



**HAL**  
open science

# Grandeurs cinématiques et mesures locales et de champs dans l'interaction homme - structure

Mariana Runcan

► **To cite this version:**

Mariana Runcan. Grandeurs cinématiques et mesures locales et de champs dans l'interaction homme - structure. Autre [cond-mat.other]. INSA de Rouen; Universitatea tehnică (Cluj-Napoca, Roumanie), 2010. Français. NNT : 2010ISAM0023 . tel-00560877

**HAL Id: tel-00560877**

**<https://theses.hal.science/tel-00560877>**

Submitted on 31 Jan 2011

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## **Thèse**

Présentée à

### **L'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen**

pour obtenir le grade de Docteur de l'Institut National des Sciences Appliquées de  
Rouen

spécialité : Mécanique, Génie Mécanique

et à

### **l'Université Technique de Cluj-Napoca**

pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Technique de Cluj-Napoca

---

## **Grandeurs cinématiques et mesures locales et de champs dans l'interaction homme - structure**

par

**Mariana RUNCAN**

Soutenue le 27 novembre 2010 devant le jury composé de :

EL HAMI Abdelkhalak Directeur du jury, INSA de Rouen

ARGHIR Mariana Directeur de thèse, Université Technique de Cluj-Napoca

BORZA Dan Directeur de thèse, INSA de Rouen

SUCIU Mihaela Viorica Examineur, Université Technique de Cluj-Napoca

KARAMA Moussa Rapporteur, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes

ROȘCA Ileana Rapporteur, Université Transilvania de Brașov

Laboratoire de Mécanique de Rouen (LMR) Institut National des Sciences Appliquées de Rouen  
LMR / INSA de Rouen / Technopole du Madrillet, Avenue de l'Université,  
76801 Saint Etienne du Rouvray cedex France

***Résumé de la thèse de doctorat en cotutelle  
intitulée  
« Grandeurs cinématiques et mesures locales et  
de champs dans l'interaction homme-structure »***

**de  
Mariana RUNCAN**

Directeurs de thèse:

Mariana ARGHIR, Université Technique Cluj-Napoca (Roumanie)  
Dan BORZA, Institut National des Sciences Appliquées (France)

Les vibrations qui agissent sur l'organisme humain dans son environnement, au travail, dans les véhicules, dans les transports publics ou n'importe où ailleurs se transmettent par le sol, par les bâtiments et par d'autres moyens. Les vibrations agissent sur l'organisme humain en provoquant des changements dans la composition du sang, dans la structure cellulaire. Il est nécessaire de savoir quelle est la quantité de vibrations, avec quelle intensité et amplitude elles sont transmises par la main et comment elles atteignent l'avant-bras.

Dans la thèse de doctorat on fait un parallélisme dans la mesure des vibrations en utilisant la méthode classique de mesure des vibrations avec le vibromètre et les accéléromètres spécialement adaptés pour le corps humain, par rapport à la méthode optique du Moiré de projection adaptée pour mesurer les vibrations qui agissent sur le corps humain.

Dans la première partie de la thèse sont présentées les grandeurs cinématiques locales ou régionales qui agissent sur le corps humain. La deuxième partie de la thèse décrit les méthodes optiques, par lesquelles on peut mesurer les vibrations produites par les machines-outils sur le système humain main-bras au cours de l'activité au travail. Dans la troisième partie sont donnés les effets négatifs des vibrations qui se produisent sur le système humain main-bras pendant l'exposition aux vibrations. La quatrième partie de cette thèse contient la base théorique des techniques optiques utilisées pour mesurer les vibrations. Le chapitre cinq présente la méthodologie d'expérimentation pour mesurer les vibrations. Les résultats de mesures sont indiqués dans le sixième chapitre de la thèse. Dans le chapitre sept on présente la modélisation mécanique et mathématique du système humain main-bras avec trois degrés de liberté et le dernier chapitre contient les conclusions finales, les contributions personnelles et les directions futures de recherche.

Les déplacements obtenus dans les mesures effectuées sur la main et sur l'avant-bras avec le vibromètre SVAN 958 et par la méthode Moiré de projection sont donnés dans le tableau suivant.

		Par la méthode Moiré de projection	Avec le vibromètre SVAN 958		
		Le déplacement [mm]			
		Axa Ox	Axa Ox	Axa Oy	Axa Oz
Sur la main, avec el tour à vitesse de 800 rot/min	au fonctionnement au ralenti	$7,66 \times 10^{-1}$	$18 \times 10^{-5}$	$18 \times 10^{-5}$	$18 \times 10^{-5}$
	au fonctionnement en charge		$11 \times 10^{-5}$	$13 \times 10^{-5}$	$14 \times 10^{-5}$
Sur la main, avec la machine à percer à vitesse de 180 rot/min	au fonctionnement au ralenti	$4,97 \times 10^{-1}$	$19,8 \times 10^{-4}$	$14,8 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-3}$
	au fonctionnement en charge	$16,61 \times 10^{-1}$	$14,7 \times 10^{-4}$	$11,7 \times 10^{-4}$	$14,6 \times 10^{-4}$
Sur l'avant-bras, avec el tour à vitesse de 800 rot/min	au fonctionnement au ralenti	$5,6 \times 10^{-1}$	$21 \times 10^{-5}$	$13 \times 10^{-5}$	$14 \times 10^{-5}$
	au fonctionnement en charge	$7,5 \times 10^{-1}$	$17 \times 10^{-5}$	$17 \times 10^{-5}$	$17 \times 10^{-5}$
Sur l'avant-bras, avec la machine à percer à vitesse de 355 rot/min	au fonctionnement au ralenti	$6,08 \times 10^{-1}$	$27,7 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^{-4}$	$28,1 \times 10^{-4}$
	au fonctionnement en charge	$5,67 \times 10^{-1}$	$28,1 \times 10^{-4}$	$30,9 \times 10^{-4}$	$10,9 \times 10^{-4}$

Vibrațiile care acționează asupra organismului uman în mediul ambiental, la locul de muncă, în autovehicule, în mijloacele de transport, oriunde se produc vibrații se transmit prin sol, prin clădiri și prin alte mijloace construite pentru că vibrațiile acționează asupra organismului uman producând modificări în componența sanguină, în structura celulei este necesar să se cunoască ce cantitate de vibrații, cu ce intensitate și amplitudine se transmite prin mână și cum ajunge la antebraț etc.

În teza de doctorat se face un paralelism în măsurarea vibrațiilor prin folosirea metodei clasice uzuale de măsurare a vibrațiilor cu vibrometrul și accelerometre special adaptate măsurătorilor pe organismul uman, în comparație cu metoda optică Moiré de proiecție adaptată în premieră pentru identificarea și măsurarea vibrațiilor ce acționează asupra organismului uman.

În prima parte a tezei de doctorat sunt prezentate mărimile cinematice locale și globale ce acționează asupra organismului uman. Partea a doua a tezei cuprinde metodele optice cu ajutorul cărora se pot măsura vibrațiile produse de mașinile-unelte asupra sistemului uman mână-braț în timpul desfășurării activității la locul de muncă. În partea a treia sunt date efectele negative ale vibrațiilor ce intervin asupra sistemului uman mână-braț în timpul expunerii la vibrații. Partea a patra a acestei teze conține baza teoretică a tehnicilor optice utilizate pentru măsurarea vibrațiilor. Capitolul cinci prezintă metodologia experimentală de măsurare a vibrațiilor. Rezultatele măsurătorilor sunt trecute în partea a șasea a tezei. În capitolul șapte este dată modelarea mecanică și matematică a sistemului uman mână braț cu trei grade de libertate iar capitolul opt conține concluziile finale, contribuții personale și direcții viitoare de cercetare.

Deplasările obținute din măsurătorilor efectuate pe mână și antebraț cu vibrometrul și prin metoda Moiré de proiecție sunt date în tabelul următor.

		Prin metoda Moiré de proiecție	Cu vibrometrul SVAN 958		
		Deplasarea [mm]			
		Axa Ox	Axa Oy	Axa Oz	Axa Oz
Pe mână, cu strungul la turația de 800 rot/min	la mersul în gol	$7,66 \times 10^{-1}$	$18 \times 10^{-5}$	$18 \times 10^{-5}$	$18 \times 10^{-5}$
	la mersul în sarcină		$11 \times 10^{-5}$	$13 \times 10^{-5}$	$14 \times 10^{-5}$
Pe mână, cu mașina de găurit la turația de 180 rot/min	la mersul în gol	$4,97 \times 10^{-1}$	$19,8 \times 10^{-4}$	$14,8 \times 10^{-4}$	$4 \times 10^{-3}$
	la mersul în sarcină	$16,61 \times 10^{-1}$	$14,7 \times 10^{-4}$	$11,7 \times 10^{-4}$	$14,6 \times 10^{-4}$
Pe antebraț, pe strung la turația de 800 rot/min	la mersul în gol	$5,6 \times 10^{-1}$	$21 \times 10^{-5}$	$13 \times 10^{-5}$	$14 \times 10^{-5}$
	la mersul în sarcină	$7,5 \times 10^{-1}$	$17 \times 10^{-5}$	$17 \times 10^{-5}$	$17 \times 10^{-5}$
Pe antebraț, cu mașina de găurit la turația de 355 rot/min	la mersul în gol	$6,08 \times 10^{-1}$	$27,7 \times 10^{-4}$	$10 \times 10^{-4}$	$28,1 \times 10^{-4}$
	la mersul în sarcină	$5,67 \times 10^{-1}$	$28,1 \times 10^{-4}$	$30,9 \times 10^{-4}$	$10,9 \times 10^{-4}$

## **AVANT-PROPOS**

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une convention de cotutelle entre l'Université Technique de Cluj-Napoca (Roumanie) et l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen (France).

Cette thèse a été financée par une bourse de recherche de l'Université Technique de Cluj-Napoca pour la période 2006-2009 et a bénéficié de l'appui financier pour les stages universitaires et supérieurs à l'étranger, établie par la décision gouvernementale no. 697-1996, telle que modifiée par H.G. no. 533-1998 (Roumanie) pour une période de huit mois, de l'appui financier de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen et du Laboratoire de Mécanique de Rouen. Elle a également été supportée par le Programme ERASMUS pour une période de trois mois.

## **REMERCIEMENTS**

Mes remerciements vont tout d'abord à mes deux directeurs de thèse, Madame Mariana ARGHIR de l'U.T.C.N. et Monsieur Dan BORZA de l'INSA Rouen. Je vous remercie pour tout ce que vous avez fait pour l'aboutissement de ce travail. Le soutien que vous m'avez accordé m'a permis de réaliser ce travail dans de très bonnes conditions. Tout simplement Merci.

Je remercie Madame Mariana ARGHIR, qui m'a aidé tout au long de cette étude, pour m'avoir prodigué, avec une constance et des qualités humaines et scientifiques exceptionnelles, des encouragements et des conseils, mais aussi en participant activement aux expérimentations. J'ai tout particulièrement apprécié son entière disponibilité. La confiance qu'elle a manifestée en me laissant une liberté d'initiative sur différents aspects m'a été très formatrice. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité et ses qualités humaines et professionnelles, ainsi que la confiance qu'elle a voulu m'accorder. Qu'elle trouve ici toute ma gratitude.

Je remercie Monsieur Dan BORZA qui m'a aidé tout au long de cette étude, avec ses conseils, mais aussi en participant activement aux expérimentations. Il a su encadrer ce travail, en y apportant son expérience scientifique, sur une thématique nouvelle pour son équipe. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité et ses qualités humaines et professionnelles, ainsi que la confiance qu'il a voulu m'accorder. Je le remercie aussi parce qu'il m'a aidé beaucoup pendant la période que j'ai passée à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, dans le laboratoire de Photomécanique.

Je remercie à Madame Codruța - Emanuela BADEA, chef de travaux, qui m'a aidé avec ses conseils et aussi en participant activement aux expérimentations. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité et ses qualités humaines et professionnelles, ainsi que la confiance qu'elle a voulu m'accorder.

Je remercie Monsieur Adrian BOTEAN, chef de travaux, qui m'a aidé avec ses conseils et aussi en participant activement aux expérimentations. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité et ses qualités humaines et professionnelles, ainsi que la confiance qu'il a voulu m'accorder.

Je tiens à remercier les différents membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail: Monsieur EL HAMI Abdelkhalak, Monsieur KARAMA Moussa, Madame SUCIU Mihaela Viorica et Madame ROȘCA Ileana.

Je remercie en particulier pour tous les temps et de l'aide accordée dans la traduction de la thèse. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité et ses qualités humaines et professionnelles.

Je remercie à Mademoiselle Ioana – Theodora NISTEA qui m'a aidé beaucoup pendant la période que j'ai passée à l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen, pour ses encouragements et conseils. J'ai beaucoup apprécié sa disponibilité.

Cette thèse n'aurait pu voir le jour sans les efforts et les sacrifices personnels et économiques de mes parents, de toute ma famille et l'aide de mes amis et collègues.

# SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
 <b>CHAPITRE 1 LES ELEMENTS DE LA CINÉMATIQUE DES VIBRATIONS</b>	
1.1. La classification des mouvements vibratoires.....	7
1.2. La vibration harmonique et les grandeurs caractéristiques de la vibration harmonique.....	11
1.3. La représentation de la vibration harmonique à l'aide des vecteurs de rotation.....	14
1.4. La représentation des vibrations à l'aide des nombres complexes.....	15
1.5. La vibration forcée.....	16
1.5.1. Les vibrations forcées amorties linéaire produites par une force perturbatrice harmonique.....	17
1.5.2. Les vibrations linéaires forcées amorties sous l'action d'un déplacement appliqué au support.....	22
1.6. Les directions de propagation des vibrations dans le corps humain.....	22
1.6.1. Les affections de l'organisme humain dûes aux vibrations mécaniques.....	23
1.6.2. La transmission des vibrations par le corps humain.....	23
1.7. La perception des vibrations par le corps humain.....	24
1.8. D'autres critères pour évaluer les vibrations.....	25
1.8.1. L'intensité des vibrations.....	25
1.8.2. Le degré de perception.....	26
1.9. Les vibrations des machines-outils.....	27
1.9.1. Grandeurs et expressions similaires.....	27
1.10. Conclusions.....	27
 <b>CHAPITRE 2 LA MESURE DES VIBRATIONS MÉCANIQUES PAR TECHNIQUES OPTIQUES. STADE COURANT</b>	
2.1. Notions générales.....	29
2.2. L'interférence des ondes.....	31
2.3. La triangulation.....	33
2.4. La lumière structurée.....	34
2.4.1. Généralités.....	34
2.4.2. Le principe d'application de la technique de la lumière structurée.....	34
2.4.3. Le principe d'utilisation du code Gray.....	35
Exemple de mesure des déformations par la méthode de la lumière structurée avec le code Gray.....	37
2.5. L'interférométrie holographique.....	38
2.5.1. Généralités.....	38
2.5.2. L'enregistrement d'un hologramme.....	39
2.5.3. La lecture de l'hologramme (restitution de l'onde - objet).....	41
2.5.4. L'interférométrie holographique à double exposition.....	42
2.5.5. L'interférométrie holographique par intégration temporelle.....	43
2.5.6. L'interférométrie holographique en temps réel.....	45

2.5.6.1.	L'objet déformé ou déplacé.....	46
2.5.6.2.	L'objet en état de vibration.....	46
2.6.	L'holographie numérique.....	46
2.6.1.	Généralités.....	46
2.6.2.	Le principe général de l'holographie numérique.....	47
2.6.3.	Les avantages de l'holographie numérique par rapport à l'holographie classique.....	50
2.7.	La corrélation d'images numériques.....	50
2.7.1.	Généralités.....	50
2.7.2.	Le principe général de la méthode.....	51
2.7.3.	Les avantages et les inconvénients de la méthode.....	53
2.8.	La vibrométrie Doppler.....	53
2.9.	Conclusions.....	53

