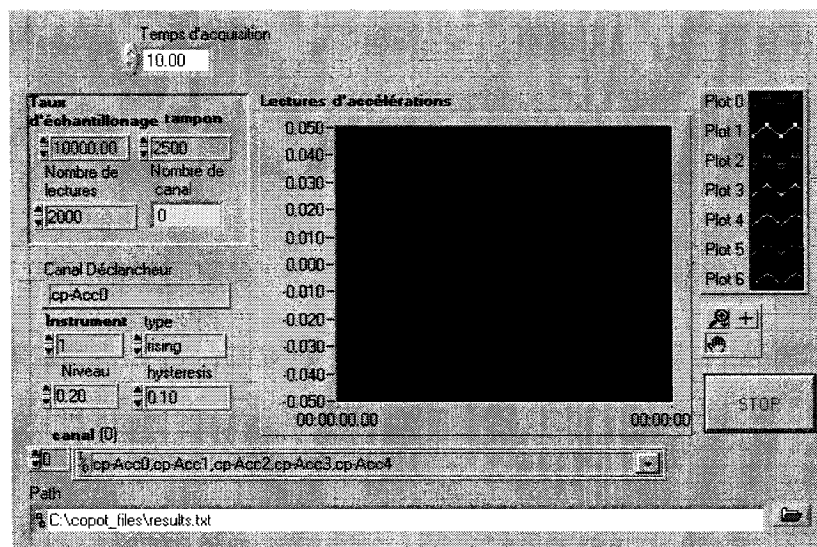


FIG. 3.1 Interface du logiciel Labview

L'accent lors de la programmation a été mis sur l'optimisation du processus de mise en mémoire de données, pour permettre d'avoir, si nécessaire, le taux d'échantillonnage le plus élevé possible. En outre, nous avons utilisé au départ une structure pour l'écriture de données au fur et à mesure dans le fichier de résultats de format *texte*. Nous pouvons utiliser une fréquence d'échantillonnage maximale de 10 kHz. Pour augmenter la fréquence d'échantillonnage possible, nous avons utilisé une structure utilisant un tableau dans la boucle d'acquisition des résultats, qui nous a permis d'utiliser des fréquences d'échantillonnage jusqu'à 50 kHz.

3.4 Notation utilisée

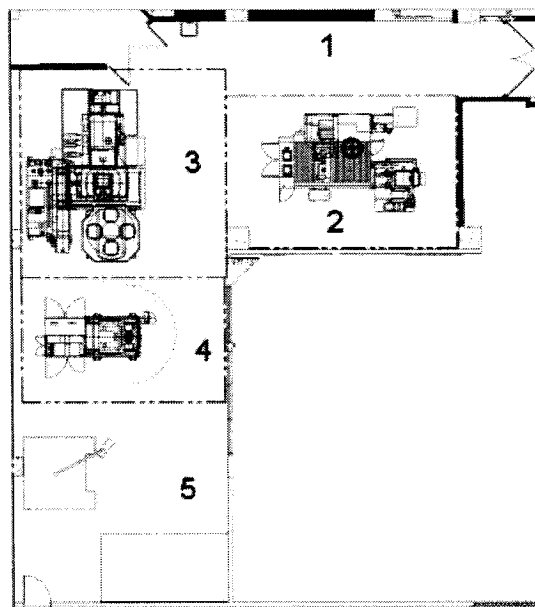


FIG. 3.2 Plan de la disposition des machines du LRFV

La numérotation se fait comme suit (voir figure 3.2) :

1. entrée de l'atelier
2. dalle où repose la MOCN Huron KX-Five
3. dalle où repose la MOCN Mitsui-Seiki HU40-T
4. dalle où repose la MOCN Mitsui-Seiki VL-30
5. dalle où reposent la MOCN Matsuura MC760-VX et le tour Mazak Nexus

200

Ainsi, dans ce document, la dalle 1 réfère à l'entrée de l'atelier, et ainsi de suite.

3.5 Unités des résultats

Les résultats sont obtenus en g , ce qui équivaut à 9.8 m/s^2 .

Lors de la prise des données, un canal virtuel est créé avec l'utilitaire de National Instrument qui permet la conversion directe de V (volts) à g . En effet, il suffit de configurer le canal comme étant un accéléromètre, et d'indiquer la sensibilité de l'accéléromètre ayant été définie lors de son étalonnage.

3.6 Conclusion

Le tableau 3.2 présente un résumé des choix d'équipements et de conditions générales des tests faits à ce chapitre.

Équipement	Choix
Accéléromètres	PCB 352B
Conditionneur de signal	ICP 481A03
Système DAQ	Système PXI Carte 24 bits
Taux d'échantillonnage	5 kHz 10 kHz 13 kHz 20 kHz 50 kHz (facultatif)
Période d'échantillonnage	5 ou 10 secondes
Logiciel DAQ	Maison développé sous Labview
Unités des fichiers résultats	$g \text{ (m/s}^2\text{)}$

TAB. 3.2 Résumé des choix d'équipement et de condition d'expérimentation

Maintenant que les équipements et les éléments communs à chaque protocole d'expérimentation sont définis, nous allons pouvoir établir un protocole spécifique pour chacun des tests que nous devons effectuer.

CHAPITRE 4

VÉRIFICATION DES ACCÉLÉROMÈTRES ET DES MODES DE FIXATION

Avant de réaliser les tests qui vont permettre de répondre à la problématique, qui est de déterminer la transmission des perturbations d'une dalle à l'autre, certaines vérifications doivent être faites au niveau de l'équipement et de l'environnement.

En effet, comme énoncé dans la problématique, nous utilisons différents types de base avec le même modèle d'accéléromètre, et nous allons comparer les résultats obtenus entre eux. Nous voulons vérifier le comportement en fréquence et en amplitude de ces accéléromètres dans deux situations :

- par rapport à une source connue de vibration :
- en prenant des mesures d'accéléromètres simultanément pour un signal d'un ordre de grandeur comparable à celui des tests que nous allons effectuer pour répondre à la problématique.

De plus, nous voulons connaître les perturbations déjà présentes dans l'atelier, lorsqu'il n'y a aucune machine en fonctionnement, que l'on pourrait également appeler excitation de fond.

Les tests permettant de vérifier ces différents éléments sont présentés dans cette section, soit :

- vérification des fréquences avec une source étalon ;
- analyse de l'effet de la variance des différentes composantes de montage sur l'amplitude ;

- vérification simultanée :
 - tests faits avec trois accéléromètres prenant des lectures en même temps, chacun installé grâce à un type de base différent, sur un montage commun.
- tests de l'*excitation de fond* :

Une description sommaire des tests effectués se retrouve dans ce chapitre. Les protocoles précis se retrouvent dans l'annexe II.

4.1 Vérification des fréquences avec une source étalon

Les accéléromètres choisis peuvent être fixés de trois façons différentes :

- avec une base magnétique, faite d'une seule pièce, vendue par PCB ;
- avec un gougeon de montage, directement vissé sur la surface (appelé base vissée dans ce document) ;
- avec une base pour cire de pétrole, vissée à l'aide d'un gougeon de montage sur l'accéléromètre, et fixé sur la surface avec de la cire.

Le choix d'un mode de fixation pour un accéléromètre donné dépend du type de surface sur laquelle on desire le fixer. En effet, il est préférable d'utiliser de la cire sur une surface non magnétique comme le béton, et d'utiliser une base magnétique sur une surface métallique telle qu'une paroi de machine.

Nous voulons vérifier l'effet du type de base sur les fréquences et amplitudes des résultats obtenus. A notre disposition, nous avons une source de vibration étalon de 159Hz à une amplitude de 1 g RCM (1,4142 g).

4.1.1 Description du test

Ce test doit se faire dans un endroit relativement contrôlé au niveau du bruit et de l'activité environnante. C'est pourquoi la salle de métrologie du LRFV de l'École Polytechnique de Montreal (C-124.1) est l'endroit choisi pour réaliser les tests.

Pour s'assurer que la comparaison entre les bases se fasse dans les meilleures conditions possibles, le même accéléromètre est utilisé à chaque fois dans la même série de tests. Seule la base est changée.

Pour être dans les conditions les plus semblables possibles, un socle (voir annexe II) est vissé sur la source étalon de vibration. Ce socle est nécessaire pour éviter d'abîmer la base de la source de vibration avec de la cire de pétrole ou avec l'installation de la base magnétique. Même s'il est possible de fixer la base vissée directement sur la base étalon, ce socle va être également utilisé dans ce cas pour garder les conditions les plus semblables possibles. Un schéma de l'installation se retrouve à la figure 4.1.

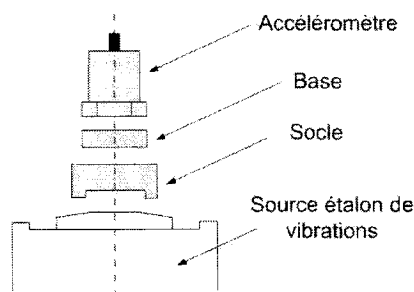


FIG. 4.1 Schéma du montage des accéléromètres sur la source de vibration étalon

Il a été vérifié que l'addition du socle à la masse totale de l'accéléromètre et à sa base de fixation ne dépasse pas la masse que peut supporter la source de vibration qui est de 0,210 kg. Les 3 montages ont tous des masses inférieures à 0,100 kg, ce qui implique une distorsion de l'amplitude de vibration d'au maximum 2%.

Les serrages sont faits de façon manuelle avec une force raisonnable pour une utilisation normale.

Les données d'accélération en g recueillies seront analysées avec un spectre de puissance pour vérifier le contenu fréquentiel.

4.2 Analyse de variance des différentes composantes de montage

Suite à l'analyse des résultats du test précédent, nous tentons maintenant de déterminer qu'il n'y a pas d'impact d'un type de base sur les résultats obtenus au niveau de l'amplitude de l'accélération et tenter de caractériser les causes possibles de variations dans les résultats.

Nous nous retrouvons en présence d'une expérience à deux niveaux hiérarchiques soit :

- A. le type de base utilisée (magnétique, vissée ou pour cire) ;
- B. le montage réalisé par la personne exécutant les tests.

qui peuvent influencer les résultats obtenus avec cette source étalon.

Les éléments constants pour chacun des essais sont :

- la source de vibration étalon ;
- le socle installé sur la source de vibration ;
- l'accéléromètre utilisé.

Les effets de la variance de ce groupe d'éléments sont représentés par le terme $\epsilon_{(ij)k}$ du modèle présenté à l'équation 2.11.

Ici, nous pouvons affirmer que la pause d'une base magnétique et celle d'une base pour cire n'ont aucun lien statistique entre elles. La pause de l'une n'affecte pas la pause de l'autre dans une autre situation. De plus, le choix d'un type de base est absolument exclusif, ce qui veut dire que deux ou plusieurs types de base ne peuvent interagir entre eux lors d'une seule expérience. Ainsi, le phénomène au niveau hiérarchique A est de type fixe.

Par contre, pour le phénomène B, nous assistons à un phénomène aléatoire. En effet, il y a une infinité de possibilités pour la position exacte de la base sur le socle, soit en ayant plus ou moins de cire, en ne positionnant pas la base magnétique exactement au même endroit où en serrant un peu plus la vis de fixation de l'accéléromètre. Nous allons ici faire cette étude avec les valeurs d'accélération recueillies.

4.2.1 Description du test

Pour les raisons énoncées à la section 4.1.1, la salle de métrologie du LRFV est l'endroit choisi pour réaliser les tests. Les mêmes conditions de test (montage, serrage) présentées à la section 4.1.1 sont utilisées.

Pour suivre la méthode des tests hiérarchisés, cinq posages pour chaque base sont effectués. De plus, pour chaque posage, cinq répliques sont mesurées, avec l'arrêt et le redémarrage de la source étalon. Ainsi, la variance des résultats en g (mesure directe d'accéléromètre) du posage des accéléromètres de même que de celle de la source étalon vont être caractérisées statistiquement, pour tenter de d'isoler l'effet de la base sur les mesures. Un schéma de l'expérimentation se retrouve à la figure 4.2.

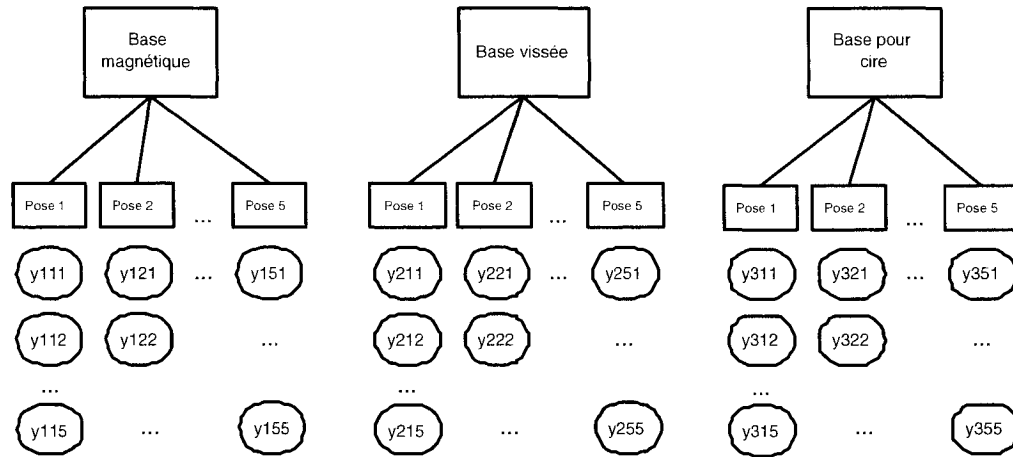


FIG. 4.2 Design hiérarchisé du test

4.3 Vérification simultanée

Ce test consiste à prendre des mesures simultanées avec trois accéléromètres, chacun fixé avec une base de nature différente. Ce test va être représentatif des essais effectués durant les tests en atelier, car ces tests vont consister à prendre des mesures accélérométriques à différents endroits simultanément.

L'ordre de grandeur des données prises à l'aide de la source étalon n'est pas le même que celui des signaux que l'on recueille avec un accéléromètre fixé au sol. Ainsi, ce test va nous permettre d'évaluer le comportement des accéléromètres avec une petite amplitude de vibration. De plus, il n'est pas possible de structurer les essais pour en faire un test hiérarchisé puisque les différentes mesures, prises en même temps, ne sont donc pas indépendantes les unes des autres.

4.3.1 Description du test

Ces tests se réalisent dans l'atelier d'usinage du LRFV. Par contre, l'endroit ici a plus ou moins d'importance puisque nous voulons voir la réaction des 3 accéléromètres de façon simultanée. Puisque ces tests ont été faits dans le cadre de la vérification de l'*excitation de fond* (voir section 4.4), et que les exigences pour ce dernier test sont les plus grandes, nous avons donc opté pour les conditions des tests de l'*excitation de fond*.

Un accéléromètre de contrôle fixé avec cire est installé sur le sol. De cette façon, il est possible de déterminer les effets de la plaque de montage sur les lectures en comparant les données de l'accéléromètre au sol et celles de l'accéléromètre fixé par la même technique sur le montage circulaire.

4.3.2 Montage utilisé

Ce montage doit être utilisé pour permettre d'utiliser 3 accéléromètres fixés avec les 3 bases différentes. En effet, il est impossible de fixer un accéléromètre avec base magnétique et avec vis au sol sans modifier le sol existant. Par contre, c'est à l'endroit où l'on retrouve l'ordre de grandeur des vibrations que l'on tente d'analyser. Ce banc d'essai sera désigné sous le nom de "montage circulaire".

4.3.2.1 Éléments de désign

Le montage utilisé est une plaque circulaire sur laquelle sont fixés les trois accéléromètres. La principale préoccupation lors de la réalisation de ce montage est la symétrie de la plaque par rapport au positionnement des accéléromètres. En effet, cela est nécessaire pour pouvoir garder l'hypothèse que les trois accéléromètres

sont au même point. En effet, gardant la symétrie, on peut émettre l'hypothèse que les modes vibratoires affectant les accéléromètres seront les mêmes. De plus, nous émettons l'hypothèse que les vibrations appliquées sur le montage circulaire sont les mêmes dans toutes les directions.