### CHAPITRE 3 LES EFFETS DES VIBRATIONS SUR L'ORGANISME HUMAIN. STADE ACTUEL

3.1	Notions générales.....	55
3.2	Les effets des vibrations sur le corps humain.....	55
3.3	Les effets des vibrations transmises au système main-bras.....	56
3.4	Les effets des vibrations à action générale, transmises au corps entier (vibrations globales).....	57
3.5	Les effets physiologiques et pathologiques de l'action des vibrations sur l'homme.....	58
3.6	Les effets nocifs des actions des vibrations sur l'homme.....	59
3.7	La législation.....	60
3.7.1	La norme SR ISO 2631-1/2001. Les vibrations et les chocs mécaniques. L'évaluation de l'exposition humaine aux vibrations globales du corps humain.....	60
3.7.1.1	La mesure des vibrations.....	61
3.7.1.2	L'évaluation des vibrations.....	61
3.7.2	La norme SR EN ISO 5349-1/2003. Les vibrations mécaniques. Les mesures et l'évaluation de l'exposition humaine aux vibrations transmises par la main.....	63
3.7.2.1	L'emplacement et l'orientation des transducteurs.....	64
3.7.3	Guide consultatif de bonnes pratiques de l'Union Européenne visant la Directive 2002/44/CE. Les vibrations main-bras.....	65
3.7.3.1	Les graphiques pour le calcul de l'exposition journalière aux vibrations.....	65
3.7.4	Le calcul de l'exposition journalière aux vibrations par la main.....	68
3.8	Conclusions.....	70

### CHAPITRE 4 NOTIONS DE BASE CONCERNANT LA MESURE OPTIQUE DES VIBRATIONS

4.1	La méthode Moiré de projection.....	71
4.1.1	Généralités.....	71
4.1.2	Le principe du phénomène Moiré.....	71
4.1.3	Le principe de la méthode Moiré de projection.....	73
4.1.4	La mesure du relief d'un objet par projection de franges avec décalage de phase.....	74

4.2	L'interférométrie speckle.....	77
4.2.1	Le principe général de la méthode.....	77
4.2.2	La mesures des déplacements hors plan.....	78
4.2.3	L'interférométrie speckle pour l'analyse des vibrations d'une surface.....	80
4.2.4	Les avantages et les inconvénients.....	81
4.3	Conclusions.....	82

## CHAPITRE 5 LA METHODOLOGIE D'EXPERIMENTATION

5.1	Généralités.....	83
5.2	Le logiciel „Projet” pour la mesure des vibrations par la méthode Moiré de projection.....	83
5.3	L'analyseur de vibrations SVAN 958 et le logiciel pour la mesure des vibrations.....	86
5.4	Le dispositif et l'installation de mesure des vibrations de calibrage.....	88
5.5	La mesure des vibrations par la méthode Moiré de projection.....	91
5.6	La mesure des vibrations avec l'appareil SVAN 958 et l'interprétation des résultats.....	94
5.7	L'étalonnage du matériel de la membrane par la méthode optique.....	98
5.8	Applications expérimentales de la mesure des vibrations et des déformations par les méthodes optiques étudiées.....	100
5.8.1	Application de la mesure des déformations par la méthode de la lumière structurée avec le code Gray.....	100
5.8.2	Applications expérimentales par la méthode de l'interférométrie de Speckles.....	101
5.8.3	Applications expérimentales par la méthode de la corrélation d'images numériques.....	102
5.9	Les expériences au lieu de travail.....	104
5.9.1	Le montage pour la mesure des vibrations sur le tour SNA 500x1000	104
5.9.2	Le montage pour la mesure des vibrations sur la machine à percer verticale Mx750.....	105
5.1	Conclusions.....	107

## CHAPITRE 6 LA MESURE DES VIBRATIONS DU SYSTEME MAIN-BRAS

6.1	Les notions générales et les définitions.....	109
6.2	L'opérateur humain.....	109
6.2.1	La méthode de travail pour les mesures effectuées sur le tour.....	109
6.3	La mesure des vibrations sur le tour avec le vibrometre SVAN 958.....	111
6.3.1	La mesure des vibrations sur la main pendant le fonctionnement au ralenti et en charge du tour SNA 500x1000 avec le vibrometre SVAN 958.....	111
6.3.2	La mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge du tour SNA 500x1000 avec le vibromètre SVAN 958.	120
6.4	La mesure des vibrations sur le tour par la méthode Moiré de projection.....	129
6.4.1	La mesure des vibrations sur la main au fonctionnement au ralenti et en charge sur le tour SNA 500x1000 par la méthode Moiré de projection.....	129
6.4.2	La mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge pour le tour SNA 500x1000, par la méthode Moiré de projection.....	133

6.5	La mesure des vibrations sur la machine à percer verticale avec le vibromètre SVAN 958.....	138
6.5.1	La mesure des vibrations sur la main au fonctionnement au ralenti et en charge de la machine à percer verticale Mx750, avec le vibromètre SVAN 958.....	138
6.5.2	La mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge de la machine à percer verticale Mx750 avec le vibromètre SVAN 958.....	147
6.6	La mesure des vibrations sur la machine à percer verticale par la méthode Moiré de projection.....	156
6.6.1	La mesure des vibrations sur la main au fonctionnement au ralenti et en charge de la machine à percer verticale Mx750 par la méthode Moiré de projection.....	156
6.6.2	La mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge de la machine à percer verticale Mx750 par la méthode Moiré de projection.....	163
6.7	Conclusions.....	167

## CHAPITRE 7 LA MODÉLISATION MÉCANIQUE DU SYSTÈME HUMAIN MAIN-BRAS

7.1	Notions générales.....	169
7.2	Le modèle biomécanique du système humain main-bras avec avec trois degrés de liberté 3-EMB.....	169
7.2.1	Le programme 3-EMB correspondant au modèle 3-EMB du système humain main-bras.....	174
7.3	Conclusions.....	180

## CHAPITRE 8 CONCLUSIONS FINALES, CONTRIBUTIONS PERSONNELLES ET DIRECTIONS DE RECHERCHE

8.1	Conclusions finales.....	181
8.2	Les contributions personnelles.....	181
8.3	La valorisation des résultats des recherches.....	182
8.4	Directions futures de recherche.....	182

## ANEXE

ANNEXE A1	– Les vibrations des systèmes avec un degré de liberté.....	183
ANNEXE A2	– L'évaluation de l'exposition humaine aux vibrations globales du corps.....	189
ANNEXE A3	– Les paramètres de l'appareil SVAN 958.....	193
ANNEXE A4	– La fonction de control de l'appareil SVAN 958.....	194
ANNEXE A5	– Modèle biomécanique du corps humain avec un degré de liberté.....	200
ANNEXE A6	– Le modèle biomécanique du système humain main-bras avec quatre degrés de liberté et avec cinq degrés de liberté.....	205

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	209
----------------------------------	-----

# INTRODUCTION

La thématique de la thèse couvre un domaine interdisciplinaire, comprenant les domaines mathématique, les techniques de mesure des vibrations, l'utilisation des langages de programmation, ainsi que les règles de protection sociale.

Les modèles mathématiques utilisés dans la thèse sont les équations différentielles d'ordre II et leur résolution a été faite par des méthodes numériques appropriées (la méthode Runge Kutta d'ordre 4 et 4,5), (l'Annexe A4).

Les vibrations qui agissent sur le corps humain sont une cause d'inconfort, de malaise ou de douleur et sont en fonction de l'amplitude, la fréquence et la durée des vibrations, mais dans d'autres conditions, elles produisent des états de relaxation et bonne humeur (par exemple le vibromassage). En général, les mouvements vibratoires de grande amplitude provoquent l'inconfort et leur l'interférence avec les activités au travail conduit à une détérioration au fil du temps de la santé de la personne exposée aux vibrations.

Dans la littérature de spécialité, on connaît le fait que les principales causes de la transmission des vibrations à la main sont les outils et les dispositifs dans l'industrie, la construction, l'exploitation minière, où la main serre et presse les outils vibrants.

## Les objectifs de la thèse

La Thèse de Doctorat s'inscrit dans la thématique générale qui se réfère à l'action des vibrations sur le corps humain au lieu de travail et elle a comme objectifs:

- a. effectuer une évaluation quantitative des vibrations qui agissent sur le système humain main-bras dans l'environnement de travail;
- b. la mesure et l'analyse des vibrations mécaniques au lieu de travail, afin de confirmer leur existence et leur transmission à l'opérateur humain;
- c. création d'un modèle biomécanique, qui doit refléter fidèlement le modèle réel du système humain main-bras, la résolution des équations différentielles correspondantes, ainsi que la détermination de la stabilité mécanique du système humain main-bras.

## Le mode de la division du contenu de la thèse:

I. L'état actuel des notions en ce qui concerne les «Grandeurs cinématiques et mesures locales et globales dans l'interaction homme-structure», est mis en évidence dans les chapitres suivants:

1. Les éléments de la cinématique des vibrations.
2. La mesure des vibrations mécaniques par les techniques optiques. L'état actuel.
3. Les effets des vibrations sur l'organisme humain. L'état actuel.

II. Le fondement théorique des notions pour «Grandeurs cinématiques et mesures locales et globales dans l'interaction homme-structure», se trouve dans les chapitres:

4. Le fondement théorique.
  - 4.1 La méthode Moiré de projection avec décalage de phase.
  - 4.2 L'interférométrie speckle.
5. La méthodologie expérimentale.

- III. La validation expérimentale correspondant aux: «Grandeurs cinématiques et mesures locales et globales dans l'interaction homme-structure», dans les chapitres:
6. La mesure des vibrations sur le système humain main-bras
  7. Modélisation mécanique du système humain main-bras.

# CHAPITRE 1

## LES ELEMENTS DE LA CINÉMATIQUE DES VIBRATIONS

### 1.1. La classification des mouvements vibratoires

Le mouvement vibratoire ou oscillatoire est défini comme le mouvement d'un système mécanique, spatialement limité, dans lequel les paramètres géométriques et cinématiques qui déterminent les positions des éléments changent alternativement le sens de variation dans le temps, entre des valeurs bien définies [URS 84].

La vibration ou l'oscillation mécanique est un mouvement cinématique ou dynamique, qui décrit la variation dans le temps d'un ou plusieurs paramètres d'un système mécanique. La vibration d'un système suppose le transfert alternatif d'énergie entre l'énergie potentielle et énergie cinétique. L'énergie cinétique se propage dans le milieu solide adjacent par le chemin des ondes longitudinales et transversales. Si le système est perturbé par rapport à sa position d'équilibre statique ou dynamique par l'application ou l'élimination d'une force, il commence à se déplacer.

Les vibrations de l'organisme humain représentent un complexe d'oscillations mécaniques des corps solides, qui se transmettent directement au corps humain, de fréquences, d'amplitudes, d'accélération et de vitesses différentes, produites de manière continue ou discontinue par les outils, les machines fixes, les moyens de transport pendant l'exercice de leur activité professionnelle.

Les mouvements vibratoires peuvent être classés selon plusieurs critères: selon la variation dans le temps de la loi du mouvement, en fonction de la cause qui produit le mouvement vibratoire; selon la forme de l'équation différentielle du mouvement, le nombre de degrés de liberté et le mode de variation de l'amplitude dans le temps.

En général, pour la production d'une vibration interviennent: la force élastique  $F_e$ , la force résistante  $F_r$  (ou la force d'amortissement  $F_a$ ) et la force perturbatrice  $F_p$ .

La force élastique cherche à ramener le mobile à la position d'équilibre statique ou dynamique, la force de résistance est donnée par le frottement extérieur ou peut être une intérieure et la force perturbatrice agit de l'extérieur et maintient le mouvement oscillatoire.

#### **A. D'après la variation en temps du loi du mouvement:**

- *Le mouvement périodique:* est le mouvement dans lequel tous les éléments du mouvement se répètent identiquement après un intervalle constant de temps  $T$ , appelée période. Après une période, le corps se déplace dans le même sens, avec la même vitesse „ $v$ ” et l'accélération « $a$ » par rapport à la position d'équilibre statique ou dynamique.

Dans la Fig. 1.1. sont donnés des exemples de mouvement périodique d'un système matériel.

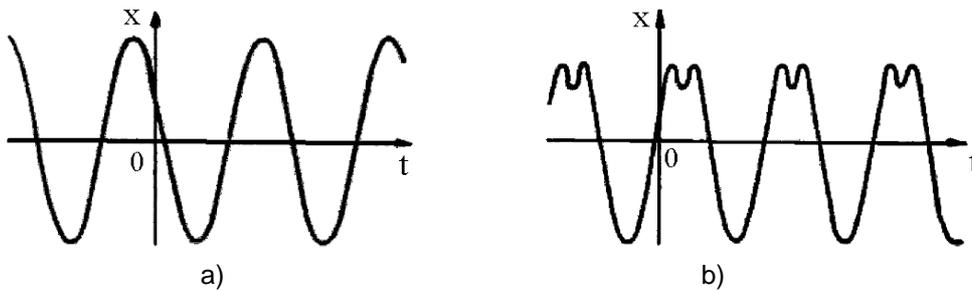


Fig. 1.1. a) et b) Le mouvement vibratoire périodique d'un système matériel, [DAR 83]

**Mathématiquement** - un mouvement périodique d'un point matériel M peut être mis sous la forme:

$$x(t) = x(t + T) \quad (1.1)$$

**Graphiquement** - un mouvement oscillatoire est représenté par un diagramme.

Le diagramme pour un mouvement vibratoire périodique est présenté dans la Figure 1.2, il indique la position dans le temps d'un point du mobile pendant son déplacement sur une direction bien définie, par exemple Ox.

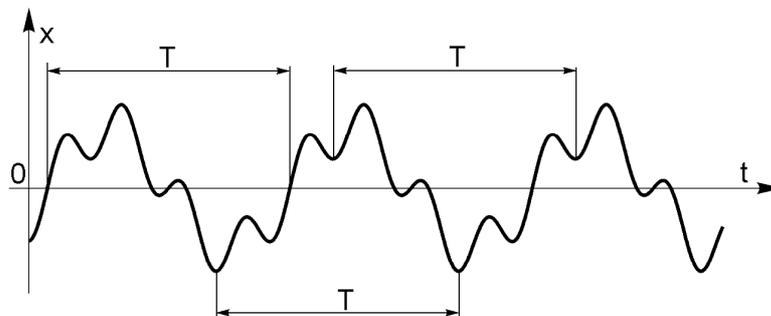


Fig. 1.2. Le diagramme pour le mouvement vibratoire périodique

où:  $x$  – est l'élongation du mouvement, qui donne la position instantanée du mobile par rapport à la position d'équilibre statique ou dynamique [m];

$t$  – est le temps [s];

$T$  – est la période, qui représente l'intervalle de temps constant, d'après lequel le mouvement se répète avec les mêmes caractéristiques [s].

Un mouvement effectué dans une certaine période est appelé **le cycle de vibration périodique**.

Un mouvement périodique peut être approché par une variation sinusoïdale ou cosinusoïdale dans le temps ou une combinaison linéaire entre eux.

▪ *Le mouvement apériodique*: la grandeur physique qui caractérise le mouvement tend vers une valeur constante, lorsque le temps tend vers l'infini (Fig. 1.3.).

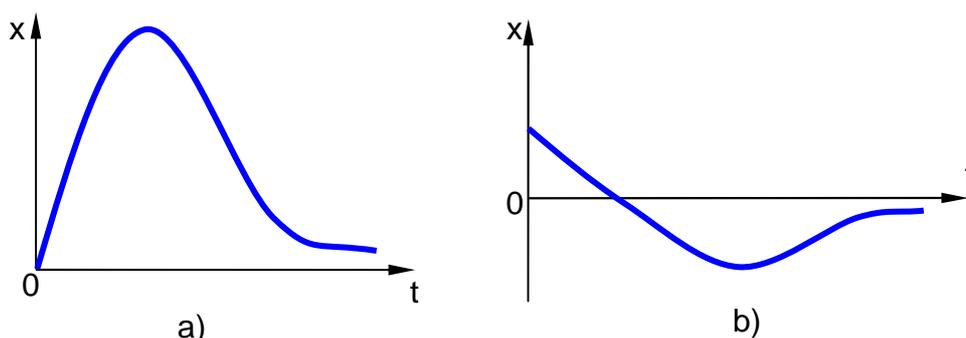


Fig. 1.3. a) et b) Exemples de mouvement apériodique

- *Le mouvement aléatoire* (Fig. 1.4.).

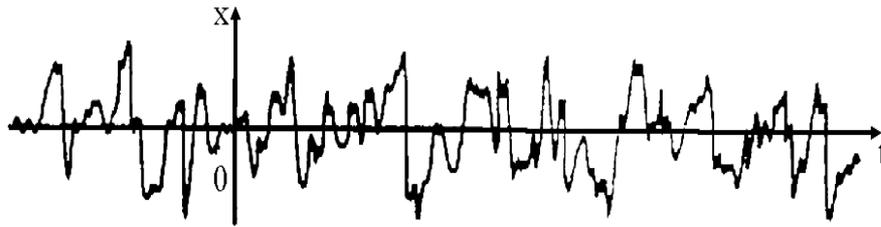


Fig. 1.4. Le mouvement aléatoire [DAR 83]

- *Le mouvement continu* (Fig. 1.5. a) ou *discontinu* (Fig. 1.5 b).

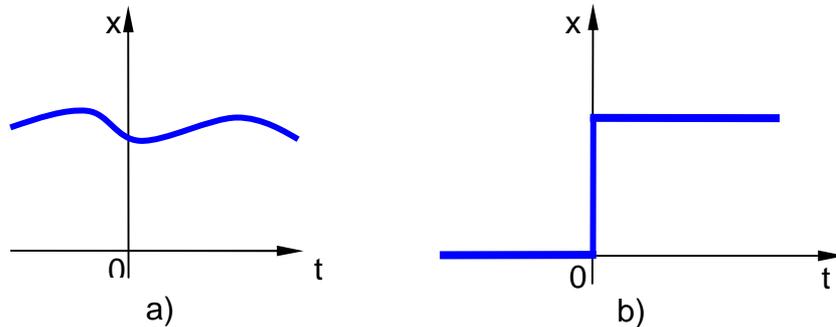


Fig. 1.5 a) Mouvement continu; b) Mouvement discontinu

- *Le mouvement pseudopériodique*: le mouvement est presque périodique. La grandeur physique qui caractérise le mouvement peut être exprimée par la relation:

$$|f(t + \tau) - f(t)| \leq \varepsilon \quad (1.2)$$

où:

$f$  – est la fonction qui contient la loi du mouvement;

$t$  – est le temps [s];

$\tau$  – est l'intervalle de temps après lequel le mouvement se répète [s];

$\varepsilon$  – est une quantité petite et positive.

Si  $\varepsilon \rightarrow 0$ , alors le mouvement se transforme dans un mouvement périodique.

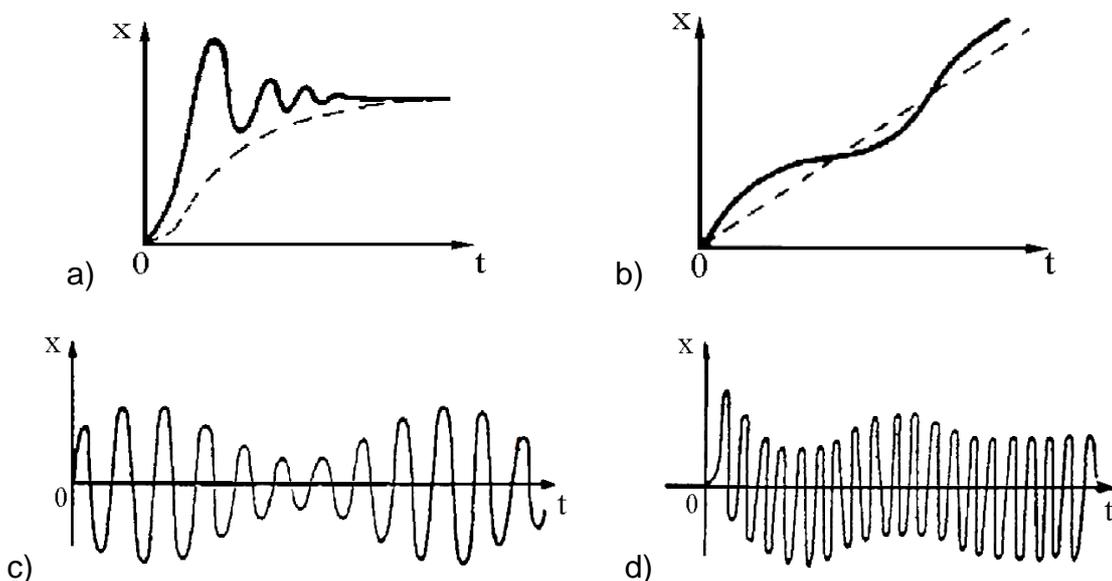


Fig. 1.6. a), b), c) et d) Le mouvement pseudopériodique [DAR 83]

**B. D'après la forme de l'équation différentielle du mouvement:**

➤ Les vibrations linéaires sont celles dans lesquelles le système ou l'équation différentielle qui caractérise le mouvement est linéaire par rapport aux inconnues et aux dérivées du système.

➤ Les vibrations non linéaires: le système d'équations différentielles qui caractérisent le mouvement du système mécanique contient les inconnues et leurs dérivées aux puissances différentes.

**C. D'après la cause qui produit le mouvement vibratoire:**

➤ Les vibrations libres ou propres sont données par des déplacements ou des impulsions initiales, qui cessent immédiatement après le déclenchement du mouvement et la force perturbatrice est nulle ( $F_p = 0$ ). Le caractère du mouvement est déterminé par des propriétés internes du système.

➤ Les vibrations forcées ou maintenues: sont des mouvements vibratoires produits par une force perturbatrice extérieure (indépendante du système) qui agit pendant toute la durée du mouvement, donc la force perturbatrice  $F_p \neq 0$ .

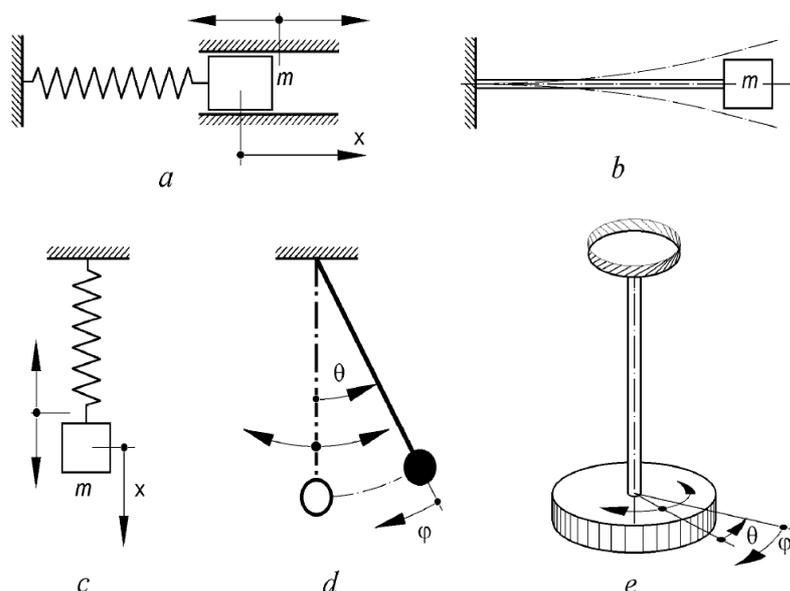
➤ Les vibrations paramétriques: sont des mouvements produits par la variation d'un paramètre du système, comme: la longueur, la masse, le moment d'inertie, la force élastique. La variation du paramètre mécanique du système se produit sous l'action d'une cause extérieure au système.

➤ Les auto-vibrations : sont des mouvements oscillatoires qui apparaissent dus aux causes internes du système. L'énergie nécessaire du mouvement est fournie de l'extérieur, mais les forces de résistance maintiennent les vibrations pendant la durée entière, motif pour lequel elles ont le même signe que la force élastique ( $F_r > 0$ ).

**D. D'après le nombre des degrés de liberté du système:**

Le nombre des degrés du liberté est donné par le nombre de paramètres indépendants, qui ont des variations pendant le mouvement. La classification est:

➤ *Système avec un degré de liberté.* Un corps rigide, dont le mouvement vibratoire consiste dans une translation de direction connue ou une rotation autour d'un axe, a un degré de liberté (Fig. 1.7.).



**Fig. 1.7.** Les systèmes avec un degré de liberté [HER 07]

Les vibrations des systèmes avec un degré de liberté portent des noms spécifiques d'après la nature du mouvement et le mode de sollicitation de l'élément élastique. Ainsi, les Figures 1.7 a et c montrent chacune un exemple de mouvement de translation horizontale ou verticale avec ou sans frottement, les Figures 1,7 b et d donnent un exemple d'oscillation d'un pendule sur horizontale et une oscillation avec une masse  $m$  sur la verticale et la figure 1.7e est un exemple de vibration de torsion.

➤ *Système avec deux (Fig. 1.8) ou un nombre fini de degrés de liberté*, pour lequel le mouvement du système à un moment donné peut être déterminé par deux ou plusieurs paramètres scalaires indépendants.

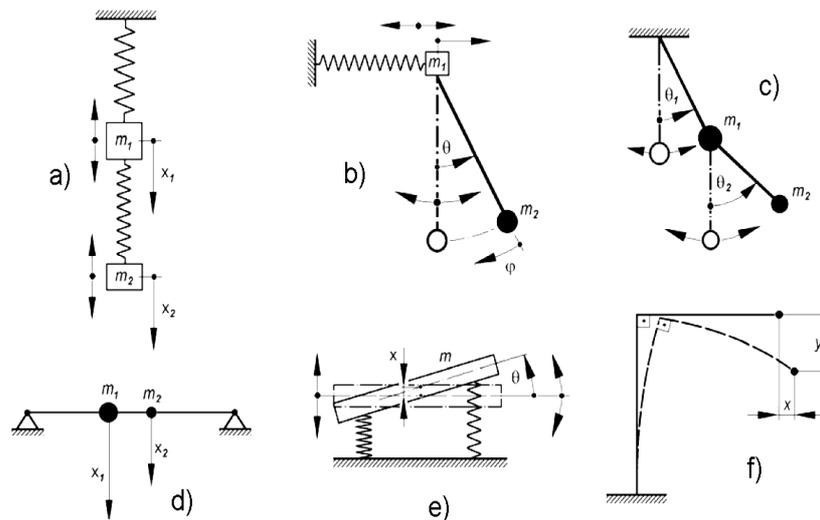


Fig. 1.8. Systèmes avec deux degré de liberté [HER 07]

➤ *Système avec un nombre infini de degrés de liberté*. Ces systèmes sont des systèmes à masse continue, pour lesquels chaque point matériel oscille selon ses propres lois et chaque point matériel a de 1 à 3 degrés de liberté, de sorte que le système entier a un nombre infini de degrés de liberté. L'étude d'un tel système est difficile et nécessite des connaissances particulières d'analyse numérique et différentielle.

**E. D'après le mode de variation de l'amplitude dans le temps:**

➤ *Des mouvements vibratoires amortis*, pour lesquels les amplitudes diminuent dans le temps, dû aux forces de résistance. La diminution de l'amplitude est due à la transformation de l'énergie mécanique du système dans une autre forme d'énergie. Le signe de la force de résistance est considéré négatif, parce qu'elle s'oppose au mouvement ( $F_r < 0$ ).

➤ *Des mouvements vibratoires non amortis*, pour lesquels l'amplitude se maintient constante dans le temps. Les forces de résistance sont considérées nulles ( $F_r = 0$ ) et pendant la durée du mouvement, l'énergie ne se consomme pas.

**1.2. La vibration harmonique et les grandeurs caractéristiques de la vibration harmonique**

La plus simple des vibrations périodiques est la vibration (oscillation) harmonique, dont le paramètre varie sinusoïdal. Si on note avec  $x$  la coordonnée (le paramètre) du mouvement - qui peut être un déplacement linéaire ou angulaire - **la loi de vibration harmonique** est exprimée par une relation - appelée **l'équation du**

**mouvement vibratoire**, qui s'exprime à l'aide des fonctions trigonométriques  $\sin$  ou  $\cos$  et est de la forme [ISP 97]:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.3)$$

où:  $x$  – est appelée élongation [m];

$A$  – est l'élongation maximale, qui est appelée amplitude [m];

$\omega$  – est pulsation de vibration [rad/s];

$\varphi$  – est la phase initiale, nommée phase à l'origine du temps [rad].

Le corps qui exécute le mouvement décrit par l'équation (1.3) traverse périodiquement les mêmes positions après le même intervalle de temps.

L'équation du mouvement (1.3) correspond au diagramme de déplacement de la figure 1.9.

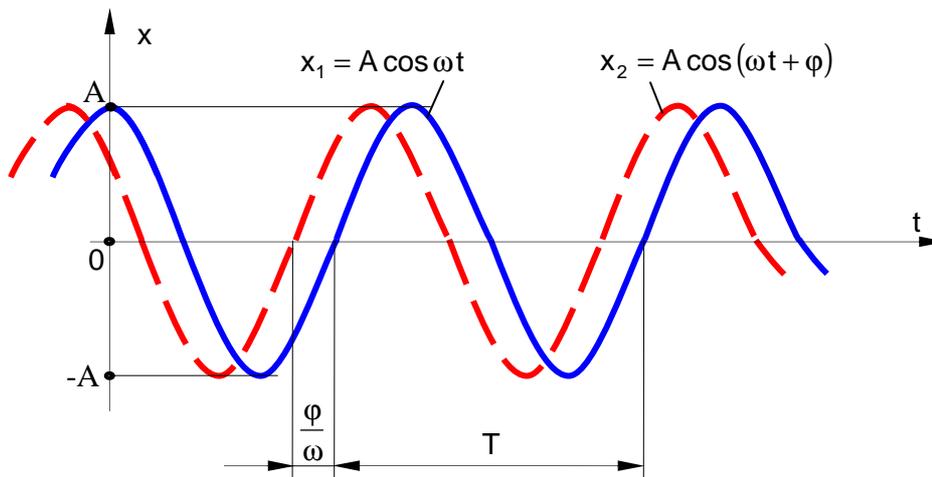


Fig. 1.9 Le diagramme de déplacement

En ce qui suit, pour la compréhension des notions utilisées, on définira les grandeurs qui caractérisent les vibrations, dont:

**L'Élongation**, notée „ $x(t)$ ”, „ $y(t)$ ” ou „ $z(t)$ ”, représente la distance entre la position d'équilibre de la vibration et le mobile à un moment donné, qui peut être un déplacement linéaire ou angulaire.

**L'amplitude de la vibration harmonique**, „ $A$ ”, est le maximum de l'élongation considéré en valeur absolue.

**La période**, „ $T$ ”, de la vibration harmonique est le temps minimum après lequel le mouvement se répète dans une manière identique.