La distance de la position centrale de chaque accéléromètre par rapport au centre de la plaque est de dix fois inférieure à la distance du centre des appuis au centre de la plaque. Ceci nous permet d'émettre l'hypothèse que les trois accéléromètres sont situés assez près du centre géométrique pour que la contribution éventuelle de la plaque sur le signal soit la même pour les trois accéléromètres.

Puisque nous avons affaire à de petites amplitudes de vibration, et pour éviter l'ajout de modes indésirables, les appuis de la plaque doivent usinés à même celle-ci. Les appuis doivent être suffisamment élevés pour que la montage ne touche au sol en aucun autre point même s'il y a des irrégularités au sol.

4.3.2.2 Réalisation

Le matériau utilisé est l'acier, pour permettre l'adhésion de la base magnétique. La distance entre le positionnement des trous de fixation et du centre de la plaque a été déterminée par la dimension de la base magnétique.

Les dimensions de la plaque ont été sélectionnées dans le but de s'assurer des caractéristiques mentionnées, sans tenter de faire d'optimisation. En effet, puisque seulement un prototype de la plaque est fabriqué, le temps requis pour faire une optimisation n'est pas justifiable.

La plaque doit être déposée sur la surface en béton de l'atelier sur une dalle. La zone de test est située à l'intérieur d'une dalle, en sacrifiant une bordure de 30

cm autour des joints entre les dalles puisque cette partie n'est pas plane. La zone de test, bien que n'étant pas à niveau, possède une planéité acceptable qui nous permet d'utiliser des appuis de 4 mm pour la plaque.

Les détails la fabrication du montage circulaire se retrouvent à l'annexe III.

4.4 Tests de l'*excitation de fond*

Tout d'abord, pour bien connaître l'environnement, il est important de prendre des mesures dans l'environnement de base sans perturbation provenant des machines. En effet, ce sont les conditions typiques que l'on s'attend à retrouver sur toutes les lectures prises dans le laboratoire. Il y a des sources matérielles composant l'excitation de fond qu'il est impossible d'éliminer :

- la climatisation, qui dans cette partie de l'École est une climatisation centrale alimentant également les services informatiques et la bibliothèque ;
- l'éclairage de la salle ;
- les boîtes de transformation électrique ;

En effet, même si ces causes de perturbations pourraient être éliminées (éteindre les lumières, arrêt de la climatisation centrale durant la nuit), dans des conditions normales d'exploitation du laboratoire, ces conditions vont être toujours présentes. C'est ce que nous appellerons ici l'*excitation de fond*.

4.4.1 Description du test

Le test a lieu dans le laboratoire d'usinage du LRFV, au moment où toutes les machines sont à l'arrêt. Il est réalisé en même temps que la vérification simultanée

(section 4.3.1 pour description). Seulement les valeurs de l'accéléromètre au sol sont considérées dans ce test.

Une fois les tests préliminaires effectués, nous pouvons ensuite faire les tests pour répondre à la problématique, à savoir si les vibrations et perturbations des machines se transmettent d'une dalle à l'autre dans l'atelier d'usinage du LRFV.

CHAPITRE 5

TESTS AVEC VIBRATIONS CONTRÔLÉES

Une fois l'équipement vérifié et l'environnement caractérisé et connu, il est possible de faire des tests pour expérimenter la perception de l'influence du travail d'une machine-outil sur une dalle voisine.

Les détails des protocoles expérimentaux se retrouvent à l'annexe II.

5.1 Conditions particulières de tests

Pour faire des tests de l'*excitation de fond*, il est indispensable d'être dans les conditions d'opération normales de l'atelier, mais avec aucune machine en fonctionnement. Ainsi, la difficulté des tests dans ce cas n'est pas liée directement à l'expérimentation en tant que telle, mais bien au niveau des conditions dans lesquelles ces tests doivent être faits compte tenu des ressources financières limitées et du taux d'utilisation du LRFV.

Quant aux autres tests, il doivent être faits dans les conditions d'opération normales du laboratoire, mais avec seulement une machine en fonctionnement, celle dont la propagation des vibrations est étudiée. Cela implique que toutes les autres machines ne sont pas productives et donc que le laboratoire subit une perte de revenu.

5.2 Tests avec vibration contrôlées

Le principe derrière ces tests est de créer une excitation à l'aide de la machine-outil. Pour faciliter la reconnaissance des vibrations, le mouvement de déplacement doit se faire dans l'axe de mesure des accéléromètres, soit dans l'axe Z par rapport au sol (Z étant perpendiculaire à la normale au sol) que nous nommons Z_{sol} . Idéalement, pour éviter des réactions provenant d'autres directions, le déplacement doit se faire seulement dans cette direction. Cette direction est celle pour laquelle nous avons observé les perturbations durant les tests préliminaires.

Pour cette démarche, la machine considérée est la Mitsui-Seiki HU40-T du LRFV de l'École Polytechnique de Montréal. Il s'agit d'une machine 5-axes de configuration ZYFXBC avec broche horizontale.

Les fréquences recherchées se retrouvent entre 20 et 100 Hz. En effet, lors des tests avec l'*excitation de fond*, il a été découvert qu'une fréquence de 100Hz d'une amplitude relative assez importante venait directement des perturbations ambiantes (voir section 6.4 dans résultats). De plus, en bas de 20 Hz, nous risquons de nous retrouver dans la partie constante du signal lors du calcul de la FFT et du spectre de puissance. De plus, avant même de débiter l'analyse des capacités de la machine, il était impensable d'être capable d'atteindre des fréquences de fonctionnement contrôlées au delà de 100Hz.

5.2.1 Valeur de l'avance commandée

Puisque l'on tente d'avoir les valeurs de fréquences les plus élevées possibles, les facteurs limitatifs sont ici la vitesse et l'accélération maximale de l'axe du déplacement effectué de la machine utilisée. En effet, dû à la masse de la machine, ces

paramètres sont limités dans le contrôleur pour des raisons de sécurité et pour prévenir le bris de composantes de la machine.

Supposons un déplacement de nature sinusoïdale :

$$p = A \sin(2\pi Ft); \quad (5.1)$$

$$v = 2A\pi \cos(2\pi Ft); \quad (5.2)$$

$$a = -A(2\pi F)^2 \sin(2\pi Ft). \quad (5.3)$$

Au moment où la vitesse ou l'accélération est maximale (c'est-à-dire lorsque que les fonctions sinus ou cosinus sont égales à 1), si on incorpore les valeurs maximales de vitesse et d'accélération entrées au contrôleur de la machine et résout les équations 5.2 et 5.3 pour la fréquence, alors

$$v_{max} = 16000 \text{ mm/min } (266,67 \text{ mm/s}),$$

$$F = 42,44 \text{ Hz};$$

$$a_{max} = 330 \text{ mm/s}^2,$$

$$F = 2,89 \text{ Hz}.$$

La limitation ici est clairement l'accélération.

Connaissant le facteur limitant comme étant l'accélération, et la fréquence maximale de 2,89 Hz, il est possible de déterminer la vitesse d'avance maximale possible qui est de 18,5 mm/sec pour une amplitude de 1 mm. Ainsi, pour travailler avec différentes vitesses, les vitesses de 18,5 mm/sec (1100 mm/min), 12,5 mm/sec (750 mm/min) et de 6,28 mm/sec (376 mm/min) sont utilisées, ce qui permet de créer des fréquences d'environ 2,9 Hz, 1,99 Hz et 1,00 Hz, si une sinusoïde pure est utilisée pour créer le parcours.

Cependant, ces fréquences ne sont pas du même ordre de grandeur que les 50-100 Hz qui sont nécessaires pour caractériser les comportements voulus. Mais puisque nous voulons créer une excitation par mouvement de la machine, nous allons utiliser ce mouvement à basse fréquence, souhaitant que certains modes de plus haute fréquence soient également excités.

5.2.2 Construction du parcours sur machine

Nous désirons utiliser un moyen de varier la vitesse de manière sinusoïdale en gardant le mouvement dans une seule direction, ce qui demande de changer la vitesse d'avance avec chaque déplacement. De cette façon, nous pourrions définir l'accélération de l'excitation comme étant une seule fréquence sur un spectre de puissance, et ainsi reconnaître plus facilement son influence lors de l'analyse.

5.2.2.1 Méthode Matlab

La première solution envisagée est de créer un sinus théorique, de la fréquence désirée, de déterminer la vitesse d'avance maximale tangentielle, et d'ensuite calculer la vitesse dans le sens du déplacement effectué, pour changer la vitesse d'avance avec chaque déplacement. En pratique, les problèmes suivants sont rencontrés :

- La machine utilisée (dans ce cas-ci, la Mitsui-seiki HU-40) ne prend que deux décimales pour déterminer l'avance (Fxx.xx). Ainsi, il est impossible de générer un sinus assez précis avec si peu de variation entre 2 vitesses.
- Pour se rendre d'un point à l'autre, l'accélération n'est pas continue. La machine va accélérer et décélérer à chaque point, ce qui n'est pas l'effet désiré.

Ainsi, cette solution est impraticable dans la situation actuelle.

5.2.2.2 Axe hypothétique

Il a été tenté de voir si une commande du contrôleur nous permettrait de faire ce travail. Le contrôleur Fanuc 15-im b de Mitsui-seiki offre une commande très intéressante dans cette situation, l'utilisation d'un axe hypothétique (Hypothetical axis) (G07). En effet, il est possible de définir pour usage de calcul un axe qui devient virtuel (aucun déplacement rattaché) mais qui va être utilisé dans les calculs d'interpolation.

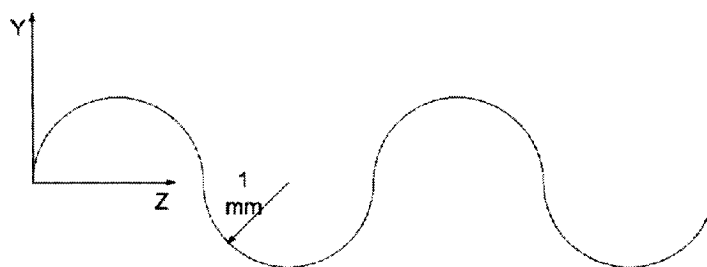


FIG. 5.1 Parcours utilisés

Ainsi, avec une suite de demi-cercles (voir figure 5.1), en G02 et G03, il est possible de faire varier l'avance de l'axe Y de la machine (équivalent à la perpendiculaire au sol que nous appelons ici Z par rapport au sol) en laissant la machine faire les calculs, et en n'ayant que l'axe réel machine Y en mouvement, le Z machine étant immobile, mais utilisé dans les calculs.

Dans le cas qui nous préoccupe, la commande n'est pas disponible sur la HU40-T dont nous disposons. Cependant, pour des tests futurs, cette avenue pourrait être intéressante à explorer.

La Mitsui-Seiki VL30 du laboratoire est équipée de ce contrôleur. Par contre, la masse de cette machine étant beaucoup plus faible, les vibrations obtenues lors d'un déplacement de cette machine sont d'un ordre de grandeur plus faible.

5.2.2.3 Solution retenue

Puisqu'il est impossible de faire varier en même temps l'avance de façon désirée et la position seulement dans un axe de la machine, le choix retenu est d'utiliser des arcs de cercles ce qui limite le nombre de lignes à un minimum dans le programme de la machine. En utilisant un arc de cercle, la vitesse selon les directions Y et Z change, même si la vitesse tangentielle au parcours va rester la même.

L'inconvénient de cette méthode est qu'un arc de cercle ne s'identifie pas par un trait lors d'une FFT. Par contre, puisque plusieurs fréquences sont excitées de cette façon, il est possible de voir de quelle façon chacune d'entre elles est transmise d'une dalle à l'autre.

Maintenant que tous les protocoles expérimentaux sont définis, nous pouvons réaliser les tests et obtenir des résultats pour nous permettre de déterminer la diffusion des perturbations d'une dalle à l'autre.

CHAPITRE 6

RÉSULTATS

6.1 Vérification des fréquences avec une source étalon

Voici les résultats des tests présentés à la partie 4.1. soit de la vérification de la réponse en fréquence grâce à une source étalon.

Tout d'abord, l'utilisation d'une fréquence plus élevée d'échantillonnage ne modifie pas l'amplitude des résultats. En effet, si l'on compare la moyenne des valeurs RCM pour 5 répliques à 3 différentes fréquences d'échantillonnage (résultats au tableau 6.1), l'amplitude lue pour la lecture en g ne diminue pas avec l'augmentation de la fréquence d'échantillonnage. La valeur RCM nominale de la source de vibrations étalon est 1. La base utilisée est la base cirée, et l'accéléromètre n'a pas été déplacé entre les lectures.

Fréquence	5 kHz	10 kHz	13 kHz
Valeur RCM moyenne	0.9942	0.9938	0.9943

TAB. 6.1 Valeur RCM moyenne des lectures d'accélération d'une source de vibrations étalon pour la base cirée

Tous les tests sont analysés selon les lectures faites avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz.

En superposant le spectre de puissance pour les essais avec les différentes bases (24 prises de données au total avec une fréquence d'échantillonnage de 10 kHz et une période de 10 secondes), pour les deux jours de tests, nous obtenons la figure 6.1.

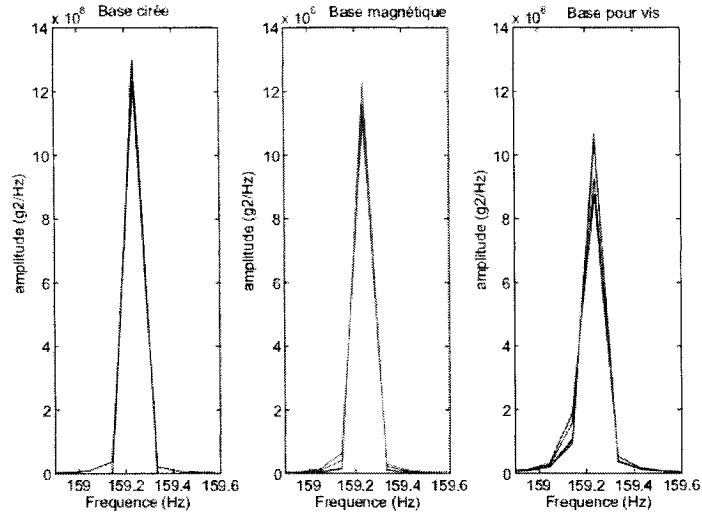


FIG. 6.1 Spectre de puissance de lectures prises avec source de vibrations étalon

Ainsi, nous pouvons affirmer que le système est constant en fréquence. En effet, pour toutes les bases, pour toutes les répliques sur les deux jours, nous obtenons toujours la même fréquence qui est de 159.2 Hz, la fréquence de la source étalon de vibrations.

Au niveau de l'amplitude du spectre de puissance, l'amplitude est plus élevée pour la base pour cire que pour les bases magnétiques et la base pour vis (dans cet ordre). Ainsi, il y a une différence d'amplitude. Il s'agit maintenant d'en déterminer la cause, ce que nous allons tenter de réaliser à la section suivante.

6.2 Analyse de variance des différentes composantes de montage

Voici les résultats des tests présentés dans la partie 4.2, soit de l'analyse de variance des différentes composantes de montage utilisées lors des tests.

Avant d'effectuer les calculs présentés à la section 2.4, nous avons tout d'abord trouvé la valeur RCM (voir equation 2.3) et utilisons comme valeurs $1-x_{rmc}$ puisque la valeur de la source étalon est de 1 RCM. Ainsi, nous tentons de déterminer l'écart entre les résultats obtenus et la valeur théorique.

Source de variation	Somme de carrés (SC)	Degrés de liberté (ddl)	Moyenne des carrés	F0
A	$1,54 * 10^{-4}$	2	$7,69 * 10^{-5}$	0,91
B dans A	$1,00 * 10^{-3}$	12	$8,42 * 10^{-5}$	12,66
Erreur	$3,99 * 10^{-4}$	60	$6,65 * 10^{-6}$	
Total	$1,60 * 10^{-3}$	74		

TAB. 6.2 Analyse de variance pour un design hiérarchisé à deux facteurs

Pour une distribution $F(2,12)$ à 25 pourcent, les valeurs limites sont 0,64 à 1,56. La valeur du facteur F pour A de 0,91 se retrouve dans cet intervalle. Pour une distribution $F(12,60)$ à 1 pourcent, les valeurs limites sont 0,40 à 2,50. La valeur du facteur F pour B dans A de 12,66 est en dehors de cet intervalle de façon très significative.

Ainsi, on peut affirmer que $\sum \tau_i^2$ est égal à zéro, mais que $\hat{\sigma}_B^2$ ne l'est pas. Ainsi, si on se réfère à l'équation 2.18, n étant égal à 3, on peut approximer la valeur de σ_B^2 par $2,59 * 10^{-5}$. Considérant la variance du procédé approximée par la moyenne des somme de carrés des erreurs comme indiqué dans l'équation 2.14, qui est de $6,65 * 10^{-6}$, la variance du procédé B est environ 4 fois (3,89 fois exactement) plus grande que la variance totale du phénomène.

Des résultats obtenus, on peut affirmer que c'est le posage qui cause la plus grande variance des résultats obtenus pour l'amplitude des signaux recueillis. Pour sa part, l'effet du type de base est statistiquement nulle.

De plus, si on caractérise la répétabilité de cette expérience, on ne peut pas affirmer qu'elle se situe dans l'écart $\pm 2\sigma$, mais plutôt dans l'écart $\pm 2\sqrt{\sigma^2 + \sigma_\beta^2}$, car on ne peut pas négliger l'effet de σ_β^2 . Puisque σ_β^2 est approximativement 4 fois plus importante que σ^2 , on peut dire que les résultats sont répétables dans un écart de $\pm 2\sqrt{5}\sigma$, ou $\pm 2\sqrt{5}\sigma$.

6.3 Vérification simultanée

Voici les résultats des tests présentés à la partie 4.3 où l'on compare la réponse de trois accéléromètres installés sur un montage circulaire.

Tout d'abord, présentons les valeurs RCM des résultats obtenues durant ces tests. Pour chacune des valeurs, nous avons calculé la moyenne des trois répliques.

	jour 1			jour 2		
Base	Vissée	Magnétique	Cirée	Vissée	Magnétique	Cirée
	$10^{-4}g$			$10^{-4}g$		
Dalle 1	4.789	4.612	4.859	2.400	2.439	2.428
Dalle 2	1.929	2.000	2.038	1.774	1.820	1.838
Dalle 3	3.500	3.555	3.583	3.546	3.548	3.546
Dalle 4	1.617	1.674	1.697	1.429	1.475	1.461
Dalle 5	1.206	1.255	1.245	1.094	1.109	1.182

TAB. 6.3 Tableau des valeurs RCM prises lors des essais simultanés

On peut remarquer que les valeurs pour chaque test sont constantes et qu'il n'y a pas de différence significative entre les valeurs prises simultanément. D'ailleurs, si on observe les valeurs d'une réplique typique (fait sur la dalle 2 la première journée (figure 6.2)) quant à l'amplitude de déplacement, on peut voir que l'amplitude de déplacement est la même pour les trois accéléromètres sur le montage circulaire, ce qui confirme les résultats que l'on retrouve dans le tableau 6.3. Le comportement est similaire pour les autres répliques.

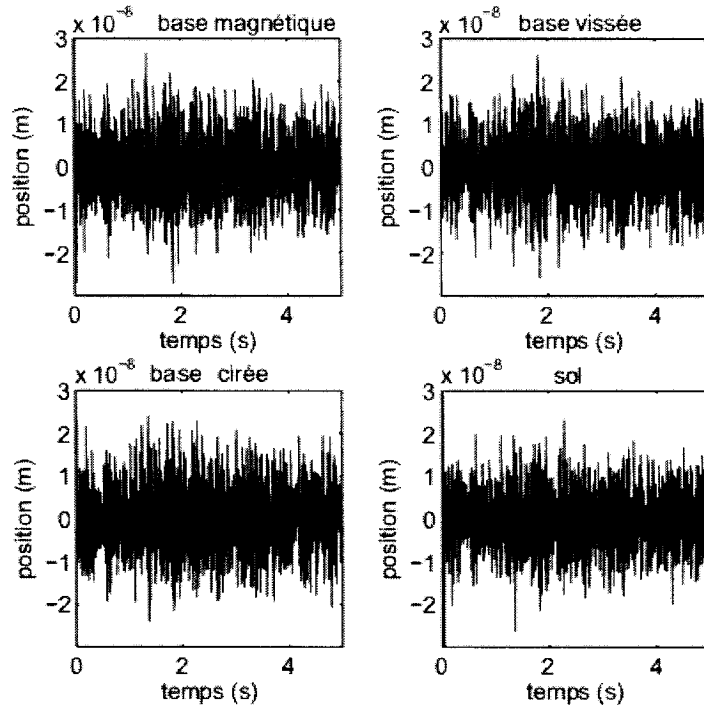


FIG. 6.2 Graphique de l'amplitude de déplacement

Le contenu fréquentiel des résultats est présenté aux figures 6.3 et 6.4. Les spectres de puissance ont été calculés sur les mêmes données utilisées pour la figure 6.2.

À la figure 6.3, nous pouvons remarquer que le groupe de fréquences de 1800 Hz se retrouve dans toutes les lectures des accéléromètres fixés sur le montage circulaire et non sur celles de l'accéléromètre au sol. Nous en déduisons que ces fréquences sont des fréquences propres du montage circulaire. Par contre, ces fréquences n'étant pas dans la plage de mesure qui nous intéresse (de 0 à 500 Hz), elles n'affectent pas les résultats et l'utilisation de filtres n'est pas nécessaire pour continuer l'analyse.

De plus, en observant la zone entre 60 et 130 Hz de façon plus attentive à la figure 6.4, nous pouvons remarquer que le comportement fréquentiel des données des 4

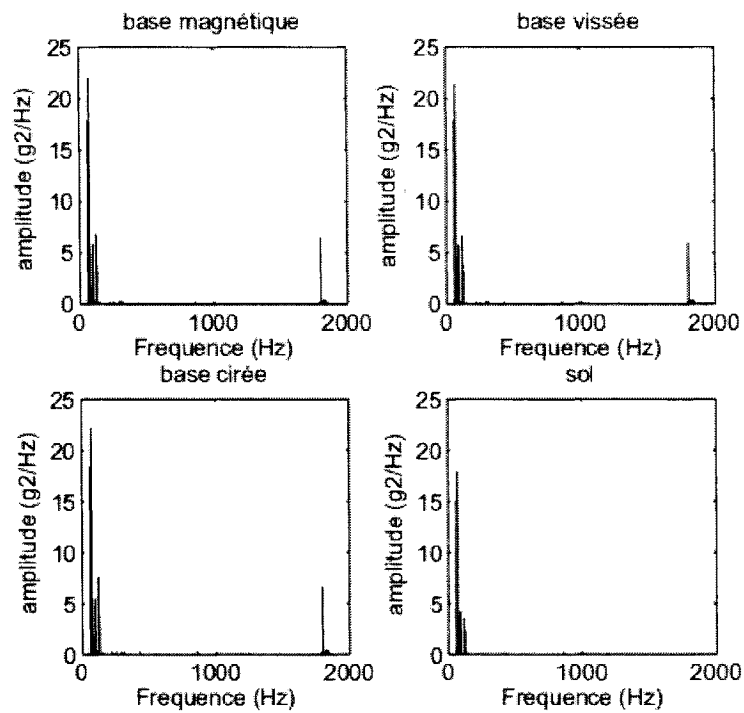


FIG. 6.3 Spectre de puissance

accéléromètres est le même. Ce qui vient confirmer le résultat avec la source de vibration pour le comportement en fréquence des accéléromètres. En effet, peu importe l'accéléromètre et la base utilisée, la réponse en fréquence est la même et ce, peu importe l'ordre de grandeur de l'amplitude des signaux.

6.4 Comparaison entre les différents emplacements dans le laboratoire

Voici les résultats des tests présentés à la partie 4.4, où l'on compare la réponse d'accéléromètres à différents endroits dans le laboratoire.

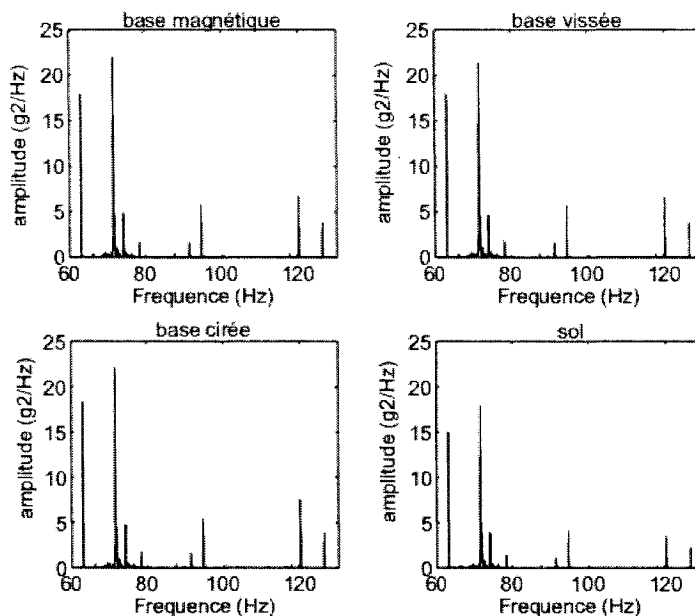


FIG. 6.4 Spectre de puissance entre 0 et 130 Hz

Les tests n'ont pas été faits sur les cinq dalles simultanément, pour une raison d'équipement car l'utilisation de fils plus longs entre l'accéléromètre et le conditionneur de signal aurait causé des parasites importants au niveau des lectures.

Nous présentons les résultats d'une seule réplique. Cependant, les résultats observés comparant les répliques entre elles sont dans le même ordre de grandeur et avec le même comportement.

6.4.1 Amplitude des vibrations

Nous voulons vérifier l'amplitude de vibration directement, en calculant la moyenne des RCM des répliques des données recueillies en g pour la fréquence d'échantillonnage de 10 kHz. Les résultats se retrouvent dans le tableau 6.4. La distance est

la distance entre la porte de la salle de climatisation de la salle de métrologie et l'endroit où les tests ont été effectués sur la dalle.

Dalle	Jour 1 (g)	Jour 2 (g)	Distance (m)
1	0,00195	0,00158	5
2	0,00187	0,00157	4,5
3	0,00192	0,00159	3
4	0,00158	0,00155	9
5	0,00158	0,00157	13

TAB. 6.4 Valeur moyenne RCM d'accélération lors du test de l'*excitation de fond*

La figure 6.5 représente une réplique des résultats du spectre de puissance entre 0 et 300 Hz pour chaque dalle prise lors de la deuxième journée de test, celle où les amplitudes RCM sont semblables.

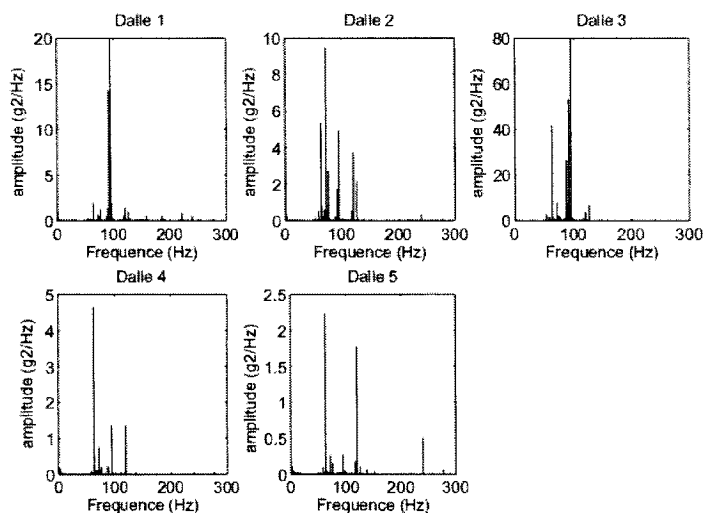


FIG. 6.5 Spectre de puissance des 5 dalles lors des tests de l'*excitation de fond*

Pour observer l'effet en amplitude de déplacement en mètres, considérons le pire des cas, soit les résultats du premier jour, que l'on peut observer à la figure 6.6.

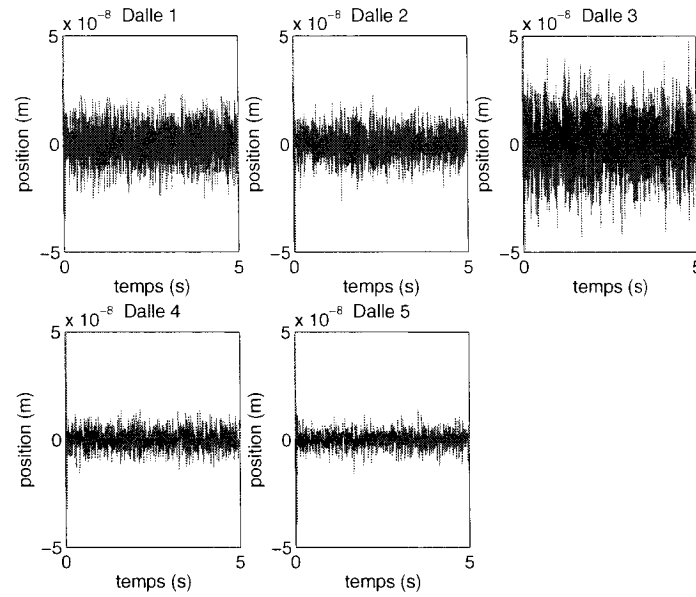


FIG. 6.6 Déplacement au sol pour chaque dalle

L'amplitude de déplacement atteint 4×10^{-8} mètre (40 nanomètres) comme déplacement maximum dans le pire des cas.

On peut remarquer que :

- Au jour 1, les amplitudes de déplacement semblent inversement proportionnelles à la distance de la salle de climatisation de la salle de métrologie (voir figure 6.7) ;
- Au jour 2, les amplitudes de déplacement semblent semblables sur toutes les dalles ;
- Pour les deux jours, l'amplitude du contenu fréquentiel semble inversement proportionnelle à la distance de la salle de climatisation de la salle de métrologie.

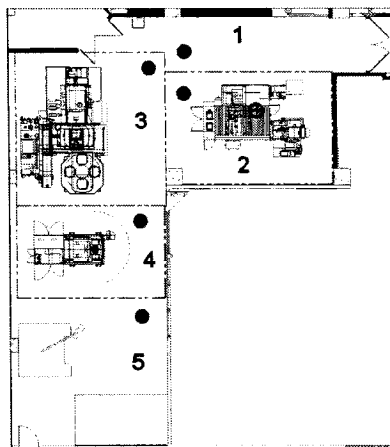


FIG. 6.7 Position de prises de mesure lors des tests simultanés

À première vue, on serait tenté d'affirmer que l'amplitude de déplacement est proportionnelle à la distance de l'accéléromètre à la salle de climatisation. Par contre, les résultats du jour 2 contredisent cette affirmation. Par contre, l'amplitude du contenu fréquentiel est inversement proportionnelle à la distance. En effet, même avec une amplitude de déplacement semblable, le contenu fréquentiel est différent.

Deux facteurs pourraient expliquer les résultats de la première journée. Soit la climatisation ambiante était plus active durant les lectures sur les 3 premières dalles ou bien la salle de climatisation était plus active à ce moment (et inactive la deuxième journée). Cependant, nous pouvons observer que nous avons des phénomènes intermittents dans le laboratoire, et qu'au pire des cas, une variation d'amplitude d'environ 10% à 15% à cet ordre de grandeur peut être expliquée par la variation de l'environnement. Ceci est une cause possible de l'instabilité en amplitude des résultats.

6.4.2 Fréquences

Les quatre fréquences dominantes sont 63,71 ; 71,67 ; 94,71 et 120 Hz. Les fréquences de 72 et 95 Hz sont dominantes pour les données prises plus près de la salle de métrologie et de climatisation, alors que les fréquences de 64 et 120 Hz dominent pour les données prises plus près du fond de l'atelier. Par contre, l'amplitude des fréquences de 64 et 120 Hz est plus faible. Ainsi, selon de l'endroit positionné dans l'atelier, les fréquences qui risquent le plus d'être perturbatrices changent.