**La fréquence**, „ $f$ ”, de la vibration est l'inverse de la période et représente le nombre d'oscillations faites par unité de temps (secondes). La fréquence se mesure en Hertz ( $1\text{Hz} = \text{s}^{-1}$ ) et s'exprime avec la relation [VOI 83]:

$$f = \frac{1}{T} \text{ [Hz]} \quad (1.4)$$

À une amplitude grande et une fréquence basse de la vibration, le mouvement peut être visible à l'œil libre.

**La pulsation de la vibration harmonique**, „ $\omega$ ”, représente le nombre de vibrations complètes qui ont lieu dans l'intervalle de  $2\pi$  secondes et elle est la dérivée de la phase par rapport au temps. La pulsation se mesure en rad/sec. Il résulte:

$$\omega = 2\pi f \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right] \quad (1.5)$$

La pulsation porte aussi le nom de *fréquence circulaire*.

**La phase du mouvement**, „ $\omega t + \varphi$ ”, représente l’argument de la fonction avec laquelle s’exprime la vibration harmonique (1.3).

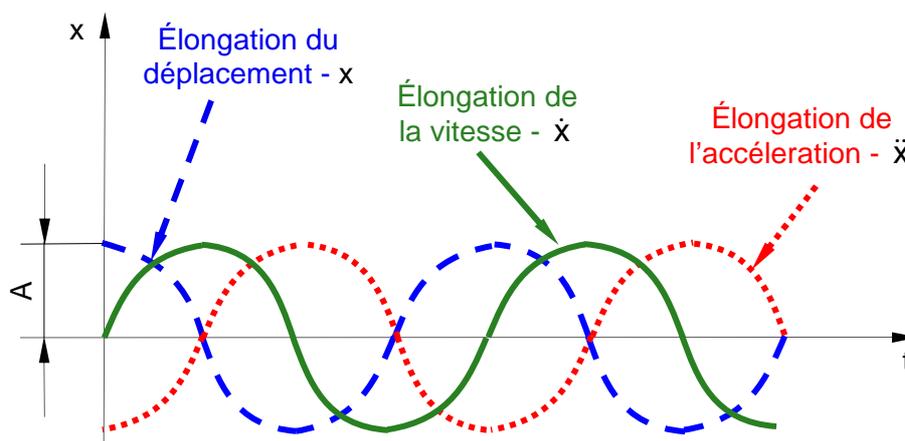
**La différence de phase** ou la phase initiale, „ $\varphi$ ”, représente la différence entre les phases des mouvements vibratoires harmoniques.

En calculant les premières deux dérivées de l’expression (1.3) [DAR 83] par rapport au temps, on obtient respectivement, la loi des vitesses et la loi des accélérations du mouvement harmonique:

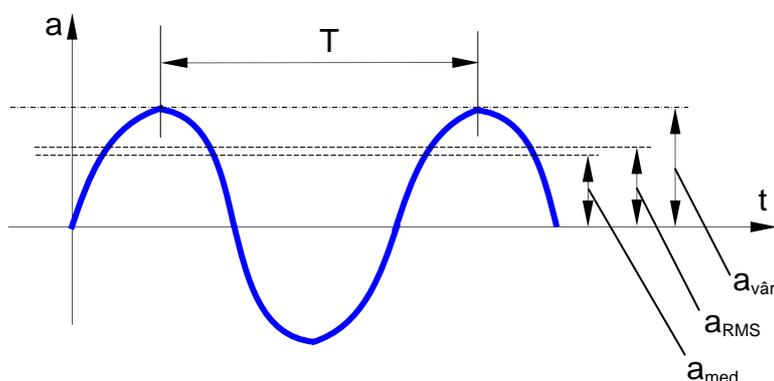
$$v = \frac{dx}{dt} = \dot{x} = -A \omega \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.6)$$

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} = -A \omega^2 \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.7)$$

où  $A\omega$  et  $A\omega^2$  représentent l’amplitude de la vitesse, respectivement l’amplitude de l’accélération du mouvement. La représentation graphique du déplacement, de la vitesse et de l’accélération pour un mouvement harmonique est donnée dans la figure 1.10.



**Fig. 1.10.** La représentation graphique de l’élongation du déplacement, de la vitesse et de l’accélération dans le cas d’un mouvement harmonique



**Fig. 1.11.** La valeur moyenne quadratique, la valeur moyenne et la valeur du pic de l’amplitude dans le cas des vibrations harmoniques (sinusoïdales)

Dans la pratique de la mesure des vibrations on utilise fréquemment la valeur moyenne quadratique de l’amplitude  $a_{RMS}$  (Root Mean Square) qui est représentée dans la figure 1.11 et qui est définie par la relation [ISP 97]:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T A^2(t) dt} \quad (1.8)$$

où : T – est la période du mouvement ou la durée de mesure [s];

t – est le temps [s];

A(t) – est l'accélération [m/s<sup>2</sup>].

Une autre grandeur caractéristique est la valeur moyenne absolue:

$$a_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad (1.9)$$

La valeur du pic,  $a_{pic}$ , est la valeur maximum de l'élongation. Pour une variation sinusoïdale, les relations entre ces grandeurs sont:

$$a_{RMS} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} a_{med} = \frac{1}{\sqrt{2}} a_{pic} \quad (1.10)$$

$$a_{RMS} = F_f \cdot a_{med} = \frac{1}{F_c} a_{pic} \quad (1.11)$$

où  $F_f$  est „le facteur de forme”, et  $F_c$  représente „le facteur de pic” ou „le facteur de crête” qui est défini par les relations suivantes [DAR 83]:

$$F_f = \frac{a_{RMS}}{a_{med}}; \quad F_c = \frac{a_{pic}}{a_{RMS}}, \quad (1.12)$$

Dans le cas des vibrations harmoniques, ces facteurs ont des valeurs [DAR 83]:

$$F_f = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11 \quad (\approx 1 \text{ dB}) \quad (1.13)$$

$$F_c = \sqrt{2} = 1,414 \quad (\approx 3 \text{ dB}) \quad (1.14)$$

où dB représente l'unité de mesure pour l'évaluation subjective de la force du son.

### 1.3. La représentation de la vibration harmonique à l'aide des vecteurs de rotation

Une vibration harmonique peut être représentée par un vecteur de rotation de module constant.

On considère un vecteur  $\overline{OM}$  de module A, qui tourne dans le sens direct trigonométrique, dans un plan Oxy, autour de son l'origine O, avec une vitesse angulaire  $\omega$  constante et la phase initiale (le mouvement initial  $t = 0$ ) (Fig.1.12).

Par la projection du vecteur tournant  $\overline{OM}$  sur les directions Ox et Oy du système rectangulaire, les traces  $M_x$  et  $M_y$  de ses extrémités, effectueront des oscillations alternatives par rapport à l'origine O, au long de ces deux axes de coordonnées; l'équation du mouvement des points  $M_x$  et  $M_y$  est:

$$x(t) = A \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.15)$$

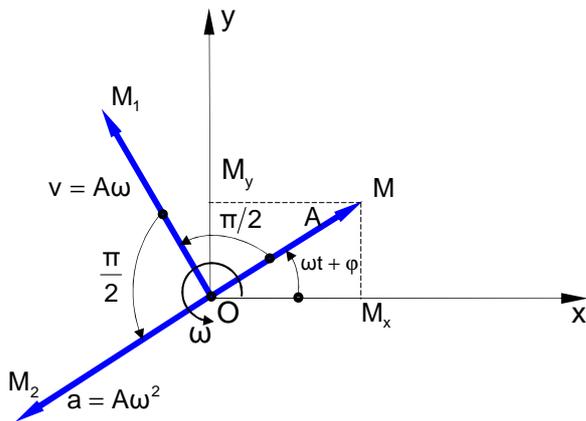


Fig.1.12. La représentation des vecteurs de rotation

de la même forme que l'équation du mouvement (1.3).

Par conséquent, au cours de la rotation avec vitesse angulaire constante  $\omega$  du vecteur  $\overline{OM}$  (de grandeur  $A$ ), les projections  $M_x$  et  $M_y$  de ses extrémités sur les axes  $Ox$  et  $Oy$  effectuent des mouvements oscillatoires harmoniques par rapport au point d'origine  $O$ , la pulsation de ces deux mouvements linéaires oscillateurs sont identiques à la vitesse angulaire de rotation  $\omega$  du vecteur de rotation  $\overline{OM}$  [ISP 97].

Par dérivation par rapport avec le temps de l'équation du mouvement (1.15) résultent les équations de la vitesse et de l'accélération des mouvements harmoniques:

$$\dot{x} = -\omega A \sin(\omega t + \varphi) = \omega A \cos\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1.16)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \cos(\omega t + \varphi) = \omega^2 A \cos(\omega t + \varphi + \pi) \quad (1.17)$$

Dans ces relations  $\omega A$  est l'amplitude de la vitesse,  $\omega^2 A$  est l'amplitude de l'accélération et les vecteurs tournants correspondants sont décalés de  $\pi/2$ , respectivement  $\pi$  en avant par rapport au vecteur initial dans le sens trigonométrique positif.

Dans la pratique, les vibrations ne sont pas purement harmoniques, mais elles sont une combinaison de vibrations qui donnent un mouvement résultant périodique dans le temps.

On peut conclure que l'étude des mouvements vibratoires est beaucoup plus facile par l'utilisation de la représentation vectorielle, la méthode consiste pratiquement dans la composition des projections des vecteurs de rotations.

## 1.4. La représentation des vibrations à l'aide des nombres complexes

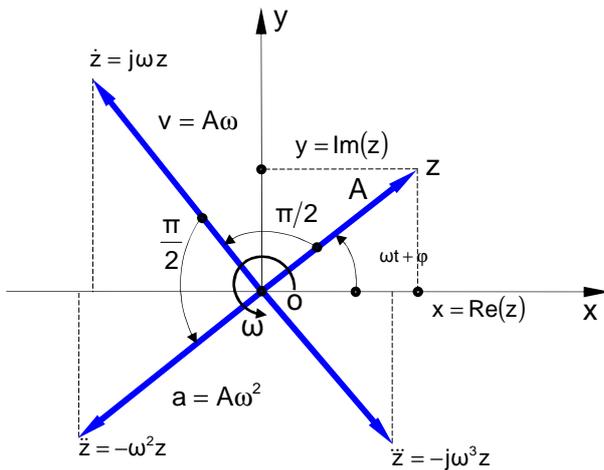
Une autre méthode de simplification de l'étude des mouvements vibratoires et d'opération est donnée par le plan complexe. Dans ce cas, le mouvement oscillatoire est symbolisé par un vecteur tournant dans un plan complexe, dans lequel l'axe des abscisses représente l'axe réel  $Re$  et l'axe des ordonnées représente l'axe imaginaire  $Im$  (Fig.1.13).

Le vecteur tournant est défini par l'affixe  $z$  de son extrémité, selon la relation (1.18):

$$z = A[\cos(\omega t + \varphi) + j \sin(\omega t + \varphi)] \quad (1.18)$$

où  $A$  est le rayon du cercle décrit par le point  $M$ , respectivement le module du nombre complexe, qui peut encore être écrit sous la forme:

$$z = Ae^{j(\omega t + \varphi)} \quad (1.19)$$



**Fig.1.13.** La représentation des vecteurs exprimés par le nombre complexe z et de ses dérivés

Le nombre complexe z de la relation (1.19) exprime, en fait, deux mouvements vibratoires orthogonaux – données par les projections du vecteur tournant sur l’axe réel et, respectivement, sur celui imaginaire – mouvements qui ont les équations de mouvement (1.20):

$$\begin{cases} x = \text{Re}(z) = A \cos(\omega t + \varphi) \\ y = \text{Im}(z) = A \sin(\omega t + \varphi) \end{cases} \quad (1.20)$$

La partie réelle du nombre complexe z exprime le mouvement vibratoire au long de l’axe réel (horizontal) et la partie imaginaire exprime le mouvement oscillatoire au long de l’axe imaginaire (vertical).

On observe la similitude des équations de mouvement (1.20) avec (1.15) de la représentation vectorielle. En écrivant sous la forme complexe la loi du mouvement d’une vibration harmonique, on peut obtenir et représenter sous forme vectorielle les dérivées de l’expression complexe z par rapport au temps, sous une forme simple:

$$\dot{z} = \frac{dz}{dt} = j\omega A e^{j(\omega t + \varphi)} = j\omega z \quad (1.21)$$

$$\ddot{z} = j\omega \frac{dz}{dt} = (j\omega)^2 z = -\omega^2 z \quad (1.22)$$

$$\dddot{z} = (j\omega)^2 \frac{dz}{dt} = (j\omega)^3 z = -j\omega^3 z \quad (1.23)$$

Dans la relations (1.21), (1.22) et (1.23) on peut observer que chaque dérivée est obtenue en multipliant le nombre complexe à dériver avec jω, donc la multiplication de son module avec ω et la rotation du vecteur obtenu avec l’angle π/2 en sens trigonométrique, parce que:

$$j\omega = \omega \left( \cos \frac{\pi}{2} + j \sin \frac{\pi}{2} \right) \quad (1.24)$$

La représentation des vecteurs exprimés par le nombre complexe z et ses dérivées dans le plan complexe est montrée dans la figure 1.13. Si on fait les projections de ces vecteurs sur l’axe réel, on obtient les expressions de la fonction scalaire qui exprime une vibration harmonique, ainsi que ses dérivées.

### 1.5. La vibration forcée

La vibration forcée est le mouvement d’un système mécanique sous l’action d’une excitation continue, pour lequel « mouvement » l’élongation varie dans le temps d’après une loi déterminée ou connue. L’excitation peut être une force appliquée au système ou un mouvement du support qui soutient le système. Le résultat peut être exprimé de différentes manières, selon la nature de l’excitation et selon le mode dans lequel sera utilisé ce résultat.

a). Si dans le système oscillateur sur la masse  $m$  agit une force perturbatrice,  $F_p(t)$ , indépendante des caractéristiques du système (la force qui maintient le mouvement), la masse  $m$  (Fig.1.14.) effectuera des *vibrations entretenues ou forcées*.

b) Si l'excitation est un mouvement du support, la réponse s'exprime habituellement par le rapport entre l'amplitude de la masse et celle du support. Ce mouvement est appelé la transmissibilité de mouvement du système [HAR 68].

L'équilibre des forces qui agissent sur le système permettra d'écrire l'équation différentielle avec des coefficients constants d'ordre deux, hétérogène, pour la vibration forcée qui s'exprime sous la forme:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_p(t) \quad (1.25)$$

avec la solution générale:

$$x = x_1 + x_p \quad (1.26)$$

où  $x_1 = C \cdot e^{nt}$  représente la solution générale de l'équation homogène et  $x_p$  est la solution particulière de l'équation non homogène.