Également, dû à l'importante amplitude de la fréquence de 95 Hz pour la dalle 3, et cela durant les 2 jours, on peut affirmer que cette perturbation provient d'un endroit environnant, probablement de la salle de climatisation puisque la distance entre l'endroit du test et la salle de climatisation est inversement proportionnelle à l'amplitude de la fréquence.

6.5 Tests avec vibrations contrôlées

Voici les résultats des tests présentés au chapitre 5. La notation utilisée pour numéroter les accéléromètres est la suivante :

1. Entrée du laboratoire
2. Dalle de la Huron KX-five
3. Dalle de la Mitsui-Seiki HU40-T
4. Tole de la machine Mitsui-Seiki HU40-T
5. Broche de la machine Mitsui-Seiki HU40-T

Pour plus de détails sur l'emplacement des accéléromètres, voir annexe II section II.5.

	Machine arrêt	377 mm/min	750 mm/min	1100 mm/min
Position	$10^{-4}g$			
1	2.945	4.023	3.441	4.907
2	2.232	3.929	2.662	3.741
3	5.224	5.917	6.173	8.845
4	16.293	17.447	17.346	17.992
5	22.168	31.188	35.316	47.682

TAB. 6.5 Tableau des valeurs RCM prises lors des vibrations contrôlées

La figure 6.8 compare le comportement obtenu sur la dalle 2 pour chaque essai.

Les figures 6.9 ; 6.10 ; et 6.11 représentent l'amplitude de déplacement de différents tests.

Pour qu'une perturbation soit transmise d'une dalle à une autre, elle doit d'abord être transmise à la dalle émettrice. En observant la figure 6.8, nous remarquons une augmentation de l'amplitude des fréquences supplémentaires avec l'augmentation de l'avance. En effet, pour la plus faible avance, la différence est imperceptible alors que pour l'avance de 1100 mm/min, on voit très clairement l'augmentation des fréquences supplémentaires. D'ailleurs, on peut observer le même phénomène pour l'amplitude de déplacement, au figure 6.9 ; 6.10 ; et 6.11.

Une fois la perturbation transmise à la dalle, voyons si cette perturbation se transmet aux dalles voisines. Pour ce faire, comparons les résultats obtenus avec la machine à l'arrêt et la machine ayant un déplacement de 1100mm/min. Les valeurs d'amplitude de déplacement passent de 50 à 150 nanomètres sur la dalle 3, et de 25 à 50 nanomètres sur la dalle 1 et 2. De plus, en observant les valeurs du tableau 6.5, on peut remarquer une amplitude plus grande au niveau de la valeur RCM de la lecture d'accéléromètre du test avec la troisième avance par rapport à la valeur RCM de la machine à l'arrêt.

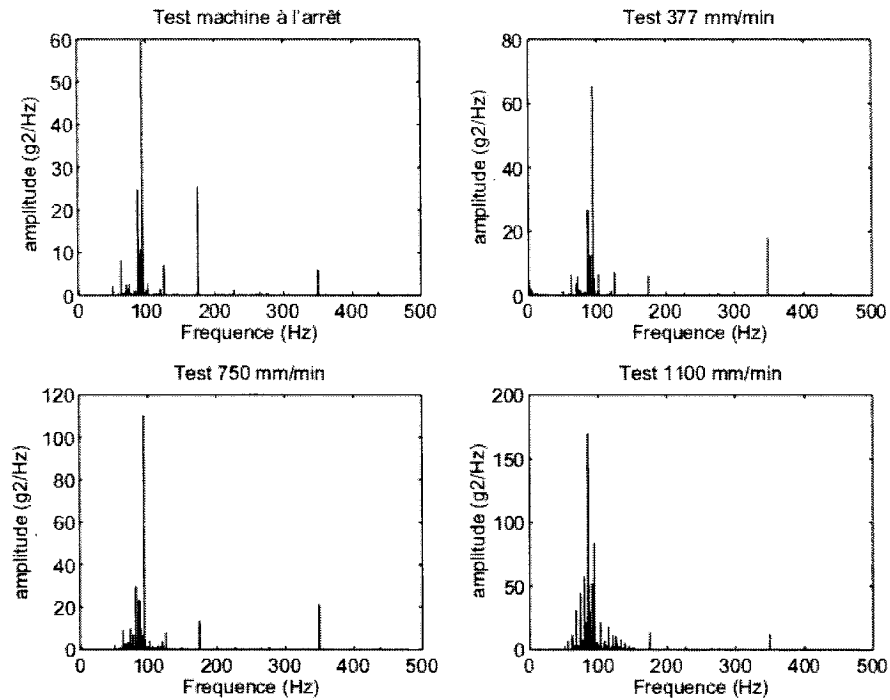


FIG. 6.8 Comparaison des spectres de puissance des résultats de la dalle 2

Pour confirmer cette transmission, on peut observer les spectres de puissance des données prises lorsque la machine est à l'arrêt (figure 6.12) et avec l'avance la plus élevée (figure 6.13).

On peut remarquer l'apparition de plusieurs pics de fréquences pour les dalles 1, 2 et 3 à la figure 6.13 que l'on ne retrouve pas lorsque la machine est à l'arrêt. Les fréquences de 73,7 et de 85,4 sont transmises aux dalles 1 et 2. Ces vibrations ne font pas partie du contenu fréquentiel lorsque la machine est à l'arrêt.

Ainsi, on peut conclure qu'un transfert de perturbations peut se faire d'une dalle à l'autre. Par contre, ce n'est pas tout travail effectué qui va créer une perturbation sur la dalle de travail, pour être ensuite transmise sur les dalles environnantes.

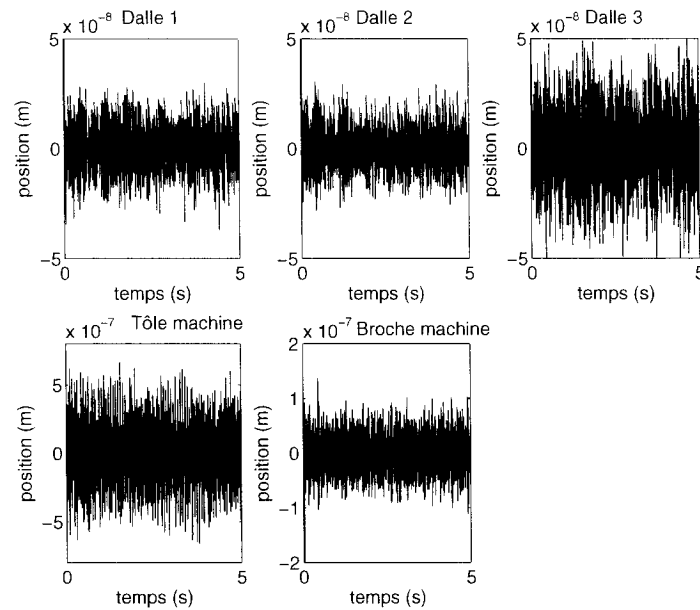


FIG. 6.9 Exemple de l'amplitude de déplacement pour une réplique lors des tests avec machine à l'arrêt

Également, la transmission observée est une transmission de surface. En effet, nous obtenons la même amplitude de déplacement pour les dalles 1 et 2, alors que les deux dalles ont des masses et dimensions très différentes.

Maintenant que les résultats ont été obtenus, nous pouvons maintenant en faire une analyse et en tirer des conclusions et des recommandations.

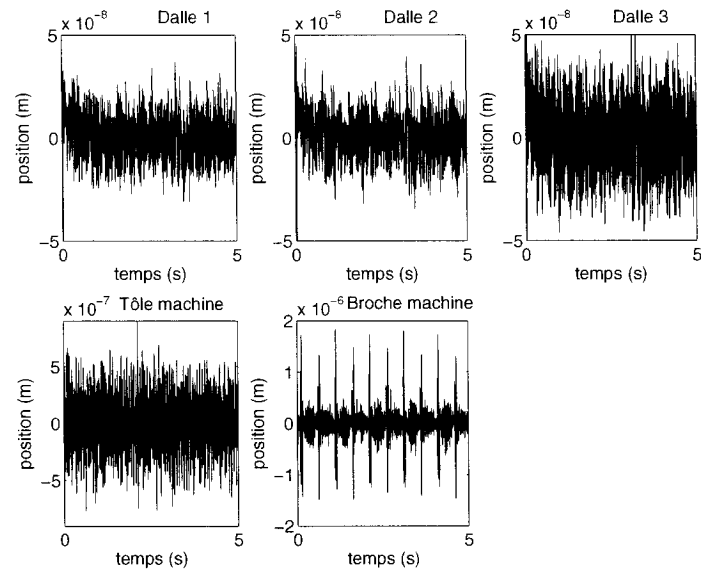


FIG. 6.10 Exemple de l'amplitude de déplacement pour une réplique lors des tests avec avance de 337 mm/min

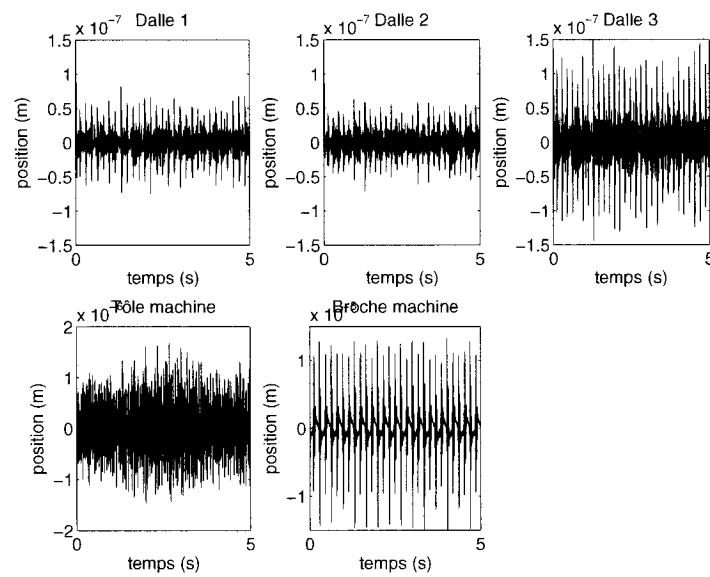


FIG. 6.11 Exemple de l'amplitude de déplacement pour une réplique lors des tests avec avance de 1100 mm/min

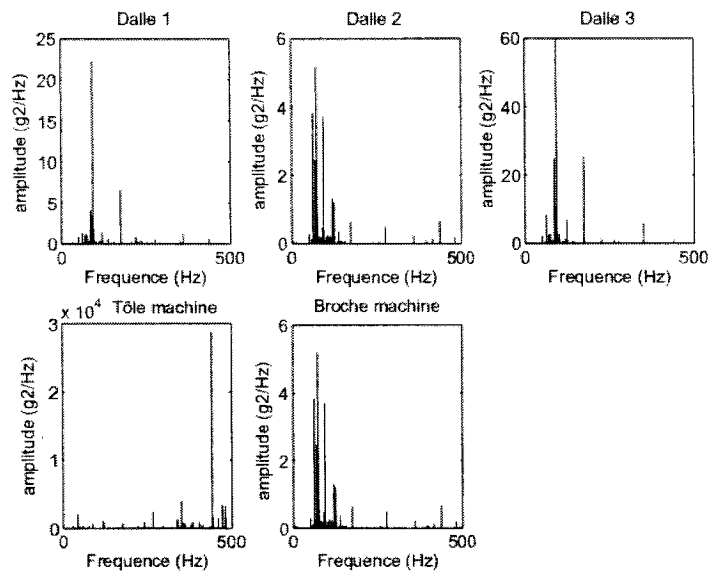


FIG. 6.12 Exemple du spectre de puissance pour une réplique lors des prises de mesure avec machine à l'arrêt

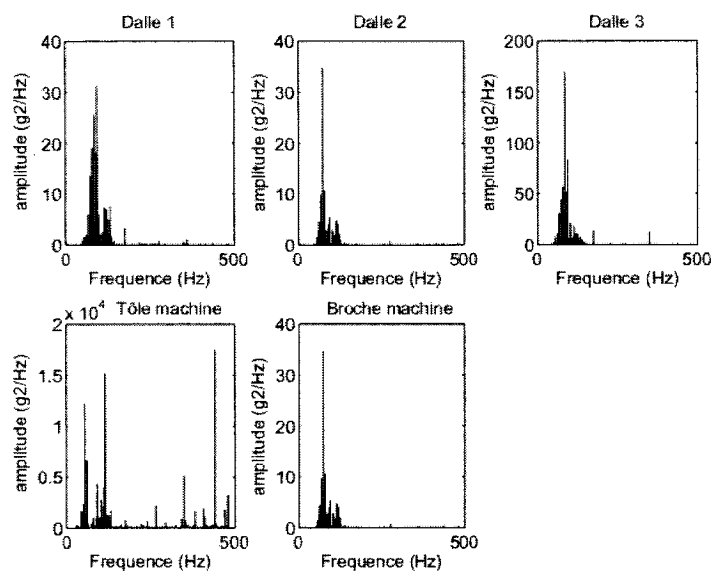


FIG. 6.13 Exemple du spectre de puissance pour une réplique lors des prises de mesure avec parcours avec avance de 1100 mm/min

CHAPITRE 7

ANALYSE ET APPLICATIONS

7.1 Vérification de l'équipement

Cette section est une discussion des résultats présentés aux parties 6.1, 6.2 et 6.3.

7.1.1 Comportement en fréquence

Nous voulions déterminer le comportement en fréquence des accéléromètres, puisque c'est surtout la diffusion des fréquences qui nous préoccupe. En effet, lors de comparaison de résultats, même si, dans certains cas, l'amplitude des vibrations ne change pas, le contenu fréquentiel des données peut changer, ce qui indique qu'une perturbation a été transmise.

Les résultats obtenus suite aux calculs des spectres de puissances sont plus que satisfaisants. Tout d'abord, la réponse en fréquence des accéléromètres est très stable. Dans tous les tests de comparaison effectués au niveau de la source de vibration étalon, même avec les répliques différentes, les différents jours et les bases d'accéléromètres différentes, les résultats sont les mêmes.

De plus, on peut remarquer à la partie 6.3 que les prises de mesure effectuées en simultané offrent le même contenu fréquentiel pour chaque accéléromètre, même pour de petites amplitudes de mesure. De plus, d'un accéléromètre à un autre, pour un même signal, le contenu fréquentiel est le même.

Nous pouvons être confiants quant à la répétabilité et la reproductibilité des réponses en fréquence des données recueillies. De plus, suite à ces résultats, on ne peut considérer deux fréquences proches comme étant la même fréquence.

7.1.2 Comportement en amplitude de vibrations

La variation de l'amplitude d'accélération n'est pas statistiquement nulle. Cette variation est causée principalement par la pose et l'installation de la base sur l'accéléromètre. En effet, à cause de cette variation, nous avons découvert à la section 6.2 que l'écart dans lequel doivent se retrouver les résultats si l'on réalise de nouveau ces expériences ne peut être défini par $\pm 2\sigma$ mais par $\pm 2\sqrt{5}\sigma$.

De plus, il faut préciser que tous les tests ont été effectués par la même personne, qui avait l'habitude d'installer des accéléromètres sur les montages utilisés. Ainsi, en réalité, on peut même s'attendre à ce que l'écart au niveau de la reproductibilité des tests soit même plus grand.

7.1.3 Stratégies pour diminuer les écarts d'amplitude d'accélération

À ce point-ci, il est intéressant de chercher des moyens qui pourraient permettre de limiter les écarts dus au posage. Le posage réfère à l'installation de la base sur l'accéléromètre de même que l'installation de l'accéléromètre (sur sa base) sur la surface à étudier. Ainsi, pour avoir une meilleure répétabilité des résultats, et une meilleure reproductibilité des tests, il faudrait identifier un moyen de caractériser ce posage. On pourrait tout d'abord s'assurer que l'accéléromètre soit exactement au même endroit, surtout pour les bases magnétique et pour cire.

L'utilisation d'une clé dynamométrique lors des serrages est une avenue intéressante à considérer. Cependant, dû à la forme de l'accéléromètre, il faut considérer que le serrage doit se faire sur la base de 0.750 pouces comme illustré à la figure 7.1.