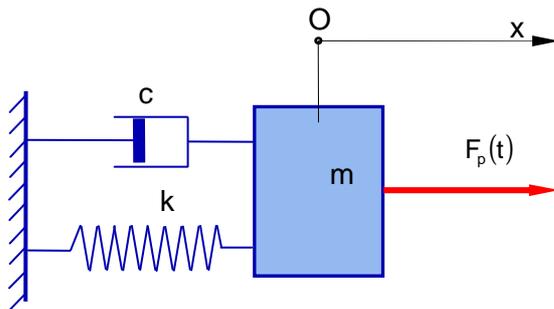


Fig. 1.14. Le système oscillant actionné par une force perturbatrice

L'équation différentielle homogène

de la masse en mouvement vibratoire libre avec un seul degré de liberté est de la forme:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1.27)$$

la solution générale de l'équation homogène est [voir l'annexe A1]:

$$x = C \cdot e^{rt}$$

### 1.5.1. Les vibrations forcées amorties linéaire produites par une force perturbatrice harmonique

Dans la Figure 1.15 est montré le plus simple schéma d'un système mécanique qui décrit un mouvement harmonique forcé [VOI 83]. Sur le corps rigide de masse  $m$  qui est lié à un élément fixe par un ressort de constante  $k$  et par une amortisseur linéaire de constante d'amortissement  $c$ , agit une force perturbatrice:

$$F_p = F_0 \cos \omega t.$$

L'équation différentielle du mouvement sera:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos \omega t \quad (1.28)$$

Si on divise chaque terme par  $m$ , on fait les notations:

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2; \quad \frac{c}{m} = 2n; \quad \frac{F_0}{m} = q \quad (1.29)$$

où:  $\omega_0^2$  – représente le carré de la pulsation propre du system oscillant [ $\text{rad}^2/\text{s}^2$ ];

$n$  – est le coefficient d'amortissement;

$A_0$  – est l'amplitude de la force d'excitation [m];

$q$  – représente l'amplitude de l'excitation de la force qui agit sur l'unité de masse [N/kg] ou [m/s<sup>2</sup>].

En remplaçant les notations (1.29) dans l'équation (1.28), on peut l'écrire sous la forme:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = q \cos \omega t \quad (1.30)$$

L'équation différentielle (1.30) est linéaire, avec des coefficients constants et non homogène. La solution générale de l'équation différentielle non homogène (1.30) est donnée par la somme de la solution générale de l'équation homogène  $x_1$  et une solution particulière  $x_p$  de l'équation non homogène exprimées dans la relation (1.26).

La solution générale de l'équation différentielle homogène est:

$$x_1 = a_1 e^{-nt} \cos(\beta t - \varphi_1) \quad (1.31)$$

La solution générale de l'équation différentielle non homogène est de la forme:

$$x = x_1 + x_p = a_1 e^{-nt} \cos(\beta t - \varphi_1) + C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t \quad (1.32)$$

dans laquelle  $C_1$  et  $C_2$  sont des constantes d'intégration.

En faisant les premières deux dérivées de la solution particulière  $x_p$  de l'équation (1.32), on obtient les équations:

$$\dot{x}_p = -C_1 \omega \sin \omega t + C_2 \omega \cos \omega t, \quad (1.33)$$

$$\dot{x}_p = -C_1 \omega^2 \cos \omega t - C_2 \omega^2 \sin \omega t,$$

En introduisant les expressions (1.32) et (1.33) dans l'équation différentielle (1.30) et en imposant la condition qu'elle soit satisfaite, on obtient [VOI 83]:

$$\begin{aligned} & -C_1 \omega^2 \cos \omega t - C_2 \omega^2 \sin \omega t + 2n(-C_1 \omega \sin \omega t + C_2 \omega \cos \omega t) \\ & + \omega_0^2 (C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t) = q \cos \omega t \end{aligned} \quad (1.34)$$

En effectuant les calculs pour l'équation (1.34), on arrive à une relation de la forme:

$$[C_1(\omega_0^2 - \omega^2) + 2nC_2 \omega] \cos \omega t + [C_2(\omega_0^2 - \omega^2) - 2nC_1 \omega] = q \cos \omega t \quad (1.35)$$

En égalant les coefficients des termes dans les fonctions trigonométriques, on obtiens le système:

$$C_1(\omega_0^2 - \omega^2) + 2n\omega C_2 = q \quad (1.36)$$

$$-2n\omega C_1 + C_2(\omega_0^2 - \omega^2) = 0$$

d'où l'on peut déduire que:

$$C_1 = \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)q}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2} \quad (1.37)$$

$$C_2 = \frac{2n\omega q}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}$$

Ainsi, si on remplace  $C_1$  et  $C_2$  de l'équation générale de l'équation non homogène (1.30) par les relations (1.37), elle devient:

$$x = a_1 e^{-nt} \cos(\beta t - \varphi_1) + \frac{(\omega_0^2 - \omega^2)q}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2} \cos \omega t + \frac{2n\omega q}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2} \sin \omega t \quad (1.38)$$

Le mouvement du système est une superposition de deux vibrations: l'une propre, qui est amortie (le premier terme) et l'autre forcée (les derniers deux termes). Si on tient compte que l'exponentielle  $e^{-nt}$  diminue assez vite vers zéro, la vibration propre peut s'écrire:

$$x \approx C_1 \cos \omega t + C_2 \sin \omega t = a \cos(\omega t - \varphi), \quad (1.39)$$

où:

$$a = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \frac{q}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}} \quad (1.40)$$

$$\varphi = \arctg \frac{C_1}{C_2} = \arctg \frac{2n\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (1.41)$$

En utilisant les rapports  $a/a_0$ ,  $\frac{c}{c_{cr}} = \zeta$  et  $\omega/\omega_0$ , on peut étudier l'amplitude  $A$  et l'angle de phase  $\varphi$  significatif pour la vibration:

où: - avec  $a_0$  on a noté la flèche produite par la force perturbatrice quand  $\omega = 0$ , flèche égale à  $q/\omega_0^2$ ;

- avec  $c$  – on a noté le coefficient d'amortissement
- avec  $c_{cr}$  – on a noté le coefficient d'amortissement critique, la valeur de ce coefficient étant égalé à  $2\sqrt{k \cdot m}$  [VOI 83].

Ainsi, on obtient [VOI 83]:

$$\frac{a}{a_0} = \frac{\frac{q}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4n^2\omega^2}}}{q/\omega_0^2} = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right)^2 + 4 \frac{n^2}{\omega_0^2} \frac{\omega^2}{\omega_0^2}}} \quad (1.42)$$

Si on tient compte des notations faites (1.29), il résulte:

$$\frac{n^2}{\omega_0^2} = \frac{\frac{c^2}{4m^2}}{\frac{k}{m}} = \frac{c^2}{4km} = \left(\frac{c}{2\sqrt{km}}\right)^2 = \left(\frac{c}{c_{cr}}\right)^2 = \zeta^2 \quad (1.43)$$

et l'expression (1.42) devient:

$$\frac{a}{a_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + 4\zeta^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (1.44)$$

Dans la Figure 1.16 on présente une famille de courbes qui, pour différents rapports  $\frac{c}{c_{cr}} = \zeta$ , donne le lien entre les variables adimensionnelles  $\omega/\omega_0$  (la pulsation sur l'axe des abscisses) et  $a/a_0$  (amplitude sur l'axe des ordonnées).

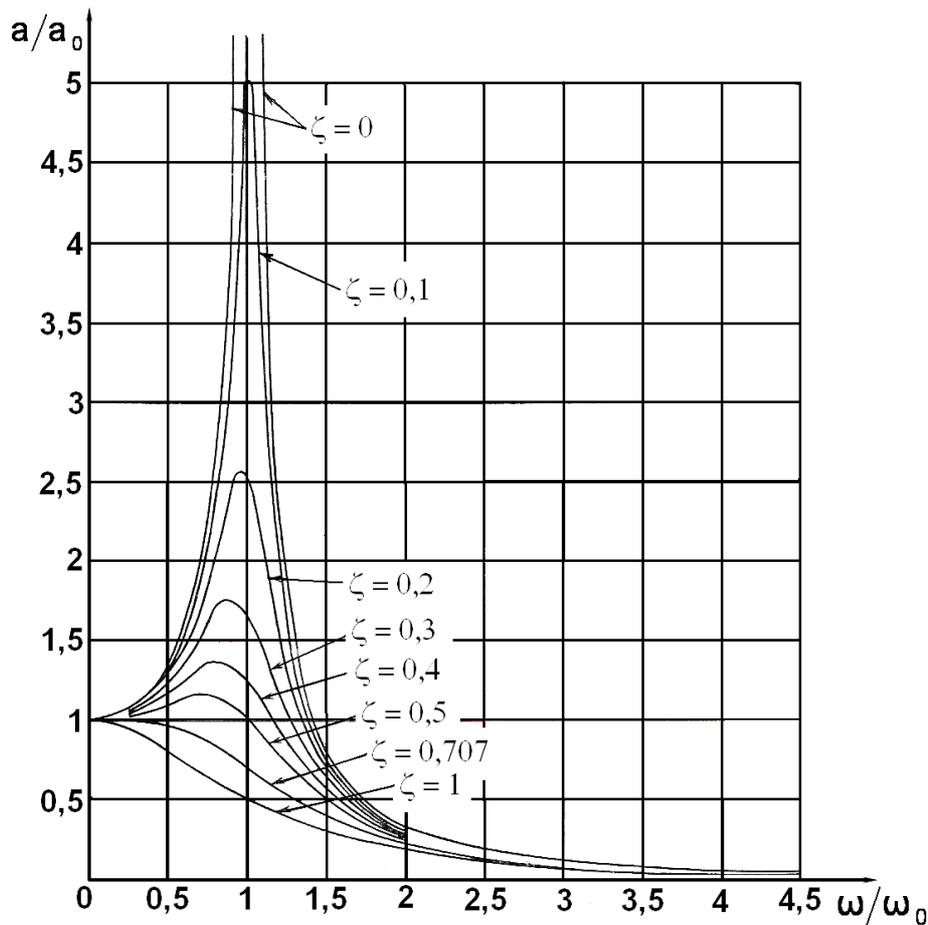


Fig. 1.16. Famille de courbes dans le cas des vibrations forcées avec amortissement en fonction de l'amplitude et de la pulsation [VOI 83]

A la résonance ( $\omega = \omega_0$ ) il résulte que  $\frac{a}{a_0} = \frac{1}{2\zeta}$ . S'il n'y avait pas d'amortissement  $\zeta = 0$  et  $a/a_0 \rightarrow \infty$  [VOI 83].

Quand il y a amortissement, les courbes présentent un maximum dans le voisinage de l'abscisse  $\frac{\omega}{\omega_0} = 1$ . Avec la croissance d'amortissement, la valeur de l'ordonnée maximale décroît et la courbe s'aplatit autour du point de maximum.

L'expression (1.41) de l'angle de phase peut être écrite en fonction des rapports adimensionnels  $\frac{c}{c_{cr}} = \zeta$  et  $\omega/\omega_0$  sous la forme:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2\zeta \frac{\omega}{\omega_0}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}} \quad (1.45)$$

Dans la Figure 1.17 est présentée, en fonction de différentes valeurs du rapport  $\zeta = \frac{c}{c_{cr}}$ , une famille de courbes qui représente la relation entre le rapport  $\omega/\omega_0$  et la phase initiale  $\varphi$ .

On observe que pour  $\zeta = 0$ , l'angle  $\varphi = \operatorname{arctg} 0$ , quel que soit le rapport  $\omega/\omega_0$ . Les seules valeurs possibles sont  $\varphi = 0$  et  $\varphi = \pi$ . La valeur  $\varphi = 0$  correspond à  $\omega/\omega_0 < 1$ , et la valeur  $\varphi = \pi$  correspond à  $\omega/\omega_0 > 1$ . Ainsi, en absence de l'amortissement, pour les valeurs  $\omega < \omega_0$ , la vibration est en phase avec la force perturbatrice et pour les valeurs  $\omega > \omega_0$ , la vibration est en opposition de phase par rapport à la force perturbatrice.

On peut observer que pour  $\omega = \omega_0$ , pour n'importe quel  $\zeta \neq 0$ , on a  $\varphi = \operatorname{arctg} \infty = \pi/2$ . Quand l'amortissement décroît  $\omega < \omega_0$ , le décalage s'accroît entre le mouvement et la force perturbatrice, le mouvement restant derrière la force perturbatrice.

Quand l'amortissement s'accroît,  $\omega > \omega_0$ , le décalage décroît, le mouvement continuant à rester derrière la force perturbatrice.

Pour les rapports  $\omega/\omega_0$  très grands, à toute valeur de l'amortissement, le décalage s'accroît et le mouvement tend à être en opposition par rapport à la force perturbatrice. L'opposition est parfaite, mais seulement en absence de l'amortissement [VOI 83], [RUN 08a].

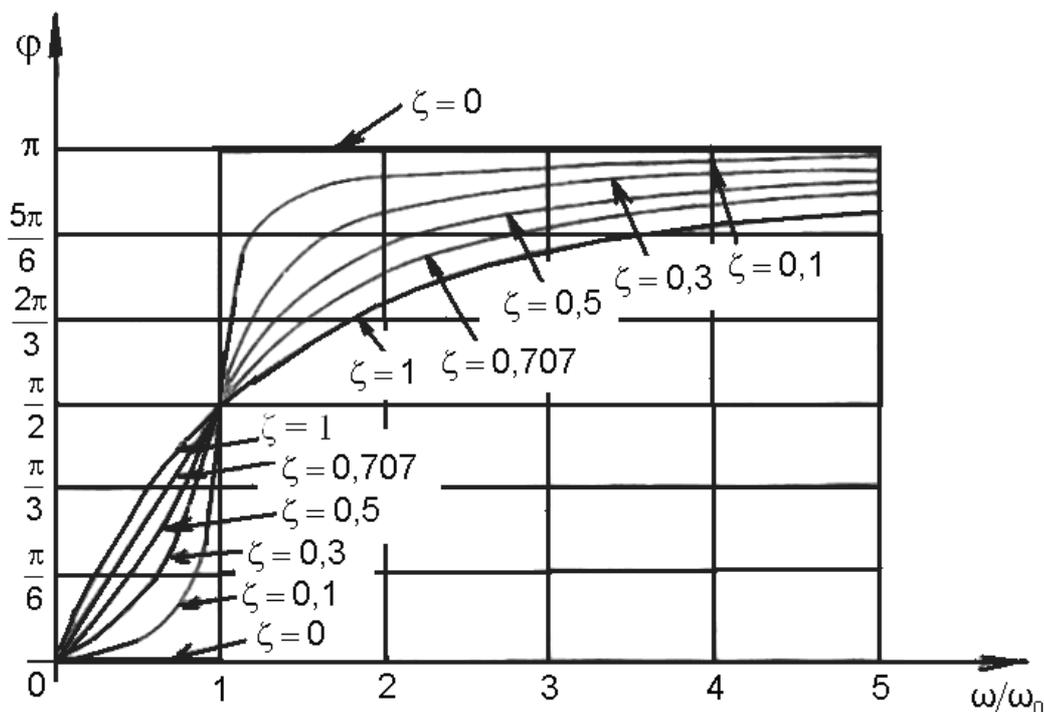
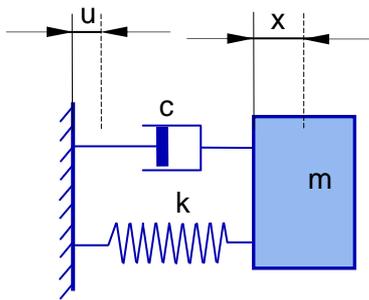


Fig. 1.17 Famille de courbes dans le cas des vibrations forcées avec amortissement en fonction de l'angle  $\varphi$  et de la pulsation [VOI 83]

### 1.5.2. Les vibrations linéaires forcées amorties sous l'action d'un déplacement appliqué au support



**Fig. 1.18.** Système oscillant avec un degré de liberté avec amortissement, excité par une force appliquée au support [VOI 83]

L'équation du système élastique dans la Figure 1.18 est un mouvement  $u(t)$  de son support. L'équation différentielle du mouvement est de la forme:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{u}) + k(x - u) = 0 \quad (1.46)$$

Le mouvement du support est considéré harmonique et il est défini par la relation:

$$u = u_0 \sin \omega t \quad (1.47)$$

En introduisant la relation (1.47) dans l'équation (1.46), on obtient:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cu_0\omega \cos \omega t + ku_0 \sin \omega t \quad (1.48)$$

## 1.6. Les directions de propagation des vibrations dans le corps humain

Les vibrations locales ou régionales se produisent dans les zones de contact du corps avec les pièces en vibration. Le plus souvent en contact avec les sources de vibrations sont les membres (c'est-à-dire les mains et les pieds) et la partie thoracique (les fesses, quand l'homme est placé sur une surface qui vibre) et plus rarement la tête et le dos. La perceptibilité des vibrations transmises à la main ou au bras se fait souvent ressentie dans d'autres parties du corps, la plus souvent à la tête.