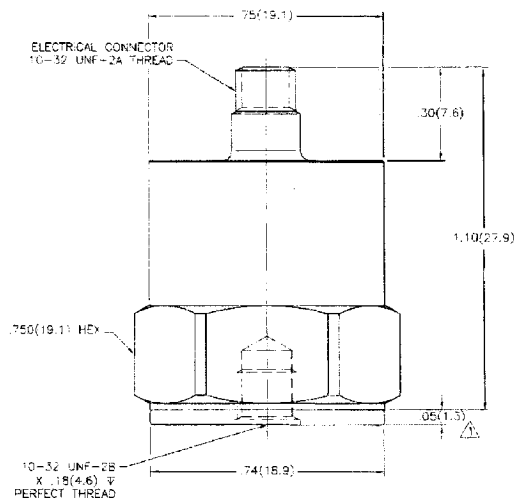


FIG. 7.1 Schéma de l'accéléromètre 352B de PCB

Le couple nécessaire au serrage est très faible, soit de 113 à 226 $N \cdot cm$, ce qui est un couple beaucoup plus faible que ceux possibles avec une clé dynamométrique à cliquet¹ qui semble à première vue être le choix d'utilisation ici. En effet, une telle clé a un couple minimum plus important qui peut endommager l'équipement. Ainsi, le choix d'une clé appropriée est primordial ici.

Également, on pourrait tenter de remplacer la clé dynamométrique par un système levier-ressort. Par contre, il est plus difficile de qualifier un tel système et de plus, le couple nécessaire étant faible, le levier doit être très court.

¹communément appelé clé à ratchet

L'utilisation d'un moyen de caractériser le serrage n'est évidemment applicable que pour le vissage des montages. Cependant, pour l'installation des bases magnétiques et des bases avec cire de pétrole, on peut tenter d'utiliser ces moyens pour caractériser l'installation de la base sur l'accéléromètre.

Il est impossible de trouver un moyen efficace pour quantifier de la base pour cire. En effet, même si l'on caractérisait la quantité de cire à poser sur la base (pour un montage avec cire), il est difficile de qualifier ou de quantifier l'installation de cette quantité de cire sur la base. Il peut y avoir de la cire résiduelle sur la base utilisée ou l'épaisseur distribuée sur la base peut être inégale. De plus, la pression à exercer sur l'accéléromètre pour permettre l'adhésion à la surface est difficilement quantifiable, de même que la légère rotation qui facilite l'adhésion de cette base.

Ainsi, certaines précautions additionnelles peuvent être prises : par contre, il est difficile de réellement caractériser la pose des accéléromètres au point où l'effet de la pose sur l'amplitude obtenue peut être nul et la répétabilité du procédé se limite seulement à l'écart dû aux instruments. Également, il est préférable de désinstaller et de démonter les accéléromètres le moins possible et ainsi, de garder le même montage.

7.2 Comparaison entre les différents emplacements dans le laboratoire

Il est intéressant de remarquer que même si dans certains cas l'amplitude de déplacement d'un endroit à un autre est semblable, le contenu fréquentiel ne l'est pas (voir section 6.4.1). Ainsi, selon de l'endroit où l'on est situé dans le laboratoire, les fréquences dominantes changent, ce qui indique que les perturbations à ces différents endroits proviennent de sources différentes. De plus, différents modes peuvent être excités.

Ainsi, on peut donc conclure qu'un résultat en fréquence obtenu dans un endroit dans le laboratoire ne sera pas le même à un autre endroit, et donc en tenir compte si les vibrations induites et les fréquences en jeu ont un impact important sur les résultats d'instruments que l'on veut mesurer. Ainsi, une analyse des conditions particulières de l'endroit de test doit être effectuée si nécessaire pour s'assurer de connaître les bonnes conditions de base. Quant aux l'amplitudes de déplacement, elles sont sensiblement les mêmes d'un endroit à l'autre.

Ce qu'il est surtout important de remarquer ici est la faible amplitude de ces déplacements. En effet, au pire des cas, le déplacement maximum n'atteint pas 50 nanomètres. Ainsi, lors de tests avec instruments, il faut considérer que si les instruments que l'on utilise ont cette précision, ce bruit ambiant va affecter les mesures et qu'un instrument de mesure ne peut pas être plus précis que 50 nanomètres dû aux bruits ambiants, surtout si ces instruments sont particulièrement affectés par les modes vibratoires de ces bruits.

Nous aurions voulu effectuer les tests lorsque la climatisation et l'éclairage sont arrêtés pour connaître l'état minimum de perturbation dans le laboratoire. Par contre, puisque la climatisation dans cette partie de l'école est centrale, ce n'est pas possible. Également, il était impossible de faire des tests lors d'arrêts du système électrique puisque le conditionneur de signal de même que les composants informatiques nécessitent une alimentation électrique.

7.3 Tests avec vibrations contrôlées

Il est important de rappeler que ces travaux se font dans le cadre d'une étude préliminaire sur le sujet. En effet, le but était de déterminer si, lorsque une machine est en marche sur une dalle donnée, une perturbation pouvait être transmise sur

une dalle voisine et selon quel ordre de grandeur. En effet, une fois ceci déterminé, il va être possible d'apporter une conclusion sur la nécessité de prendre des mesures correctives ou de faire des tests supplémentaires pour caractériser le phénomène avec plus de précision.

7.3.1 Lien machine - dalle

Tout d'abord, il a été possible de déterminer que ce n'est pas tout mouvement de machine qui va créer une perturbation sur la dalle même de la machine. Ainsi, certaines vibrations sont amorties soit par la dalle de béton ou par le bâti de la machine. En effet, pour la première avance, l'amplitude des vibrations lues de la tôle de la machine ne diffère pas selon que la machine est en mouvement ou à l'arrêt (voir figure 6.9 et 6.10, graphiques nommés tôle machine) alors que c'est le cas avec la troisième avance utilisée (6.11). Dans ce cas, aucune perturbation n'est transmise aux dalles voisines.

7.3.2 Lien dalle - dalle

Comme indiqué à la section 6.5, pour observer la transmission d'une dalle à l'autre, les résultats entre la machine à l'arrêt et lors des mouvements à 1100 mm/min ont été étudiés puisque c'est pour cette avance que la transmission des vibrations est plus importante.

Ainsi, une transmission a lieu. Par contre, il faut se rappeler que cette transmission de fréquence est de basse fréquence, ce qui ne se répercute pas de façon claire sur le spectre de puissance puisque ces fréquences sont perdues dans la partie constante du spectre.

Également, la transmission effectuée est une transmission de surface, probablement à travers le joint d'aluminium. En effet, nous observons la même amplitude pour les deux dalles à l'étude, alors que leurs masse et dimensions sont très différentes.

7.3.3 Autres types de perturbations contrôlées possibles

Tout d'abord, il serait intéressant de connaître la perturbation causée par un usinage sur la dalle de la machine et les dalles environnantes. En plus du déplacement causé par la machine, un usinage crée des forces de coupe qui engendrent des vibrations également.

Dans la présente étude, les perturbations considérées sont les perturbations causées par le mouvement de la machine puisqu'aucun usinage n'est réalisé. Au lieu d'utiliser un mouvement dans l'axe Y de la machine, il aurait été possible de tenter de créer des vibrations par un usinage connaissant la fréquence de rotation de l'outil jumelée au nombre de dents de l'outil.

De plus, pour être capable de définir des fonctions de transfert d'une dalle à l'autre, il serait intéressant d'avoir une source de vibration connue, et non destructrice, d'amplitude variable allant de très basses fréquences à de hautes fréquences. Dans les travaux de Al-Hunaidi ², ayant étudié le comportement lors du passage d'un véhicule, et après avoir fait des tests avec véhicules réels, les auteurs ont décidé d'utiliser un système avec une masse de 125 kg et chutant d'une hauteur de 1.2m pour simuler le passage d'un véhicule. Il serait être tentant d'utiliser un système similaire (causant des vibrations et perturbations d'un ordre de grandeur plus petit). Par contre, avant de ce faire, il faudrait s'assurer qu'un tel système n'abîmerait pas les dalles de béton. Un tel système était utilisé à l'extérieur de l'édifice à étudier.

²AL-HUNAI, M.O., RAINIER, J.H., TREMBLAY, M. «Control of traffic-induced vibration in buildings using vehicle suspension system»

Grâce à cette approche, il pourrait être possible d'atteindre des fréquences plus élevées que les 3 Hz que nous obtenons avec un déplacement d'un millimètre, ce qui permettrait de vérifier si le comportement observé en basse fréquence est également présent pour de plus hautes fréquences (entre 10-300 Hz). De plus, en variant la masse du système, il serait possible d'évaluer plusieurs fréquences, et de déterminer lesquelles sont réellement transmises d'une dalle à l'autre.

Également, une machine à impact ³ pourrait être une avenue à étudier. Ce genre de machine est utilisé dans les tests de vibrations sonores. On retrouve une présentation d'une telle machine dans les travaux de Warnock⁴. Les amplitudes créées seraient trop faibles pour notre application, mais une variation de cette machine pourrait être envisagée. On pourrait également étudier la possibilité d'utiliser une machine à impact utilisant un pneu et un moteur pour créer la perturbation ⁵.

La réelle difficulté ici est de trouver une source de vibration connue, d'amplitude et de fréquence suffisamment étendues et variables pour déterminer les fréquences qui sont transmises d'une dalle à l'autre et celles qui ne le sont pas.

7.4 Influence sur instruments

Est-ce que des vibrations au sol d'une amplitude de 50 à 150 nanomètres peuvent avoir une influence sur les instruments utilisés en laboratoire ?

Au tableau 7.4, nous retrouvons une liste d'instruments typiquement utilisés en laboratoire, avec leur précision et résolution.

³Tapping machine en anglais

⁴WARNOCK,A.C.C. «Controlling the transmission of Impact sound through floors»

⁵WARNOCK,A.C.C. «Investigation of use of the tire impact machine as standard device for rating impact sound transmission of floors»

Instrument	Précision	Résolution
	$10^{-6}m$	$10^{-9}m$
Interféromètre laser	± 1	± 1
Encodeur à grille (KGM)	± 2	± 10
Barre à billes	± 1	± 50

TAB. 7.1 Tableau des valeurs de précision et de résolution d'instruments de mesure utilisés dans le LRFV

L'amplitude des vibrations recueillies au sol n'affectent pas la précision des appareils de ce tableau.

En effet, l'ordre de grandeur des perturbations recueillies sont dans l'ordre de la résolution des appareils, et non de la précision.

Par contre, les résultats que nous avons obtenus sont les résultats aux sols. Il serait intéressant dans une étude subséquente d'installer divers équipements et de prendre les mesures à différents points sur ces équipements en même temps qu'aux autres points de mesure déjà étudiés pour évaluer la diffusion des perturbations et leur influence le long de la chaîne de transmission. De plus, on pourrait prendre des mesures avec la machine créant les perturbations à l'arrêt et en mouvement. Ainsi, il serait possible d'avoir une meilleure idée de la perturbation réelle qui se crée à la lecture avec des instruments.

Par exemple, un support 'flexible' ou un trépied reposant sur une surface qui subit des perturbations peut subir de plus importantes amplitudes de perturbation que le sol sur lequel il repose. C'est d'ailleurs ce que l'on observe lors des tests avec les accéléromètres installés simultanément sur le montage circulaire (résultats à la section 6.3). Les amplitudes de déplacement lues par l'accéléromètre au sol sont moins importantes que celles lues sur le montage. Ainsi, l'effet sur les équipements pourrait être plus important que la lecture faite au sol.

De plus, ces perturbations vont probablement moins affecter des instruments prenant des mesures statiques ou dont le résultat vient de moyennes (comme l'interféromètre laser). Par contre, dans le cas de mesures où nous ne recourons pas à une moyenne, comme les lectures d'interféromètre laser en dynamique, si les perturbations ont un effet, elles vont faire partie intégrante des résultats.

Également, ici, nous n'avons que des mouvements de machines. En ajoutant des usinages, des forces de coupe et un outil en rotation, il est très possible que les perturbations transmises à la dalle de la machine soient plus importantes, et du même coup, celles transmises aux autres dalles voisines le soient aussi. Ce serait une avenue à explorer.

Pour les tests que nous avons effectués, nous pourrions conclure que pour certaines basses fréquences de vibrations, il y a une transmission de vibration. Par contre, on ne peut conclure que l'ordre de grandeur des perturbations transmises n'est pas assez important pour avoir un effet sur les instruments de mesure. Une étude plus poussée pourrait mener à une autre conclusion considérant les facteurs mentionnés plus haut dans cette section. Également, il faut considérer les modes auxquels les instruments utilisés sont particulièrement sensibles.

7.4.1 Recommendations

Dû à la conclusion ambiguë énoncée précédemment, il est difficile de faire des recommandations fermes quant à l'utilisation d'équipements de précision dans le LRFV. On ne peut conclure sur le sujet de l'étude, les données et résultats étant insuffisants pour faire une conclusion définitive.

En effet, il serait facile de dire que tout test utilisant des instruments d'une très grande précision demande l'arrêt complet des travaux dans le reste du laboratoire,

ce qui est impossible, dû à la vocation actuelle du laboratoire, qui est un support autant à la recherche qu'à l'industrie.

Par contre, dès que l'on travaille dans une situation demandant une précision de l'ordre du dixième de micromètre (100-200 nanomètres), il est possible que les perturbations venant de l'usinage fait sur d'autres dalles que celle sur laquelle s'effectuent les prises de mesures aient une influence, surtout si ces vibrations sont d'une fréquence qui excite un mode de vibrations des instruments utilisés. Ainsi, pour des travaux dans cet ordre de grandeur, il vaudrait mieux éviter tout travail sur les dalles voisines.

La zone de précision au-delà du dixième de micromètre jusqu'à un micromètre mérite une plus grande étude avant de poser une conclusion définitive. Et c'est une des principale plages de précision des instruments de mesure qui sont utilisés.

De plus, nous avons effectué tous les tests dans une seule direction, celle de la perpendiculaire au sol, que nous appelons Z_{sol} . Dans une étude future, il serait intéressant d'utiliser des accéléromètres triaxiaux pour nous permettre d'évaluer les perturbations dans toutes les directions.

CONCLUSION

Ce mémoire de recherche tentait de répondre à la problématique qui est l'étude de la propagation de perturbations vibratoires des dalles de montage des machines à commandes numériques (MOCN) dans le Laboratoire de recherche en fabrication virtuelle (LRFV) de l'École Polytechnique de Montréal.

En effet, une méthode expérimentale et des moyens de calcul ont été approfondis et implémentés pour répondre à cette problématique. Nous avons identifié que des phénomènes intermittents causaient une variation d'amplitude de vibration lors de la prise de données. De plus, nous avons pu établir l'impact et l'importance du montage d'accéléromètres sur les résultats finaux.

Nous en sommes venus à la conclusion qu'effectivement, il y a des perturbations qui sont transmises d'une dalle à l'autre et nous en avons déterminé l'ordre de grandeur et qu'il s'agit d'une transmission de surface. Par contre, nous ne pouvons conclure sur l'impact que ces perturbations transmises ont sur l'équipement.

Des contraintes monétaires ont limité notre recherche. En effet, le protocole établi nécessite que seules les composantes étudiées dans l'atelier soient actives ou en fonctionnement. Ainsi, les choix qui ont été faits quant aux protocoles expérimentaux tentent de limiter le nombre d'heures pour la réalisation des tests.

Les principales pistes de recherche à explorer dans le futur sont :

- Trouver une méthode de génération de vibrations contrôlable en fréquence et en amplitude ;
- Prendre des mesures avec certains équipements précis en place, pour voir l'impact réel des perturbations ;

- Réaliser les tests dans toutes les directions, et non seulement examiner les perturbation dans la direction perpendiculaire au sol ;
- Étudier l'impact de la salle de climatisation de la salle de métrologie plus en détail.

Finalement, nous avons découvert la complexité du problème des perturbations de l'environnement. En effet, il est très difficile d'isoler les composantes de perturbations pour faire l'analyse. Nous avons limité ce travail à l'étude des transmissions de perturbation d'une dalle à l'autre, et sur les effets d'une machine sur une autre dalle. Beaucoup de travail reste à faire pour réellement évaluer l'effet des perturbations indésirables sur l'équipement utilisé.

RÉFÉRENCES

AL-HUNAIDI, M.O., RAINIER, J.H., TREMBLAY, M. «Control of traffic-induced vibration in buildings using vehicle suspension system», *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 15 (1996). 245-254.

CORINTHIOS, Michael J. *Analyse des signaux : cours ELE3700*, 5e édition. École Polytechnique de Montréal. Département de génie électrique. 2001.

FORTIN, André. *Analyse numérique pour ingénieurs*. Editions de Polytechnique. 1995. 448p.

HUNAIDI, Osama. «La vibration des bâtiments sous l'effet de la circulation» . Solution constructives n 39. Conseil national de la recherche du Canada, Juin 2000. 736-751.

HUNAIDI, Osama, TREMBLAY, Martin. «Traffic-induced building vibrations in Montréal» , *Canadian journal of civil engineering* 24 (1997). 736-751.

MONTGOMERY, Douglas C. *Design and analysis of experiment*. Third edition. John Wiley & Sons, 1991. 649p.

Machinery's handbook. Twenty-Fourth Edition. Industrial Press Inc, 1992. p955-1027.

OSTLE, Bernard et all. *Engineering statistics, the industrial experience*. Wadsworth Publishing compagny. 1996. 568 p.

PRESS, William H. et all. *Numerical recipes in C : the art of scientific computing*. Cambridge University Press, 1988. 735p.

WARNOCK.A.C.C. «Controlling the transmission of Impact sound through floors» . *Construction Canada* vol 42. no 5. (2000).

WARNOCK.A.C.C. «Investigation of use of the tire impact machine as standard device for rating impact sound transmission of floors» , NRCC Report CR6132.2.

ANNEXE I

STRUCTURE ET PARTICULARITÉS DU CODE MATLAB

I.1 Calcul du spectre de puissance et de l'intégrale trapèze

Nous pouvons observer le schéma pour le traitement de l'amplitude de déplacement à la figure I.1 et pour le calcul des spectres de puissance à la figure I.2. Ce sont les principaux fichiers et fonctions qui ont été utilisés dans les deux cas. Par contre, d'autres scripts ont été créés pour créer des graphiques particuliers.

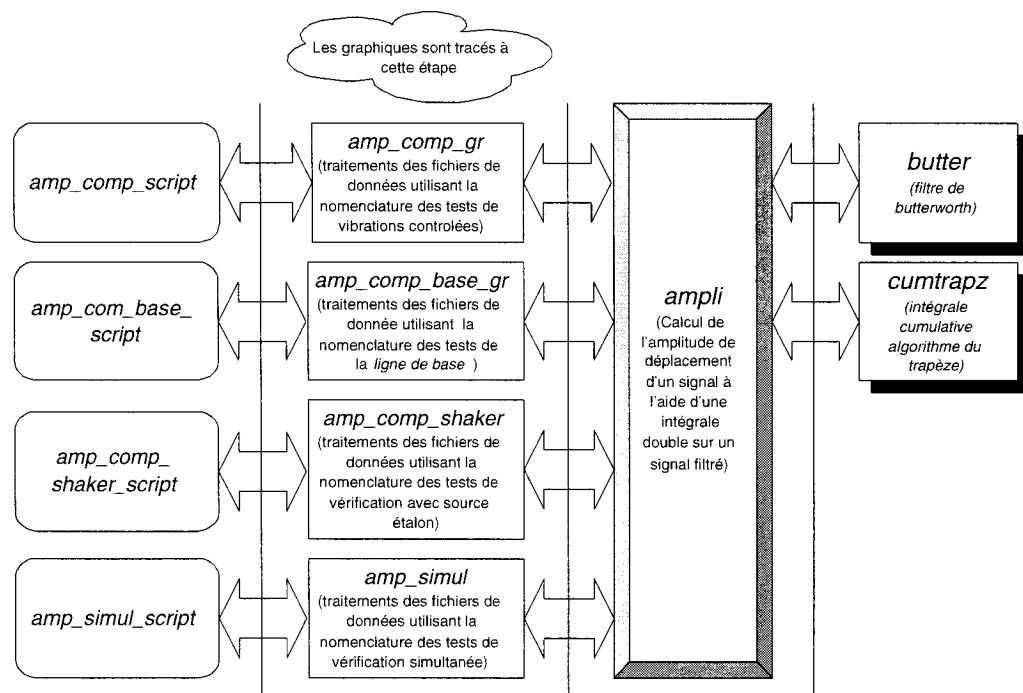


FIG. I.1 Schéma des fonctions Matlab pour l'amplitude de déplacement

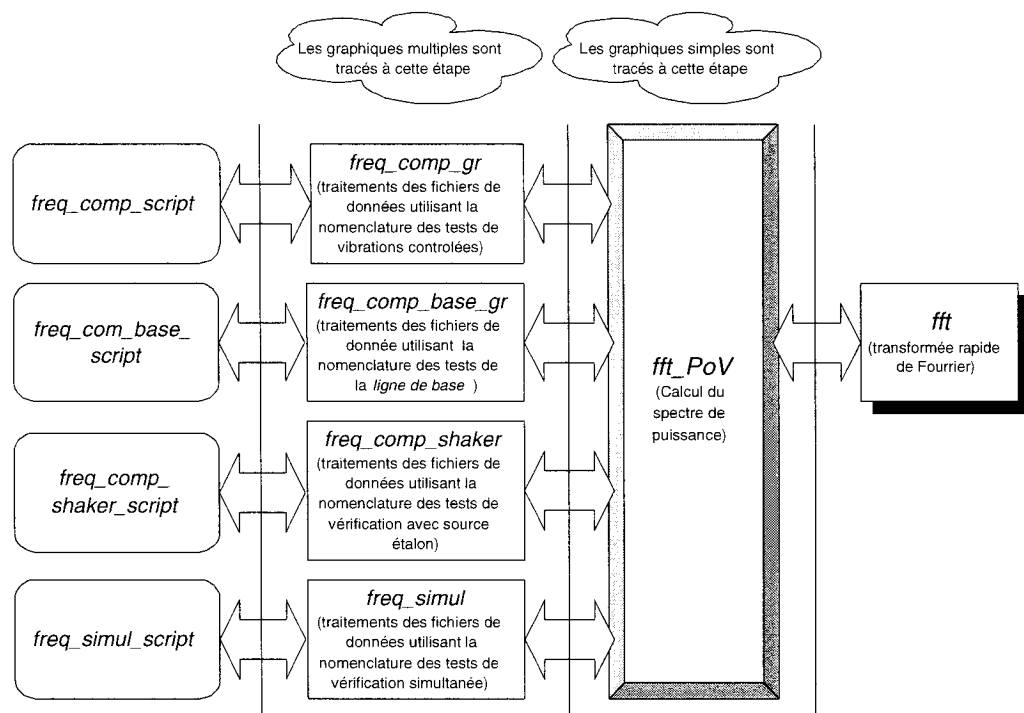


FIG. I.2 Schéma des fonctions Matlab pour le calcul du spectre de puissance

I.1.1 Particularités de la FFT sous Matlab

Dans notre situation, la fonction FFT de Matlab a été utilisée pour les calculs. Par contre, il faut connaître la nature du fichier de sortie de cette fonction pour être capable par la suite de calculer le spectre de puissance. Matlab dans son résultat de FFT présente tout d'abord les valeurs de 0 à f_c , puis ensuite les valeurs de $-f_c$ à 0. Il faut en tenir compte lors du traitement des résultats. En effet, pour calculer le spectre de puissance, il faut reconstruire le fichier d'entrée pour que l'on retrouve les valeurs calculées de la FFT de 0 à f_c , puis de $-f_c$ à 0.

De plus, pour faciliter le traitement des données, le nombre de données du fichier de résultats que Matlab traite doit être pair. En effet, due à la symétrie de la FFT, pour le calcul du spectre de puissance, ceci est plus simple puisque qu'une valeur de la FFT n'aura pas une double valeur de fréquence. Ainsi, si le fichier de données est impair, le script d'exécution néglige la dernière valeur du fichier, ce qui aura un impact mineur sur la suite du calcul, mais simplifiera la programmation.

I.2 Calcul de la RCM centrée

La RCM centrée est codée dans un fichier fonction. Ensuite, un fichier script fait appel à la fonction. Le fichier script peut également faire certains traitements nécessaires comme une moyenne de plusieurs valeurs RCM.

I.3 Calcul des facteurs des tests hiérarchisés en analyse de variance

Pour le calcul des facteurs des tests hiérarchisés en analyse de variance, les calculs sont réalisés grâce à un script Matlab, qui permettait de facilement faire l'appel

de plus de 75 fichiers de type texte (*.txt) pour en faire le traitement et pour déterminer les facteurs importants. La fonction *strcat* est particulièrement utilisée, car elle permet de créer des noms de fichier à l'aide de l'indice d'une boucle *for*. La nomenclature des fichiers de résultats est choisie en fonction de ce traitement.

Puisque ce calcul n'a été fait qu'une fois et sur des données fixées, aucune flexibilité n'était nécessaire.

I.4 Autres développements sur Matlab

Pour tous les autres calculs faits sur Matlab, une structure de fichier a été créée pour permettre une analyse la plus rapide possible.

Voici à la figure I.3 l'exemple de la comparaison des méthodes d'intégration numérique.

Dans le script initial, seulement la série de valeurs utilisée pour faire la comparaison est changée au début du fichier.

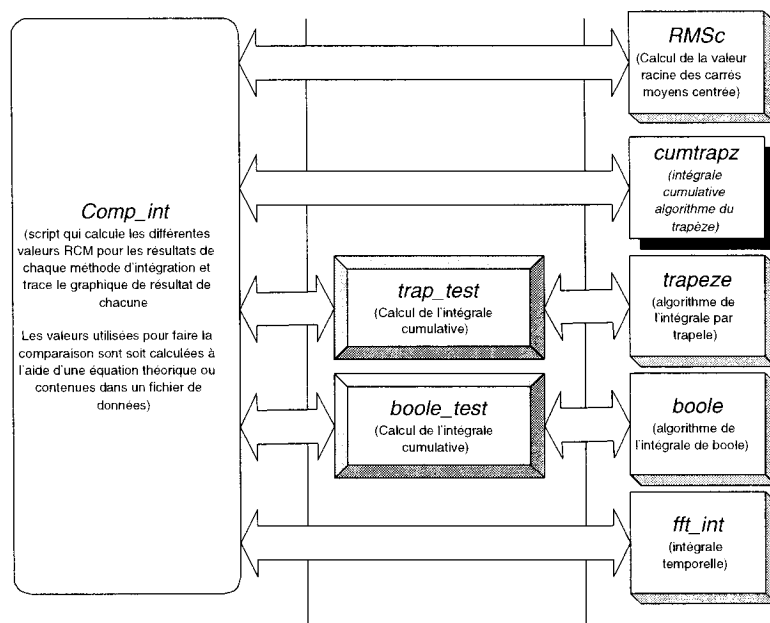


FIG. 1.3 Schéma des fonctions Matlab utilisées lors de la comparaison des méthodes d'intégration numériques

ANNEXE II

PROTOCOLES EXPÉRIMENTAUX

II.1 Protocole général

II.1.1 Équipement

- 6 accéléromètres ICP PCB 352B, avec
 - bases de montage pour cire de pétrole PCB 080A12
 - cire de pétrole PCB 080A109
 - goujons de montage (10-32 à 10-32) PCB 081B05
 - goujons de montage (10-32 à M6 X 0.75) PCB M081B05
- 3 bases magnétiques PCB 080A30
- conditionneur de signal ICP 481A03 de PCB
- 6 câbles 10-32 coaxial - BNC PCB 003C10
- 6 câbles BNC female - BNC female PCB 012A03
- 6 câbles SMB female - BNC male SMB110
- ordinateur PXI-1042 National Instrument avec carte 4472
- logiciel maison développé sous LabView 6.0
- source étalon de vibration de 1g à 159 Hz de PCB 394C06

II.1.2 Précautions générales avant réalisation de tests

Les précautions générales qui ont été prises avant chaque tests sont les suivantes :

1. Suite à la connexion du montage, s'assurer qu'au niveau du conditionneur de

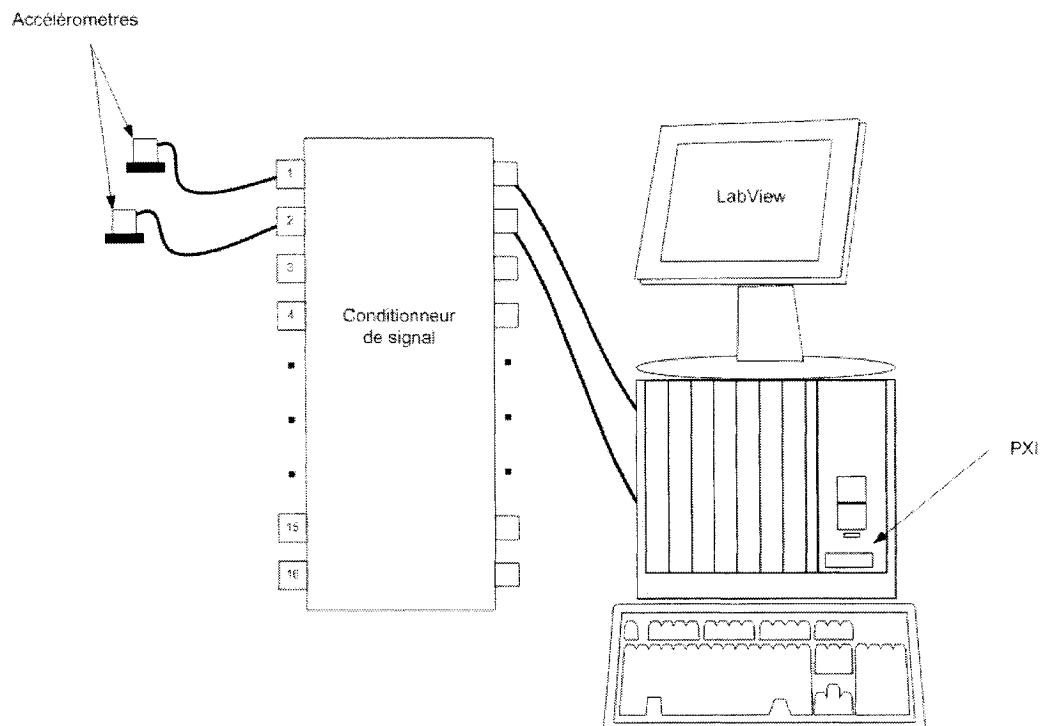


FIG. II.1 Système d'acquisition de données utilisé

signal aucun signal ne crée une surcharge et une erreur de signal, ce qui va être indiqué à l'avant du conditionneur grâce à un signal lumineux.

2. S'assurer que chaque accéléromètre donne un signal lors de la prise de mesure.
3. S'assurer grâce à la source de vibration étalon que les lectures d'accéléromètres aient la bonne amplitude et la bonne fréquence.
4. Lors de l'installation des accéléromètres en position de tests, s'assurer de bien les identifier visuellement pour éviter qu'une personne entre en collision avec l'équipement (accélérateurs, fils...).
5. Pour les accéléromètres fixés sur des structures au-dessus du sol, attacher le fil grâce à un ruban adhésif sur une structure, pour que si l'adhésif de la base ne retient plus l'accéléromètre en place et que l'accéléromètre chute, celui-ci ne fasse pas contact violemment avec le sol.

6. Éviter d'avoir des personnes non nécessaires au test sur place.

II.1.3 Installation du matériel

Pour chaque accéléromètre utilisé :

- brancher un cable SMB female - BNC male sur une sortie de la carte d'acquisition de donnée
- brancher un fil BNC female - BNC female sur le fil précédent relié à la sortie du conditionneur de signal
- à l'entrée BNC correspondante à la sortie du conditionneur de signal, brancher un fil 10-32 coaxial - BNC
- sur le fil précédent, brancher l'accéléromètre (si cela facilite le montage, fixer l'accéléromètre avant de brancher le fil)
- mettre sous alimentation l'ordinateur et le conditionneur de signal
- enlever toute base déjà présente sur l'accéléromètre, puis fixer l'accéléromètre avec un goujon de montage (10-32 à 10-32) sur la source de vibration
- prendre des mesures avec la source de vibration inactive pour attendre que le signal au repos soit à zéro (attendre que le signal se stabilise à l'écran)
- prendre des mesures avec la source de vibration active. Vérifier visuellement (à l'écran) que l'amplitude du signal est bien 1g RMS
- retirer l'accéléromètre de la source de vibration, et l'installer à l'endroit désiré avec la base appropriée.