L'expression "vibrations locales" suggère le fait que les effets des vibrations sont situés à la proximité du point de contact de la source vibratoire. La durée des effets ne peut pas être déterminée exactement, parce que les vibrations sont transmises de la main au corps et leurs effets se manifestent sous diverses formes [RUN 07].

On connaît le fait que les principales causes de transmission des vibrations à la main sont les outils et les dispositifs de travail dans l'industrie, la construction, l'exploitation minière, là où la main serre et/ou, pousse les outils en vibration.

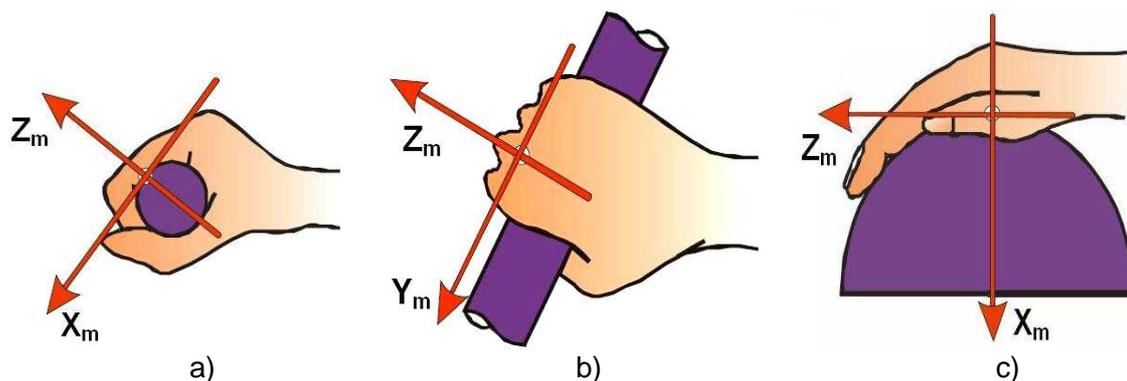
Dans le cas de transmission des vibrations du système main-bras, les sources de vibrations sont en général, des outils rotatifs ou de percussion, à commande électrique, pneumatique ou hydraulique. De cette catégorie font partie: les machines à percer avec percussion, marteaux et burins pneumatiques, plaques vibratoires pour le béton et la terre, pilonneuses mécaniques pour le compactage de la terre etc.

Les vibrations se transmettent au corps humain directement, par le contact avec les outils vibratoires, tels que, par exemple les marteaux pneumatiques, ou indirectement, par l'intermédiaire d'autres objets (un exemple étant la transmission des vibrations de la machine-outil par l'intermédiaire de la structure de résistance du bâtiment à l'homme qui n'a pas un contact direct avec les machines-outils qui produisent des vibrations).

L'amplitude et la fréquence des vibrations, ainsi que la durée d'exposition aux vibrations sont les grandeurs physiques faciles à déterminer expérimentalement. Le mode de transmission des vibrations vers le corps humain est par:

- a) l'action des vibrations sur une partie particulière du corps, le système main-bras étant le plus exposé (Fig. 1.19) [GUI 06a];

b) l'action des vibrations sur le corps entier, correspondant aux positions debout, assis, couché ou dans une position indéterminée (Fig. 1.20 et 1.21).



**Fig. 1.19.** Les axes orthogonaux de transmission des vibrations au système main-bras  
 a, b – la position de serrage avec la main (la main attrape un poignée cylindrique);  
 c – la position avec la paume étendue (la main presse sur un manche sphérique)

Le système de coordonnées (avec l'indice  $m$  de la main) est défini aussi bien pour la position de serrage (Fig. 1.19 a et b) quand la main est fermée que pour le contact de la main avec la source de vibration (Fig. 1.19 c) quand la paume est ouverte.

### 1.6.1. Les affections de l'organisme humain dûes aux vibrations mécaniques

À l'exposition des mains aux vibrations d'amplitudes faibles et de courte durée apparaît l'état de déconfort, malaise ou douleur. On constate moins d'affections provoquées par ce phénomène.

Dans le tableau ci-dessous on présente des exemples de maladies qui apparaissent dues à l'exposition des mains aux vibrations [GRI 90].

**Tableau 1.1**

Cinq types d'affections qui apparaissent dues à l'exposition de la main aux vibrations

Nr. Crt.	Type	L'affection
1.	<b>A</b>	Les affections vasculaires
2.	<b>B</b>	Les affections des articulations et des os
3.	<b>C</b>	Les affections neurologiques périphériques
4.	<b>D</b>	Les affections musculaires
5.	<b>E</b>	Autre affections (par exemple: la vibration transmise sur le corps humain entier du et sur le système nerveux central).

Chaque affection peut résulter d'une combinaison de plusieurs facteurs et il est possible qu'une affection d'un certain type particulier apparaisse comme conséquence d'une autre affection.

### 1.6.2. La transmission des vibrations par le corps humain

La transmission des vibrations dans la position assise se fait par le dos vers le thorax et la tête (Fig. 1.20 a). Il apparaît à la conduite ou à l'utilisation des moyens de transports terrestres, aériens et maritimes, ainsi qu'à l'utilisation des machines agricoles, des outils de construction (pelles, bulldozers) etc. [SR ISO 2631/1], RUN 07].

La transmission des vibrations au corps humain en position debout est faite par les semelles, le mouvement étant transmis aussi au thorax et à la tête (Fig. 1.20 b). Elle apparaît à l'entretien des presses, des machines à river, des marteaux de forge etc. ou à la surveillance des moteurs de grandes dimensions (marins, des ventilateurs etc.) [SR ISO 2631/2].

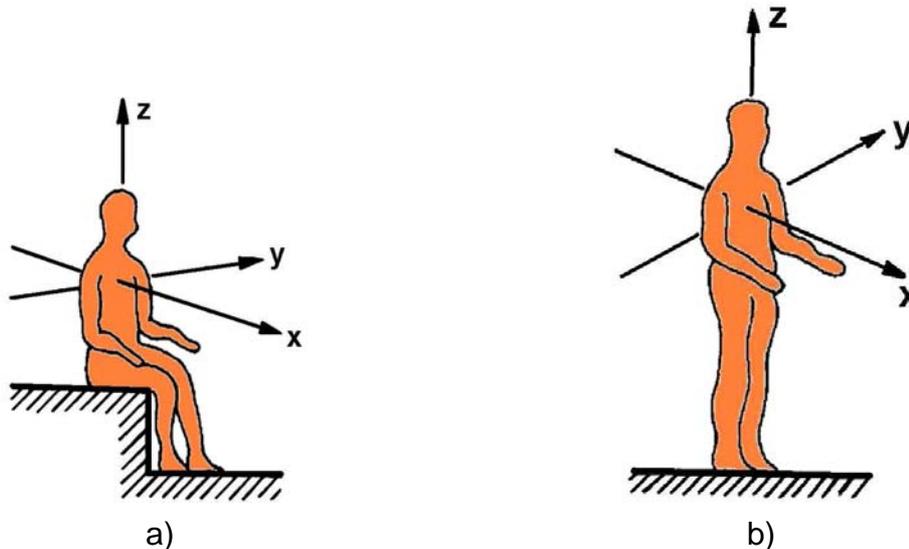


Fig. 1.20. Les directions d'action des vibrations mécaniques transmises au corps humain: a) assit et b) debout

La transmission des vibrations vers le corps humain en position couché se fait par la surface de contact le corps de l'homme - la source de vibration la plus grande (Fig. 1.21.). Elle apparaît au repos dans les cabines des camions ou des bateaux en marche, ainsi qu'à l'utilisation des wagons-lit. La transmission des vibrations au corps humain dans une position quelconque (indéterminée, échangeable) a lieu à l'utilisation des bâtiments ou des pièces trouvées en proximité ou dans les halls de production avec de grandes sources de vibrations, ainsi qu'à l'utilisation des moyens de transports maritimes ou sur le chemin de fer [SR ISO 5349/1], [SR ISO 8727].

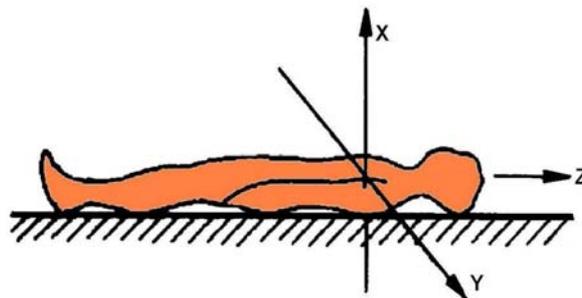


Fig. 1.21 Les directions d'action des vibrations mécaniques transmises au corps humain couché

Les directions de propagation des vibrations dans le corps humain sont:

- L'axe x – de l'arrière à la poitrine
- L'axe y – de droite à gauche
- L'axe z – des pieds à la tête.

## 1.7. La perception des vibrations par le corps humain

L'action des vibrations sur les activités physiques et psychiques de l'homme est peu précisée, en connaissant le fait qu'un facteur important est la fatigue. Si les

accélérations des vibrations sont assez grandes, elles peuvent produire des fractures des os, des lésions aux organes internes, au cerveau, des changements du système circulatoire ou respiratoire. Si les accélérations sont de faible intensité, des phénomènes subjectifs tels que l'inconfort, la douleur ou la peur apparaissent.

On définit un coefficient de sollicitation aux vibrations K (Tableau 1.2), qui tient compte de l'influence simultanée de la fréquence «f» et de l'amplitude de vibration "A" [BRA 90].

**Tableau 1.2**

Le coefficient de sollicitation pour les fréquences entre 1-100 Hz

La fréquence inférieure à 5 Hz	$K = x_0 \cdot f^2$
La fréquence entre 5 Hz et 40 Hz	$K = 5 \cdot x_0 \cdot f$
La fréquence entre 40 Hz et 100	$K = 200 \cdot x_0$

Dans le Tableau 1.3 sont présentés les effets des vibrations sur les activités dans le processus de travail et le mode de perception des vibrations, pour différentes valeurs de K [ISP 84].

**Tableau 1.3**

Escalier de la perception des vibrations par l'homme

Le coefficient de sollicitation K	Le mode de perception des vibrations	L'effet des vibrations sur le travail
0,1	En forme d'ondes linéaires qui commencent à être perçues	Aucun effet sur l'activité
0,1 – 0,3	Perceptibles, moins fâcheuses, supportables pour une durée très longue	Ne pas empêcher les travaux
0,3 – 1	Bien perceptibles, pour une durée longue désagréable, mais supportables	Empêcher les travaux dans une mesure quelconque
1 – 3	Assez puissantes, pour une durée longue désagréable, supportables	Embarrasser le travail, mais encore on peut travailler
3 – 10	Désagréables, insupportables pour une durée longue, tolérables pour maximum une heure	Empêcher le travail, mais peuvent être acceptées
10 – 30	Très désagréables, supportables maximum 10 minutes	À peine, on peut encore travailler
30 – 100	Détestablement, supportables maximum une minute	On ne peut plus travailler
Peste 100	Insoutenables	Impossible de travailler

Le seuil de perception des vibrations du corps humain dépend de plusieurs facteurs: la position du corps, le mode d'action des vibrations, la durée d'exposition, l'amplitude des vibrations.

Dues aux masses différentes des parties du corps de l'homme et aux connexions élastiques entre eux, certaines parties du corps se déplacent les unes par rapport aux autres à la même fréquence perturbatrice, les différentes parties du corps humain ont des amplitudes différentes qui dépendent de la fréquence propre de chaque organe, ou groupes d'organes de l'organisme humain.

## 1.8. D'autres critères pour évaluer les vibrations

### 1.8.1. L'intensité des vibrations

Certaines études caractérisent les vibrations par l'intensité ou le niveau d'intensité de la vibration. D'après Zeller [ZEL 99], l'intensité de vibration est la suivante:

$$Y = \frac{A_0^2}{f} = 16 \cdot \pi^2 x_0^2 f^3 \quad [\text{cm}^2 / \text{s}^3] \quad (1.49)$$

où:  $Y$  – est l'intensité de la vibration [ $\text{cm}^2 / \text{s}^3$ ];  
 $A_0$  - est l'amplitude de l'accélération [ $\text{m}/\text{s}^2$ ];  
 $f$  - est la fréquence [Hz];  
 $x_0$  – est l'amplitude du déplacement [m].

Le niveau d'intensité de la vibration, exprimé en vibrar [DIN 4150], est défini par la relation:

$$S = 10 \log \frac{Y}{Y_s} \quad [\text{vibrar}] \quad (1.50)$$

où:  $Y$  - est l'intensité de la vibration selon la relation (1.49) [ $\text{cm}^2 / \text{s}^3$ ];  
 $Y_s$  - est une valeur de référence de l'intensité de la vibration [ $\text{cm}^2 / \text{s}^3$ ].

En prenant la valeur de référence  $Y_s = 0,1 \text{ cm}^2 / \text{s}^3$ , la relation (1.52) devient:

$$S = 22 \log(x_0^2 f^3) [\text{vibrar}] \quad (1.51)$$

### 1.8.2. Le degré de perception

Pour apprécier le degré de perception des vibrations par l'homme, le niveau de vibration est défini par [ISP 84]:

$$P = 10 \lg \frac{Y}{Y_1} \quad [\text{Pal}] \quad (1.52)$$

où Pal est l'unité de mesure pour le degré de perception des vibrations et si l'on choisit  $Y_1 = 0,5 \text{ cm}^2 / \text{s}^3$ , résulte:

$$P = 10 \lg (2Y) [\text{Pal}] \quad (1.53)$$

D'après DIN 4150 (Deutsches Institut fur Normung), le niveau des vibrations peut être calculé en fonction de la vitesse ou du déplacement:

$$P = 20 \lg 22,4 v; \quad P = 20 \lg 140 x f \quad (1.54)$$

Selon les mêmes règles allemandes, [DIN 4150], le degré de perception des vibrations est présenté dans le tableau 1.4.

**Tableau 1.4**

Le degré de perceptibilité des vibrations

Le mode de perception des vibrations	Le degré de perception des vibrations [Palis]
À peine perceptible	Jusqu'à 5 palis
Bien perceptible	entre 5 et 10 palis
Fortement perceptible	entre 10 et 20 palis
Troubles	entre 20 et 40 palis

## 1.9. Les vibrations des machines-outils

Le processus de traitement sur les machines-outils est toujours accompagné des vibrations, qui affectent négativement premièrement la précision, sans virgule de dimension et de forme des surfaces générées, la qualité de la surface traitée, la durabilité des outils de coupe. Le niveau des vibrations est un facteur limitant la productivité des machines-outils.

Le traitement des métaux et d'autres matériaux est toujours accompagné de vibrations relatives entre la pièce traitée et l'outil. Ces vibrations peuvent se produire à cause des inhomogénéités du matériau traité, des perturbations dans l'entraînement de la pièce ou de l'outil, la coupe intermittente, des vibrations produites dans d'autres machines et transmises par la fondation ou les vibrations autoexcitées des outils [HAR 02]. Ces vibrations sont transmises à l'opérateur humain par contact direct avec la source de vibrations ou par les supports où se trouvent, à la fois, la source des vibrations et l'opérateur humain.

### 1.9.1. Grandeurs et expressions similaires

Dans le Tableau 1.5 sont présentées les grandeurs similaires et les équations correspondant au mouvement de translation et au mouvement de rotation.