II.1.3.1 Installation et fixation des accéléromètres

Pour utiliser l'accéléromètre avec une base cirée :

- enlever toute base déjà présente sur l'accéléromètre

- visser le goujon de montage (10-32 à 10-32) sur l'accéléromètre
- visser la bases de montage pour cire de pétrole sur le goujon
- mettre une petite quantité de cire de pétrole sur la base
- s'assurer que la surface où l'on veut fixer l'accéléromètre est propre, et fixer l'accéléromètre en place.

Pour utiliser l'accéléromètre vissé, (la surface sur laquelle on veut visser l'accéléromètre doit avoir un trou fileté soit 10-32 ou M6 X 0.75) :

- enlever toute base déjà présente sur l'accéléromètre
- visser le goujon de montage approprié sur l'accéléromètre
- s'assurer que la surface où l'on veut fixer l'accéléromètre est propre, et visser l'accéléromètre en place avec une force suffisante, sans trop serrer

Pour utiliser l'accéléromètre avec une base magnétique, sur une surface pouvant retenir un aimant :

- enlever toute base déjà présente sur l'accéléromètre
- visser la base magnétique sur l'accéléromètre
- s'assurer que la surface où l'on veut fixer l'accéléromètre est propre, et fixer l'accéléromètre en place.

De plus, lorsque un accéléromètre est dans une position élevé, fixer le fils à l'aide d'un ruban adhésif sur une surface pour éviter que l'accéléromètre fasse contact avec le sol en cas où il se détache de la surface sur laquelle il est fixé.

II.1.4 Série de tests

Définition d'une série de tests :

Prendre 3 répliques de données à chacune des fréquence suivantes :

- 5 kHz
- 10 kHz
- 13 kHz
- 20 kHz

Prendre des mesures durant 10 secondes pour les lectures statiques, 5 secondes pour les mesures dynamiques (avec machines-outil en fonctionnement).

II.1.5 Format des données

Les résultats sont obtenus en g , ce qui équivaut à $9,8m/s_2$.

II.1.6 Masse des composantes utilisées sur source étalon

- Accéléromètre, socle, 2 gougeons de montage, base ciré : 82 g
- Accéléromètre, socle, 2 gougeons de montage : 78 g
- Accéléromètre, socle, base magnétique : 94 g

Ainsi, selon les spécifications de la source de vibration étalon, la distortion maximum est de 2 %.

II.2 Vérification des fréquences avec une source étalon

II.2.1 Réalisation des tests

Salle de métrologie du LRFV de l'École Polytechnique de Montreal (C-124.1)

- 2004-07-15, début 15h00, Accéléromètre 352B, SN 49081, canal 1 du condition-

neur SN 293

- 2004-07-16, début 11h30. Accéléromètre 352B, SN 49082, canal 2 du conditionneur SN 293

II.2.2 Équipement supplémentaire utilisé

- socle à fixer sur source étalon de vibration (voir figure II.2)

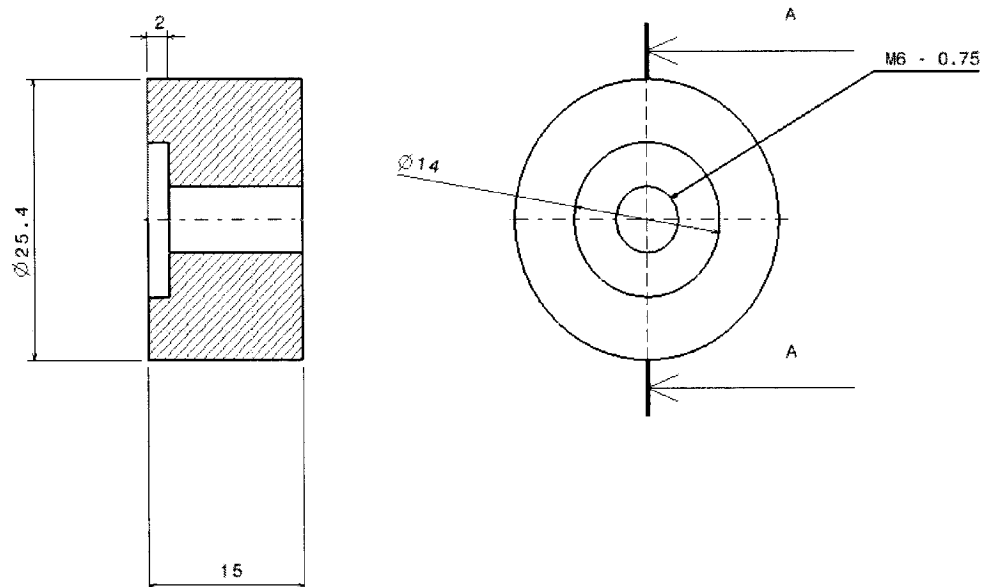


FIG. II.2 Socle à fixer sur source de vibrations étalon (unités MM)

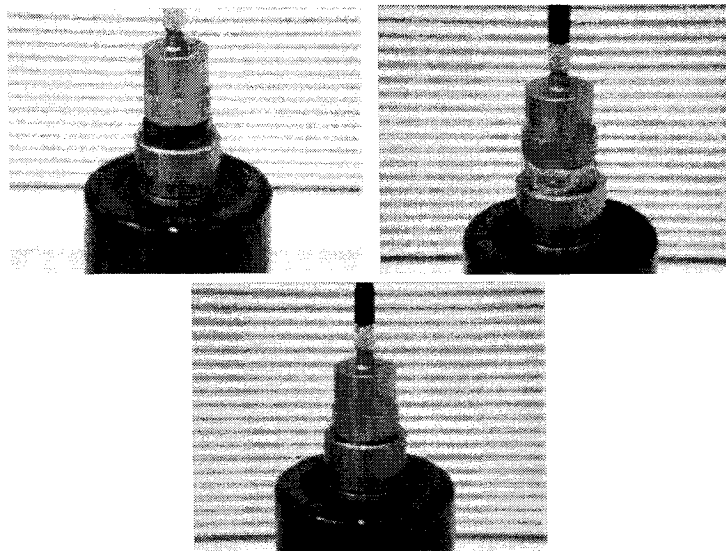


FIG. II.3 Montage avec socle et accéléromètre fixé avec base pour cire, base magnétique et base vissée

II.2.3 Position des accéléromètres

II.2.4 Réalisation des tests

- Fixer la socle avec un goujon de montage (10-32 à M6 X 0.75) sur la source de vibration
- Prendre une série de test pour chacun des modes de fixation suivants, :
 - base cirée
 - base magnétique
 - accéléromètre vissé

en fixant toujours le même accéléromètre sur le socle. S'assurer que la source de vibration est activée lors de la prise de mesure et qu'elle est sur la table comme illustré à la figure II.4.

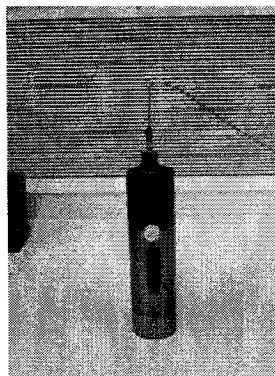


FIG. II.4 Position de test de la source de vibration étalon

II.2.5 Format de données

Matrice 1*n

II.2.6 Notation des fichiers

t_XXX_yykhz_zz où

- t pour le moment des tests :
 - a : les tests le 2004-07-15
 - b : les tests le 2004-07-16
- xxx représente les modes de fixations
 - cir : base à cire de pétrole
 - mag : base magnétique
 - vis : accéléromètre visée à la base
- yy représente la fréquence en kilohertz
- zz représente la réplique

II.3 Analyse de variance des différentes composantes de montage

II.3.1 Réalisation des tests

Salle de métrologie du LRFV de l'École Polytechnique de Montreal (C-124.1)

- 2005-01-17, début 13h00, Accéléromètre 352B, SN 49081, canal 1 du conditionneur SN 293

II.3.2 Équipement supplémentaire utilisé

- Socle à fixer sur source étalon de vibration (voir figure II.2)

II.3.3 Réalisation des tests

Ce test va varier des autres au niveau du protocole de réalisation.

- Fixer le socle avec un goujon de montage (10-32 à M6 X 0.75) sur la source de vibration
- Pour chacune des 3 bases (magnétique, à base cirée et vissée) :
 - fixer l'accéléromètre sur le socle
 - brancher le fil sur l'accéléromètre
 - activer la source de vibration
 - prendre une mesure à 10 kHz
 - désactiver la source de vibration
 - faire 4 autres mesure en activant et désactivant la source de vibration
 - désinstaller l'accéléromètre du socle
 - refaire le même processus 4 autres fois

II.3.4 Format de données

Matrice 1*n

II.3.5 Notation des fichiers

bx_yy_zz

- x pour le type de base :
 - 1 : base magnétique
 - 2 : base à cire de pétrole
 - 3 : accéléromètre visée à la base
- yy représente le posage
- zz représente la réplique (avec une nouvelle activation de la source étalon de vibration)

II.4 Vérification simultanée

II.4.1 Réalisation des tests

Laboratoire d'usinage du LRFV de l'École Polytechnique de Montreal (C-124)

- 2004-07-27, début 14h00
- 2004-07-29, début 11h00

Conditions particulière :

- Toutes machines dans l'atelier éteintes

- Aucun personnel dans l'atelier à l'exception de la personne recueillant les données
- Climatisation et éclairage normal

II.4.2 Équipement supplémentaire utilisé

- Banc d'essais circulaire (voir annexe pour détails)

II.4.3 Position des accéléromètres

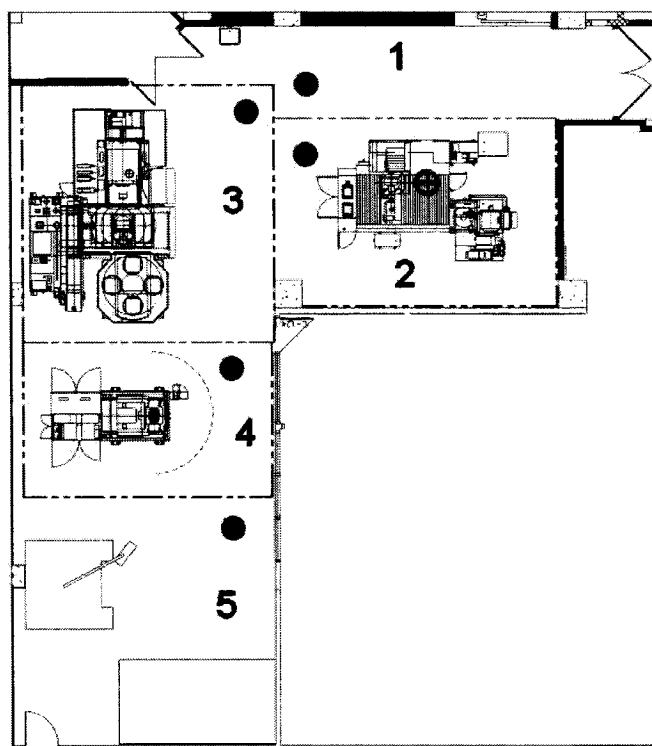


FIG. II.5 Position de prises de mesure lors des tests simultanés

Le test est fait au 5 endroits identifiés par un cercle sur schéma du laboratoire à la figure II.5. Le montage se situe à 30 cm de chaque bordure des dalles, ou d'obstacles

tels que des cabinets de rangement.

II.4.4 Réalisation des tests

- Déposer le banc d'essai au sol à un endroit indiqué sur le schéma de la figure II.5.
- Fixer 3 accéléromètres sur le banc d'essai au dessus ou à l'aide des 3 trous du centre. L'un avec une base pour cire, l'un avec une base magnétique et l'autre directement visser sur le banc d'essai (voir figure II.6)

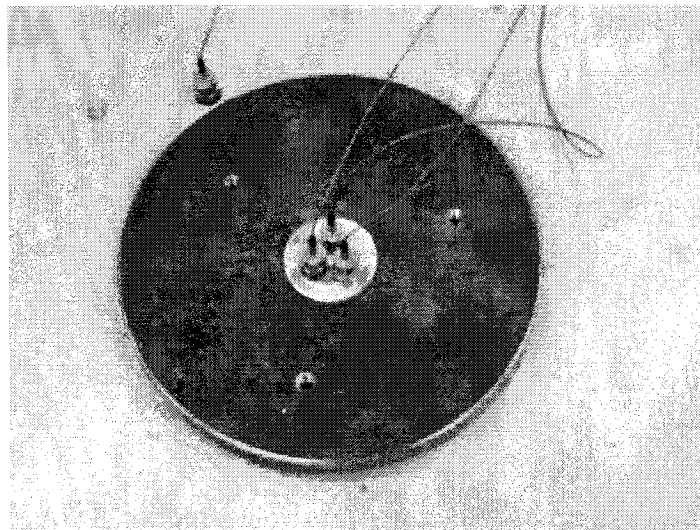


FIG. II.6 Montage des accéléromètres sur le montage circulaire

- Fixer un accéléromètres au sol, à l'aide d'une base pour cire, à environ 1 centimètres du banc d'essai (voir figure II.6)
- Faire une série de tests dans ces conditions
- Refaire la série de tests pour les 4 autres endroits du laboratoire

II.4.5 Format de données

Matrice 4*n

Colonnes :

1. Accéléromètre base magnétique
2. Accéléromètre vissé
3. Accéléromètre base ciré
4. Accéléromètre base ciré au sol

II.4.6 Notation des fichiers

dtx_yykhz_zz où

- t pour le moment des tests :
 - 1 : les tests le 2004-07-27
 - 2 : les tests le 2004-07-29
- x représente l'endroit des tests (voir figure II.5)
 - 1 : entrée
 - 2 : Huron kx-five
 - 3 : Mitsui-seiki HU40-T
 - 4 : Mitsui-seiki VL30
 - 5 : Matsuura
- yy représente la fréquence en kilohertz
- zz représente la réplique

II.5 Tests avec vibrations contrôlées

II.5.1 Réalisation des tests

Laboratoire d'usinage du LRFV de l'École Polytechnique de Montreal (C-124)

- 2004-10-04, début 17h00
- 2004-10-14, début 16h00

Conditions particulière :

- Tests avec la Mitsui-Seiki HU40-T
- Toutes autres machines dans l'atelier éteintes
- Climatisation et éclairage normal
- Aucun personnel dans l'atelier à l'exception de l'opérateur de la HU40-T et de la personne recueillant les données

II.5.2 Équipement supplémentaire utilisé

- 2 bases triaxiales PCB 080B16

II.5.3 Réalisation des tests

- Fixer 3 accéléromètres au sol, sur les dalles 1, 2 et 3 (voir figure II.7) à l'aide d'une base pour cire, à environ 10 centimètres des bordures.
- Visser une base magnétique sur les 2 bases triaxiales
- Fixer une base magnétique sur le cadre de la machine, à la position indiquée à la figure II.5.3)

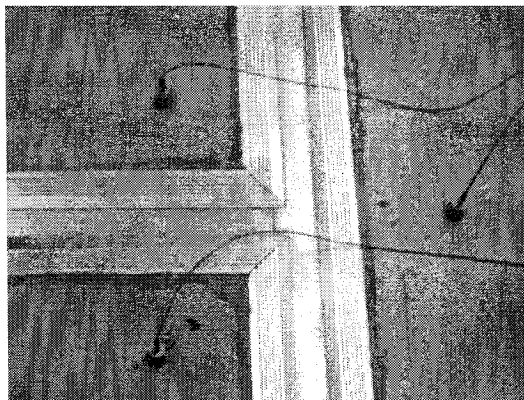


FIG. II.7 Position des accéléromètres au sol

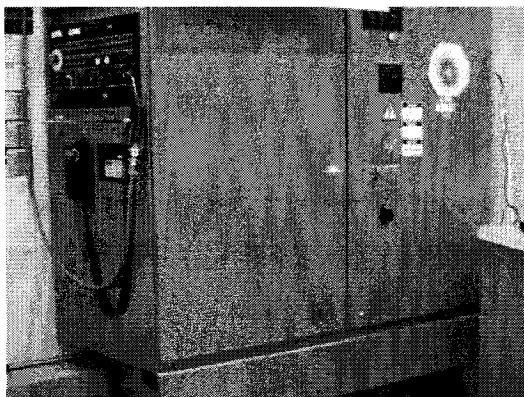


FIG. II.8 Position de l'accéléromètre sur le cadre de la machine

- Fixer une base magnétique sur la broche comme à la figure II.9.
- Sur chacune des bases, fixer un accéléromètre perpendiculaire au sol à l'aide d'une base pour cire
- Faire une série de tests avec la machine sous tension, mais n'effectuant aucun mouvement
- S'assurer que l'origine de travail (G54) définie est la même par rapport à l'origine machine (G53) dans tous les tests.
- Faire une série de tests avec chacun des parcours

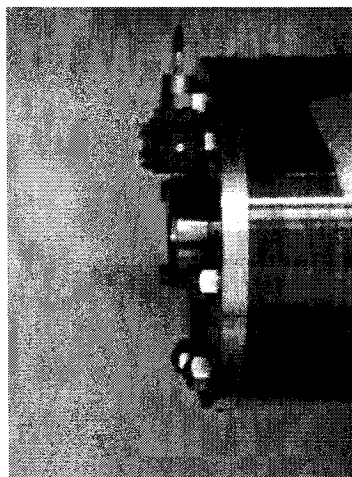


FIG. II.9 Position de l'accéléromètre fixé sur la broche de la machine

II.5.3.1 Parcours utilisés

Le parcours utilisé est une série de demi-cercle de 1 mm de rayon représenté à la figure II.10.

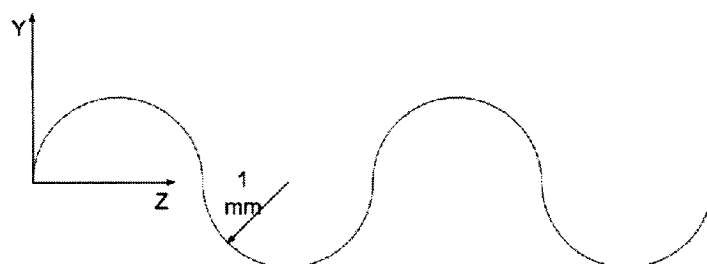


FIG. II.10 Parcours utilisés

3 fichiers sont utilisés, avec le même parcours mais 3 différences vitesses d'avance :

- 1100 mm/min
- 750 mm/min
- 376.8 mm/min

II.5.4 Format de données

Matrice 5*n

Selon la position de l'accéléromètre

Colonnes :

1. sol à entrée
2. sol de la dalle de la Huron kx-five
3. sol de la dalle de la Mitsui-seiki HU40-T
4. tôle de la Mitsui-seiki HU40-T
5. broche de la Mitsui-seiki

II.5.5 Notation des fichiers

txx_yyy_xx où

- t pour le moment des tests :
 - f : les tests le 2004-10-04
 - g : les tests le 2004-10-14
- xx représente l'avance commandée du parcours (mm/sec) arrondi à l'unité, avec les particularités suivantes :
 - 06 : 376.8 mm/min
 - 12 : 750 mm/min
 - 18 : 1100 mm/min
 - 13 : 750 mm/min (tests refaits dû à des erreurs lors de l'expérimentation)
 - 20 : 1100 mm/min (tests refaits dû à des erreurs lors de l'expérimentation)
 - vide : machine immobile, mais en fonctionnement

- xyy représente la fréquence en kilohertz
- zz représente la réplique

ANNEXE III

DOSSIER DE FABRICATION DU MONTAGE CIRCULAIRE DE
TEST

III.1 Pièce à réaliser

La pièce à réaliser est illustrée à la figure III.1 :

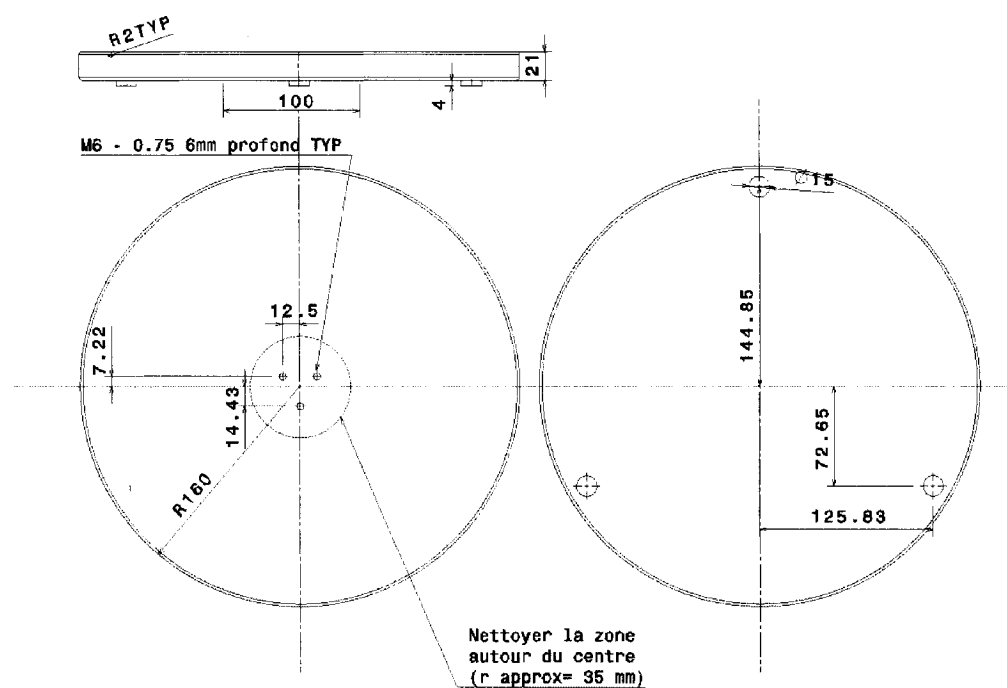


FIG. III.1 Montage circulaire de tests

III.2 Contraintes technologiques

Le but recherché dans cette gamme est d'avoir le moins de changement de montage possible. En effet, habituellement, le changement de montage est ce qui affecte le plus le temps de broche. Alors, une exigence demandée est que cette pièce soit réalisable en 2 montages.

Ainsi, la fabrication a été considérée lors de la cotation du dessin.

Cependant, il est possible de remarquer que la plupart des côtes sont par rapport au centre de la pièce, qui n'est pas en référence par rapport à aucune mesure ou élément de la pièce.

Pour permettre la réalisation de la pièce selon deux phases, le centre est déterminé par rapport au brut d'usinage (voir la gamme et le contrat de phase).

En effet, puisque la priorité ici était le nombre de montage, certains éléments ont été contournés et ne respectent pas les règles de l'art. Par contre, la plupart des dimensions en jeu n'étant point critique ($\pm 1\text{mm}$ dans la plupart des cas), cela n'affecte pas la fonctionnalité de la pièce.

III.3 Présentation du dossier

Un dossier de fabrication complet est élaboré afin de permettre la réalisation de la pièce dans les meilleures conditions.

La liste des éléments y figurant dans ce cas est fortement inspiré d'un document de Benoît Furet présenté dans le cadre du cours MEC6501 présenté à l'hiver 2003.

1. Nomenclature de phase
2. Contrats de phase
3. Gamme
4. Isostatismes des différents posages
5. Dessins ou fichiers montage porte-pièces
6. Choix des outils et des conditions de coupe
7. Listes d'outils utilisés par phase
8. Programmes CNC
9. Simulations d'usinages

Pour chaque point sera présenté une brève description, de même que les éléments devant figurer dans le dossier de fabrication.

III.3.1 Nomenclature de phase

La nomenclature de phase est la suivante, qui prendra tout son sens dans les parties III.3.2 et III.3.3.

10 - Préparation du brut

20 - Fraisage

21 - Surfacier 4, Créer 1

22 - Rainurer 5

23 - Percer 3

24 - Prépercer 3

25 - Tarauder 3

30 - Fraisage

31 - Contourner 5

32 - Surfacier 7

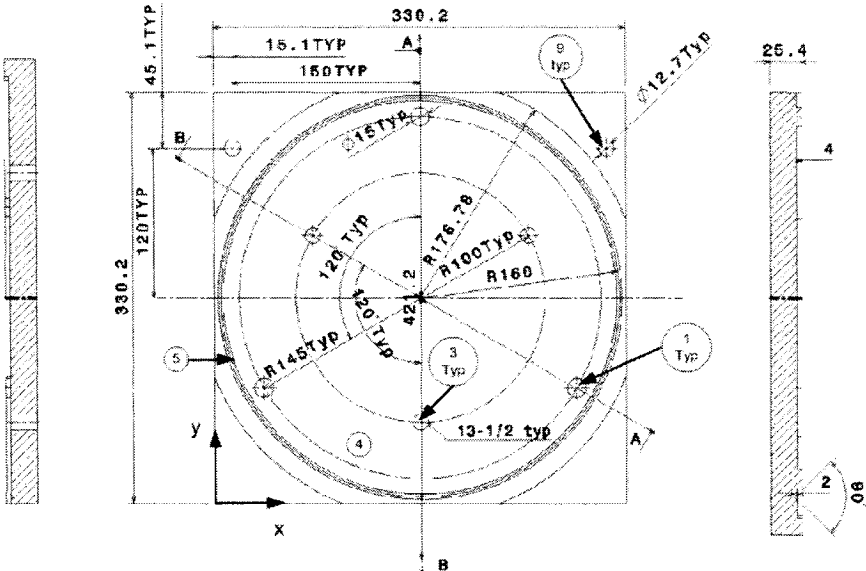
33 - Prépercer 8

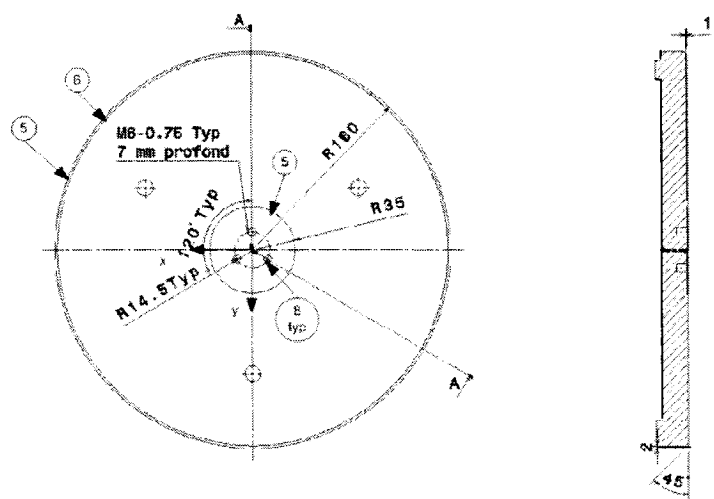
34 - Tarauder 8

35 - Chamfreiner 6

III.3.2 Contrats de phase

Un contract de phases est la présentation, avec dessins, de chacun des posages effectués.

Ecole Polytechnique de Montreal		CONTRAT DE PHASE		PHASE N°20			
				Fraisage			
Pièce: montage circulaire		Matière : Acier 1018	Réf. programme: Phase1.tap				
		Brut: Bloc 13"x13"x1"	Machine : Matsuura MC760-VX				
		Porte-pièces : Bridage sur table					
							
ANALYSE DE LA PHASE			CONDITIONS de COUPE				
Séquences	Désignation des séquences	OUTILS	OUTILLAGE de COUPE	n tr/min	Avance mm/min		
		D mm			Approche	Usinage	Retrait
21	Surfacer 4 – Créer 1	25,4	Fraise 2 tailles	420	500	170	500
22	Rainurer 5	90°	Fraise conique	420	500	170	500
23	Percer 9	12,7	Forêt	700	500	175	500
24	Prépercer 3	11,1125	Forêt	700	500	175	500
25	Tarauder les 3 trous	13-1/2	Tarau				

Ecole Polytechnique de Montreal		CONTRAT DE PHASE		PHASE N°30			
				Fraisage			
Pièce: montage circulaire		Matière : Acier 1018	Réf. programme: Phase2.tap				
		Brut: Pièce phase 20	Machine : Matsuura MC760-VX				
		Porte-pièces : Vissage sur table					
							
ANALYSE DE LA PHASE				CONDITIONS de COUPE			
Séquences	Désignation des séquences	OUTILS	OUTILLAGE de COUPE	n tr/min	Avance mm/min		
		D mm			Approche	Usinage	Retrait
31	Contourner 5	25,4	Fraise 2 tailles	420	500	350	500
32	Surfacer 7	25,4	Fraise 2 tailles	420	500	170	500
33	Prépercer 9	5	Forêt	700	500	105	500
34	Tarauder 8	M6-0,75	Tarau				
35	Chanfreiner 6	90°	Fraise cônica	420	500	170	500

III.3.3 Gamme

Une gamme de fabrication est une présentation détaillée, avec détails et isostatismes, des usinages effectués, avec état de matière après chaque étape.

III.3.4 Isostatismes des différents posages

Les isostatismes sont présentés lors de la gamme à la partie III.3.3.

Les isostatismes ont été déterminés considérant la principale contrainte qui était d'obtenir le résultat final qu'avec deux phases d'usinage (deux posages). Ainsi, nous sommes conscients que l'isostatisme n'est pas réglementaire dans le cas de la deuxième phase.

En effet, il n'y a pas d'appuis pour limiter les degrés de liberté en rotation par rapport à l'axe Z. Les vis utilisées ont donc la double fonction de retenir le montage dans l'axe Z. et de prévenir la rotation autour de l'axe Z.

III.3.5 Dessins ou fichiers montage porte-pièces

Ici, les montages porte-pièces se limitent à brider la pièce au quatre coins à la phase 1 et à viser la plaque dans les trois trous dans la phase II. En effet, puisque cette pièce ne va être fabriquée qu'une seule fois, il est inutile de travailler sur des montages plus élaborés, qui permettrait des mises en référence directes et rapides.

Par contre, pour un élément demandant un montage plus complexe, les dessins ou fichiers des montages auraient été nécessaires.

III.3.6 Choix des outils et des conditions de coupe

Puisque la machine utilisée est une machine à CNC avec des conditions d'usinage à vitesses normales, les conditions de coupe ont été déterminées grâce au *Machinery's handbook*. Les vitesses sont indiquées dans le contract de phase.

Quant aux outils, ils ont été déterminés selon ce qui était disponible au moment de la réalisation de la plaque de montage et sont présentés au tableau III.1.

No d'outil	Type	Diamètre (mm)	Angle (degré)	Commentaires
1	Fraise 2 tailles	25.4		
3	Forêt	6		préperçage pour le M6-0.75
5	Fraise conique		90	
7	Forêt	12.7		
11	Forêt	12.7		préperçage pour le 13- $\frac{1}{2}$

TAB. III.1 Liste des outils

III.3.7 Listes d'outils utilisés par phase

Lors de la réalisation des programmes d'usinage (voir ci-dessous), les vérifications nécessaires ont été apportées pour s'assurer qu'un outil étant utilisé dans les deux phases ait le même numéro dans chacune d'elle.

III.3.8 Programmes CNC

Les programmes d'usinage en code G ont tout d'abord été généré sous format APT à l'aide d'un logiciel de CAO-FAO, Catia V5.

Ensuite, un post-processeur sous Cam-post a été utilisé pour obtenir les parcours en code iso.

La pièce a été réalisée sur la Matsuura du LRFV.

III.3.9 Simulations d'usinages

Les simulations d'usinage ont été réalisées à l'aide du logiciel Vericut de CGTech. En effet, ce logiciel permet la simulation des parcours d'usinage en considérant la machine utilisée, le contrôleur de la machine, et les différents éléments tels que les portes-outils et les fixtures.

Dans le cas qui nous occupe, travaillant en 3 axes, le danger de collision entre le porte outil et les composantes n'est pas un facteur déterminant dans la simulation, dont il a été ignoré.