**Tableau 1.5**

Les grandeurs similaires et les équations correspondantes [HAR 02].

Mouvement de translation		Mouvement de rotation	
Nom	Symbole	Nom	Symbole
Déplacement linéaire	$x$	Déplacement angulaire	$\alpha$
Force	$F$	Couple	$M$
Coefficient d'élasticité	$k$	Coefficient d'élasticité en torsion	$k_r$
Coefficient d'amortissement	$c$	Coefficient d'amortissement à la torsion	$c_r$
Masse	$m$	Moment d'inertie mécanique	$J$
Force élastique	$F_e = k(x_1 - x_2)$	Le couple des forces élastiques	$M_e = k_r(\alpha_1 - \alpha_2)$
Force de résistance	$F_r = c(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$	Le couple des forces résistantes	$M_r = c_r(\dot{\alpha}_1 - \dot{\alpha}_2)$
Force d'inertie	$F_j = m\ddot{x}$	Le couple des forces d'inertie	$M_j = J\ddot{\alpha}$

## 1.10. Conclusions

Les vibrations produites par les machines et les outillages sont une cause d'inconfort ou de douleur et sont en fonction de l'amplitude, de la fréquence et de la durée d'exposition. Dans d'autres conditions, elles produisent des états de détente et de bonne humeur.

Le corps humain est un système très complexe, mais comme tout corps de la même nature, il peut être approché par un système mécanique composé de masses, d'amortisseurs et de ressorts.

Les vibrations doivent être mesurées selon un système de coordonnées avec l'origine dans un point l'on considère que les vibrations entrent dans le corps humain, sur la surface commune entre le corps humain et le dispositif ou l'organe de machine qui produit ou transmet les vibrations.

L'organisme humain peut être étudié comme un système mécanique dans son ensemble, mais peut être pris en considération aussi par parties. Chacune d'entre eux constitue un système mécanique qui interagit avec les systèmes voisins.

Pour pouvoir étudier le comportement de l'organisme humain dans l'environnement vibratoire, il est nécessaire d'avoir des connaissances dans plusieurs domaines. Parmi ces domaines, on peut mentionner la mécanique et les vibrations des systèmes mécaniques, auxquelles on peut ajouter un autre domaine: la biomécanique.

## CHAPITRE 2

### LA MESURE DES VIBRATIONS MÉCANIQUES PAR TECHNIQUES OPTIQUES. STADE COURANT

#### 2. 1. Notions générales

A l'aide des techniques optiques sans contact dans le cadre de la thèse, on a souhaité mesurer l'accélération, les déplacements et l'amplitude des vibrations qui agissent sur le corps humain au moment du travail sur les machines-outils.

Pour que les techniques optiques puissent être appliquées à la personne humaine il faut soit utiliser un laser impulsif, soit acquérir les images à l'aide d'une caméra rapide (> 10 000 images / s).

La mesure des vibrations mécaniques par les techniques optiques (sans contact) est largement utilisée aujourd'hui dans l'industrie et dans d'autres secteurs de recherche.

Les principales techniques de mesure tridimensionnelle des amplitudes de vibration et de formes 3D sont réalisées par les systèmes de mesure avec contact et sans contact.

La réalisation des mesures tridimensionnelles absolues avec contact est faite à l'aide des capteurs mécaniques, comme par exemple les rugosimètres et les robots multiaxes.

La réalisation des mesures tridimensionnelles sans contact est effectuée à l'aide des capteurs acoustiques (holographie acoustique, techniques de localisation) et aussi par des techniques des mesures absolues (radar, sonar). Les mesures tridimensionnelles sans contact peuvent être réalisées par les capteurs optiques (les mesures absolues par Stéréoscopie, Photogrammétrie, Projection de lumière structurée, Triangulation), mais aussi, on peut faire des mesures relatives par la Méthode Moiré de Projection, l'Interférométrie, Holographie et Holographie numérique.

Les techniques de mesure tridimensionnelle sans contact sont généralement basées sur un principe fondamental optique. Elles sont un moyen complexe et performant d'effectuer des mesures sans contact. Certaines de ces techniques sont basées sur des modèles biologiques qui sont très complexes.

Les techniques de champ utilisent une ou plusieurs caméras CCD (Charge Coupled Device) permettant l'accès aux cartographies des grandeurs physiques. Les grandeurs physiques dont les cartographies peuvent être obtenues: les déplacements, les déformations, les pentes, les courbes ou les coordonnées des points d'une surface. Il existe, dans la littérature de spécialité, de nombreux articles qui proposent des techniques optiques de mesure du relief.

Un capteur CCD est un dispositif électronique complexe contenant un certain nombre de capteurs individuels (photodiodes ou photo-éléments), qui accumulent les charges dans une mémoire. Les données sont ensuite transmises par des registres de déplacement disposés soit en ligne (capteur linéaire) soit en lignes et en colonnes (capteur d'images). La longueur d'un capteur CCD exprimée en pixels, multipliée par la largeur donne la résolution du capteur. Ainsi, un capteur de 1280 x 1024 pixels a une capacité de 1,3 méga pixel (1,3 millions de pixels).

La caméra CCD fournit une image directement en format électronique prête à être transférée et ensuite traitée par ordinateur. Les caméras CCD permettent la miniaturisation et sont compatibles avec les techniques de transmission et traitement informatique des données.

**Les systèmes de projection de lumière structurée** comportent une ou plusieurs caméras et un système de projection des images composées, qui sont, le plus souvent, des lignes parallèles ou croisées, où des matrices de points. Le système de projection peut utiliser la lumière blanche (projection vidéo) ou la lumière laser.

Cette technologie de projection du faisceau laser est très répandue, en général dédiée aux applications spécifiques, telles que la numérisation d'orthèse du tronc, la mesure des cotes d'objets etc.

**La triangulation** est basée sur la loi des triangles et est, sans doute, la plus ancienne méthode de mesure tridimensionnelle.

**La Méthode moiré de projection** est connue pour l'étude des objets de grande taille, cette méthode est présentée en détail au Chapitre 4 de cette thèse, parce qu'elle est une des méthodes de mesure des vibrations.

Le phénomène de moiré apparaît lorsque deux réseaux formés de traits équidistants alternativement opaques et transparents se superposent. Ce phénomène peut se produire naturellement dans la vie courante, quand deux couches de rideaux passent l'une au dessus de l'autre.

Les systèmes de moiré de projection sont destinés à mesurer des déplacements hors plan et des formes 3D. La mesure se fait en temps quasi-réel, avec une sensibilité réduite et réglable (0,1 - 10 millimètres).

Un exemple qui peut être considéré est celui d'un personnage télévisé qui porte des vêtements rayés. Il est alors possible de voir apparaître un réseau de lignes qui ne sont pas souhaitables, à cause de la gêne produite à l'œil de l'observateur. Dans ce cas, c'est la superposition entre le réseau du vêtement porté par le personnage sur l'écran et le réseau des points (pixels) qui permet de créer l'image de notre téléviseur. C'est pour cette raison que les présentateurs des journaux télévisés ne portent jamais des vestes ou des chemises aux rayures.

**Le système d'interférométrie holographique optique** sert à mesurer des déplacements dans une direction quelconque, avec une sensibilité interférométrique. Le principe de l'interférométrie est basé sur la mesure de la différence de chemin optique entre deux ondes.

**Le système d'interférométrie électronique de speckles avec décalage temporel de phase** est sensible par rapport aux déplacements dans le plan (corrélation de speckles) ou hors plan (holographie électronique). Ce système est destiné à mesurer des déplacements dans le plan horizontal et vertical en temps quasi-réel, avec sensibilité interférométrique. Cette méthode est présentée en détail au Chapitre 4 de cette thèse, pour l'identification et la mesure des vibrations.

L'interférométrie holographique utilise la lumière cohérente issue d'une source laser pour produire des figures d'interférence. L'hologramme est un enregistrement des franges obtenues lorsque plusieurs ondes cohérentes interfèrent.

Les caractéristiques communes des techniques optiques présentées dans ce travail sont: l'absence de contact avec l'objet et la mesure simultanée dans l'ensemble des points visibles de l'objet (mesure de champ), ce qui assure une très bonne résolution spatiale.

Avec ces techniques on peut effectuer les mesures suivantes:

- Déformations (et vibrations) – de valeurs faibles;
- Déformations (et vibrations) – de grandes valeurs;
- Forme 3D (coordonnées x, y, z).

## 2.2. L'interférence des ondes

Par l'interférence on comprend la superposition des ondes qui proviennent d'un nombre fini de sources cohérentes discrètes, par laquelle on obtient une distribution de l'intensité de l'onde résultante caractérisée par une succession des maxima et des minima appelée franges d'interférence. Les franges de maximum (lumineuses) alternent avec les franges de minimum (sombre).

L'interférence peut se produire seulement quand les ondes sont cohérentes, de pulsation  $\omega$  bien déterminée.

Les ondes produites à la surface d'un liquide qui se trouve au repos, par deux corps qui touchent régulièrement cette surface, interfèrent de manière constructive dans les points des franges d'amplitude maximale, où apparaissent des points lumineux (plusieurs points lumineux forment une frange lumineuse) et interfèrent de manière destructive dans les points des franges d'amplitude minimale, où apparaissent des points sombres (plusieurs points sombres forment une frange sombre), comme dans la Fig. 2.1 [RUN 08b], [RUN 08c].

On peut obtenir la distribution de l'onde résultante par la superposition des ondes qui proviennent de deux sources cohérentes.

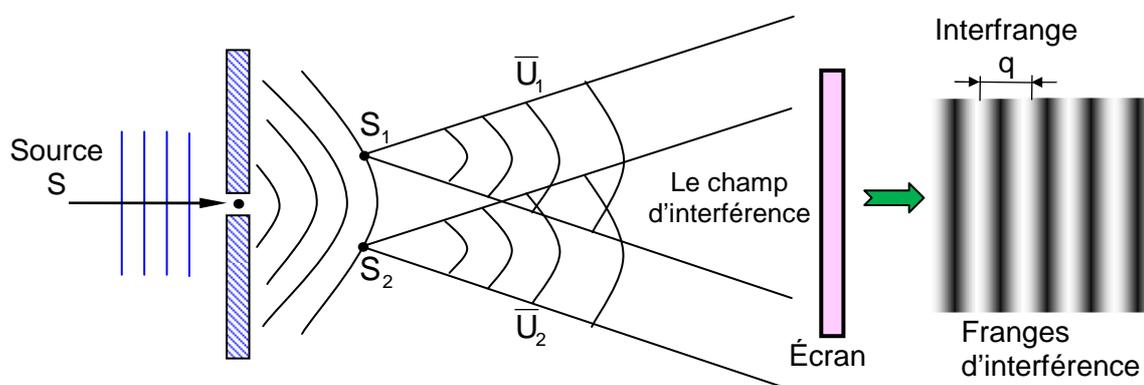


Fig. 2.1 L'interférence des ondes [RUN 08b], [RUN 08c]

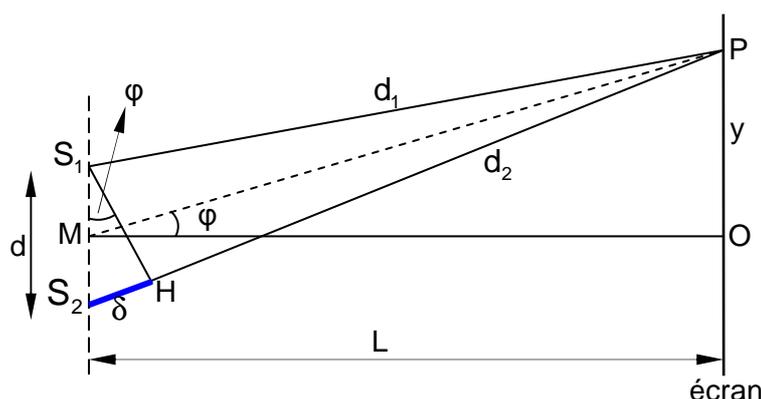


Fig. 2.2 La différence de chemin entre les deux ondes [RUN 08b], [RUN 08c]

La distance qui sépare deux franges lumineuses ou deux franges sombres est l'interfrange. On la note avec  $q$ ; elle a la dimension d'une longueur et elle est donnée par la relation:

$$q = \frac{\lambda L}{d} \quad (2.1)$$

où:  $\lambda$  – est la longueur d'onde de la lumière monochromatique [m];

$L$  – est la distance de la source à l'écran [m];

$d$  – est la distance entre deux sources [m], représenté dans la Fig. 2.2.

Si  $\bar{U}_1$  est l'amplitude complexe de l'onde qui provient de la source  $S_1$ , et  $\bar{U}_2$  est l'amplitude complexe de l'onde qui provient de la source  $S_2$ , l'intensité de l'onde résultante est maximale si:

- les pulsations  $\omega_1$  et  $\omega_2$  des deux ondes sont égales:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega;$$

- les deux ondes sont polarisées linéairement dans la même direction;
- la différence entre les phases initiales des deux ondes est constante.

Dans un point P du plan d'observation (l'écran), (Fig. 2.2), la différence de chemin entre les deux ondes est:

$$\delta = d_1 - d_2 \quad (2.2)$$

Leur déphasage est:

$$\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad (2.3)$$

Dans le triangle  $S_1S_2H$ , on a:

$$\sin\varphi = \frac{\delta}{d};$$

Dans le triangle MOP, on peut écrire:

$$\tan\varphi = \frac{y}{L};$$

L'angle  $\varphi$  est très faible car  $L \gg d$ . Dans ce cas:

$$\sin\varphi \approx \tan\varphi;$$

on en déduit que la différence de chemin est:

$$\delta = \frac{dy}{L}.$$

Compte tenu des conditions imposées aux ondes, on peut exprimer mathématiquement une onde  $\bar{U}$  d'amplitude  $U$  et de phase  $\varphi$  par une expression complexe de la forme:

$$\bar{U} = U \cdot e^{i\varphi}, \quad (2.4)$$

où „i” est:

$$i = \sqrt{-1}$$

Alors les équations des deux ondes seront:

$$\bar{U}_1 = U_1 \cdot e^{i\varphi_1} \quad (2.5)$$

$$\bar{U}_2 = U_2 \cdot e^{i\varphi_2}$$

L'interférence est donnée par la somme des deux ondes par l'équation:

$$\bar{U} = \bar{U}_1 + \bar{U}_2 = U_1 \cdot e^{i\varphi_1} + U_2 \cdot e^{i\varphi_2} \quad (2.6)$$

L'intensité de l'onde résultante est égale au produit entre l'amplitude complexe et sa conjuguée et on obtient [BRE 03]:

$$I = (\bar{U}_1 + \bar{U}_2) \cdot (\bar{U}_1 + \bar{U}_2)^* = \bar{U}_1^2 + \bar{U}_2^2 + \bar{U}_1 \cdot \bar{U}_2^* + \bar{U}_1^* \cdot \bar{U}_2 \quad (2.8)$$

où

$$\bar{U}_1 \cdot \bar{U}_1^* = \bar{U}_1^2 = I_1$$

et

$$\bar{U}_2 \cdot \bar{U}_2^* = \bar{U}_2^2 = I_2 \quad (2.9)$$

Comme :

$$z + z^* = 2\Re_e(z)$$

alors:

$$\bar{U}_1 \cdot \bar{U}_2^* + \bar{U}_1^* \cdot \bar{U}_2 = 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \varphi \quad (2.10)$$

Avec ces conditions, l'intensité de l'onde résultante est:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \varphi. \quad (2.11)$$

Le terme  $2\sqrt{I_1 \cdot I_2} \cos \varphi$  est le terme d'interférence. Quand ce terme s'annule, apparaît l'interférence destructive, situation dans laquelle les ondes sont en opposition de phase, alors il apparaît des points sombres. Quand ce terme est présent se produit l'interférence constructive, alors les ondes sont cohérentes, en phase, et il apparaît des points lumineux.

### 2.3. La triangulation

La triangulation est une méthode mathématique de détermination des distances géométriques.

La méthode consiste à déterminer les coordonnées d'un point de référence, puis de mesurer avec précision la distance jusqu'à un autre point connu, afin de disposer d'une base dont les coordonnées sont connues. Il devient ensuite possible de construire la triangulation qui lie cette base à un troisième point, en utilisant la détermination des fonctions trigonométriques sinus et des cosinus: la connaissance

d'un côté du triangle et des deux angles adjacents permet la détermination de l'ensemble du triangle.

La Fig. 2.3 montre le principe de la triangulation. Il est possible de l'appliquer aux méthodes de reconstruction tridimensionnelle par projection de lumière.

La triangulation est implémentée par la projection sur la surface d'un objet d'un faisceau (ou rayon) laser. La ligne de contact du faisceau avec la surface est captée avec une caméra CCD. Le déplacement de l'objet permet d'obtenir

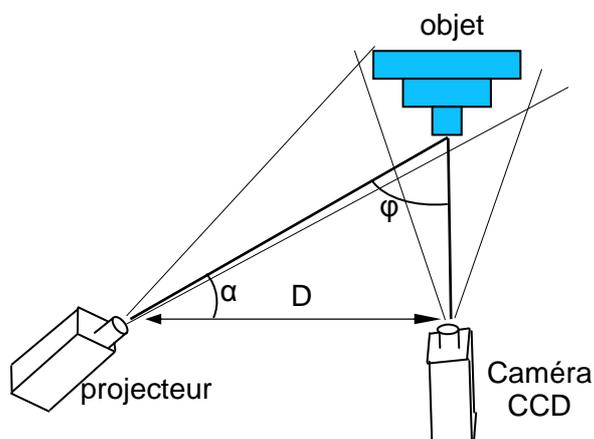


Fig. 2.3 Principe de la triangulation

un profil de la surface dont la profondeur est obtenue en évaluant la distance entre chaque point de contact du faisceau avec la surface et le plan de référence.

## 2.4. La lumière structurée

### 2.4.1. Généralités

Mesurer la forme d'un objet présente un grand intérêt, tant dans l'ingénierie que dans d'autres secteurs d'activités (médecine, arts, biens de consommation, contrôle de qualité, topographie, fabrication etc.). Elle peut être réalisée par une technique de projection de lumière structurée.

La technique de projection de lumière structurée consiste à analyser un réseau de lignes projetées sur la surface d'un objet (plan ou forme plus complexe) avec un angle connu. Elle est produite à l'aide d'un projecteur de réseaux. Les réseaux projetés sont binaires et composés de lignes verticales, horizontales ou croisées.

Les techniques de projection de lumière structurée les plus utilisées sont celles qui consistent à projeter des réseaux avec un code Gray.

Le code Gray est un code binaire particulier utilisé plus généralement dans le domaine électronique [SAN 99].

Pour cette technique on peut parler du travail de Sansoni [SAN 97], [ROD 99].

### 2.4.2. Le principe d'application de la technique de la lumière structurée

La forme de la lumière la plus souvent utilisée est produite dans la configuration d'un faisceau des rayons de lumière en forme d'éventail. L'intersection de ce réseau de rayons de lumière avec un objet forme une ligne lumineuse sur cet objet. En visualisant cette ligne lumineuse sous un angle déterminé, les déformations de cette ligne peuvent être traduites en variations de hauteur, comme dans la Fig. 2.4 [BOC 05].

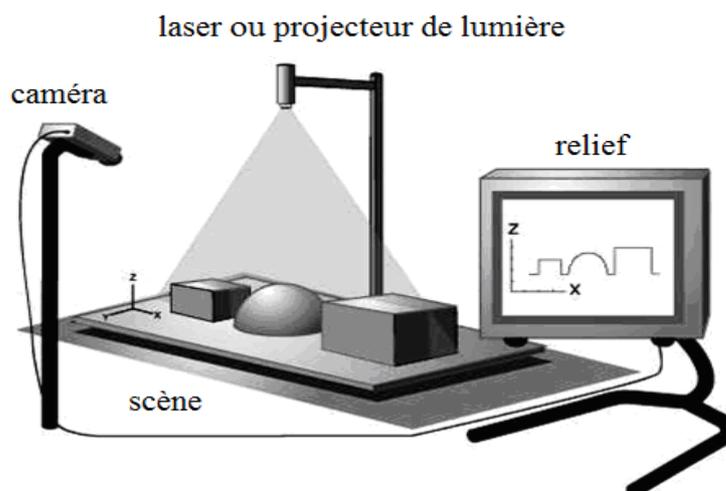
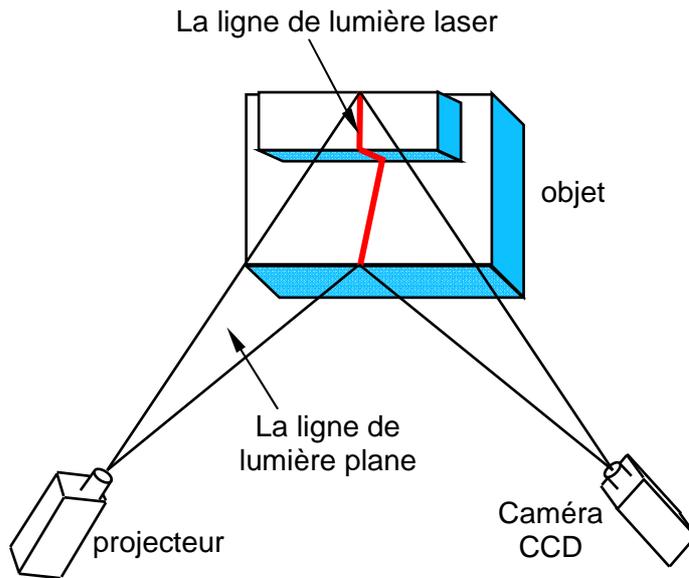


Fig. 2.4 Schématisation de la reconstruction du relief à l'aide de la lumière structurée [BOC 05]

En passant la lumière au dessus de l'objet, on peut acquérir une information tridimensionnelle concernant la forme de l'objet. La méthode est, dans ce cas, dénommée triangulation active.

Dès l'instant où la lumière structurée permet la détermination de la forme d'un objet, dans les applications de machines de vision, elle peut aussi être utilisée pour identifier et localiser un objet dans un environnement.



**Fig. 2.5** Le principe de la technique de la lumière structurée structurée

La figure 2.5 présente schématiquement le principe de la technique de lumière structurée. Le projecteur projette une nappe de lumière plane sur la surface de l'objet formant une ligne lumineuse. La ligne lumineuse est modulée par la variation de la profondeur de la surface de l'objet. La caméra CCD est utilisée pour capter l'image de l'objet avec des lignes modulées de lumière pour obtenir une information 3D de l'objet [WEI 05].

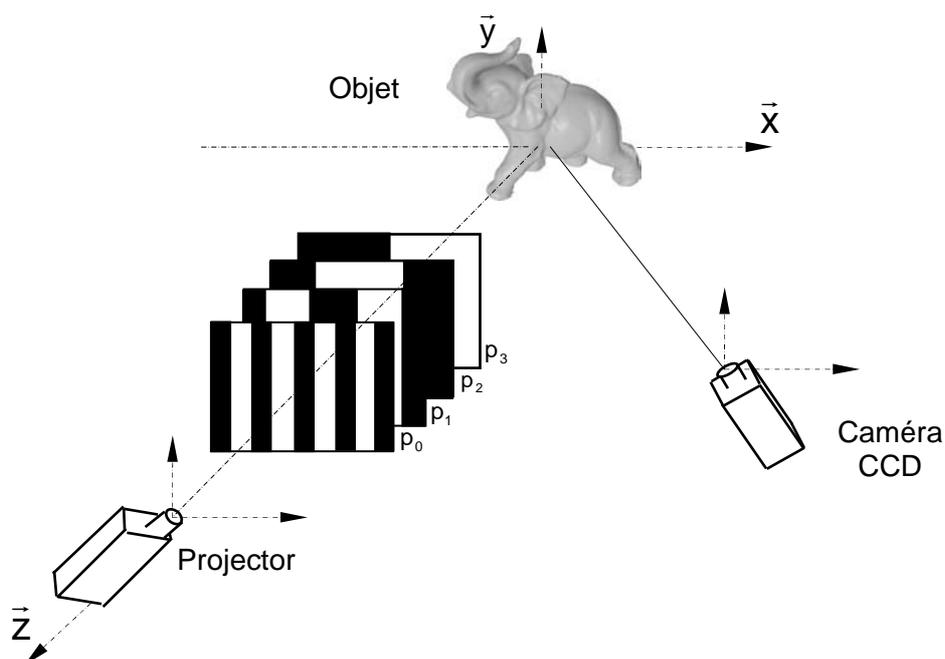
La technique de la lumière structurée ressemble à la technique de scanner avec laser, sauf que dans ce cas, il n'est plus projeté seulement un point, mais une image entière.

### 2.4.3. Le principe d'utilisation du code Gray

Le montage expérimental est indiqué à celui de la technique du moiré de projection.

La technique des codes Gray permet la description unique des différentes directions de projection dans un environnement bien connu, en utilisant le code Gray d'une distance. Le nombre de directions de projection peut correspondre au nombre de mots du code. Ainsi, plus ce nombre est grand, plus la gamme des grandeurs est plus large, parce qu'à chaque direction de projection est associée à un mot du code.

Le schéma de principe d'utilisation du code Gray est représenté sur la Fig. 2.6 [BRE 02].



**Fig. 2.6** Schéma de principe pour l'utilisation du code Gray [BRE 02]

Le principe de cette technique de mesure est le suivant: les quatre images du réseau binaire (Fig. 2.6) sont projetées successivement sur l'objet. Pour chacune d'entre elles, on obtient quatre images résultantes avec du système d'observation. En superposant les quatre images résultantes et en utilisant le code Gray, on obtient un champ numérique. On effectue une triangulation entre le champ numérique imposé (au niveau du projecteur) et celui observé (au niveau de la caméra) et on détermine ainsi le relief.

Le Tableau 2.1 représente le codage du code Gray pour un mot de quatre bits. Les colonnes  $C_0, C_1, \dots, C_{15}$  sont les mots du code.

Tableau 2.1. Séquences du code Gray pour un nombre de quatre images [SAN 99]

Bits mot	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$	$C_{10}$	$C_{11}$	$C_{12}$	$C_{13}$	$C_{14}$	$C_{15}$
$p_3$	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
$p_2$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
$p_1$	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
$p_0$	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
Valeur numérique	0	1	3	2	6	7	5	4	12	13	15	14	10	11	9	8

Les images associées au code Gray de quatre bits sont représentées sur la Fig. 2.7. Par convention, le niveau 0 correspond au noir et le niveau 1 au blanc, [GUH 01], [WUH 06].

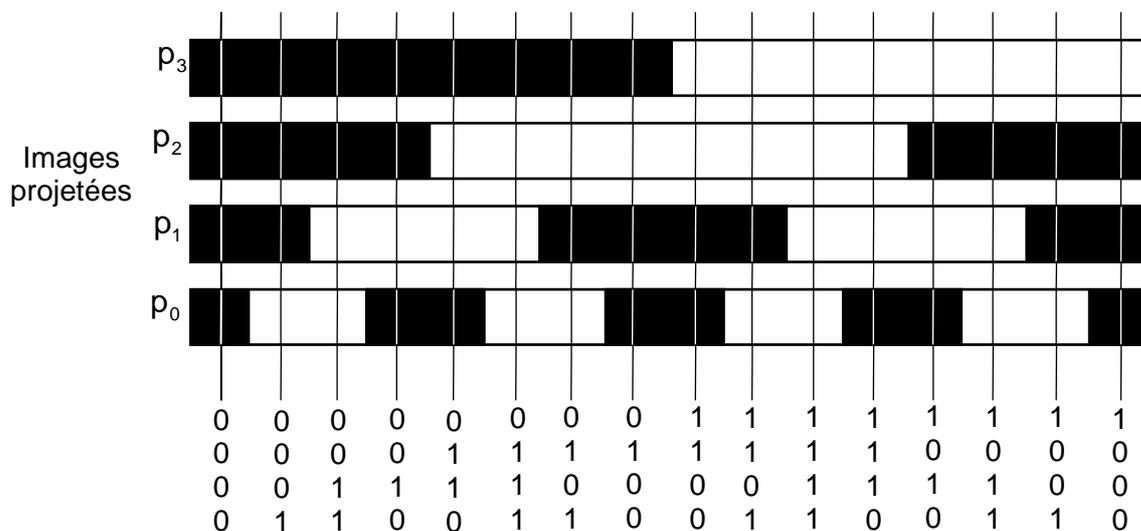


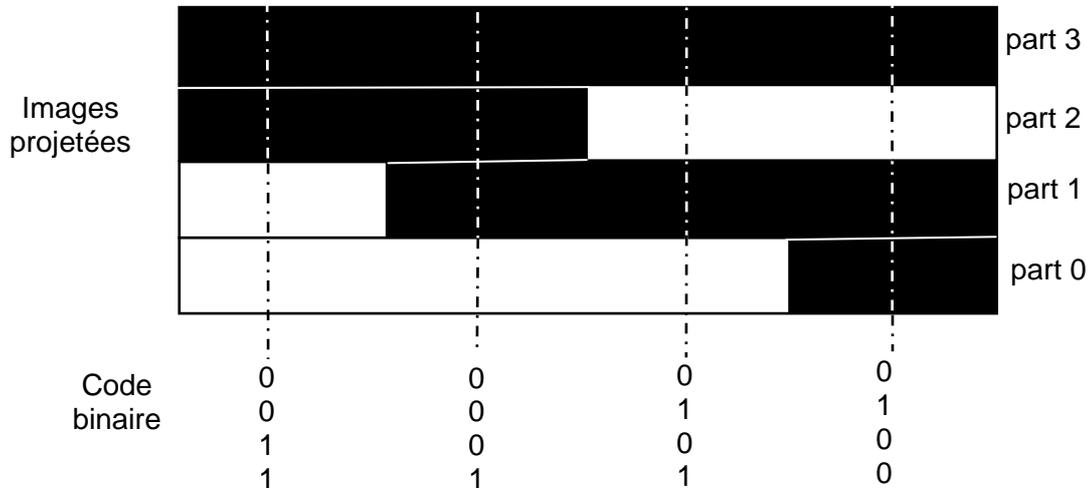
Fig. 2.7 Images projetées pour obtenir le code Gray de quatre bits [GUH 01], [WUH 06]

La particularité de ce code Gray est que le passage d'un mot au suivant se fait par le changeant d'un seul bit. Par exemple, pour passer du mot  $C_0$  au mot  $C_1$ , seule la valeur de  $p_0$  change en passant de 0 à 1.

Ce code est très utilisé dans la conception des codes incrémentaux, car il est beaucoup plus stable que le code binaire.

En ce qui concerne le code binaire, le passage d'une valeur à la suivante se fait par le changement de plusieurs bits. Si ces changements ne sont pas effectués en même temps, on a des valeurs intermédiaires erronées. Par exemple, pour passer du code binaire 0011 (la valeur 3) au suivant, qui est 0100 (la valeur 4), se succèdent

pendant le temps de la durée de transition les valeurs intermédiaires suivantes : 0010, 0111, 0001, 0110, 0101. Le code Gray permet d'éviter les problèmes de synchronisation de passage des bits, l'exemple est montré dans la Fig. 2.8.



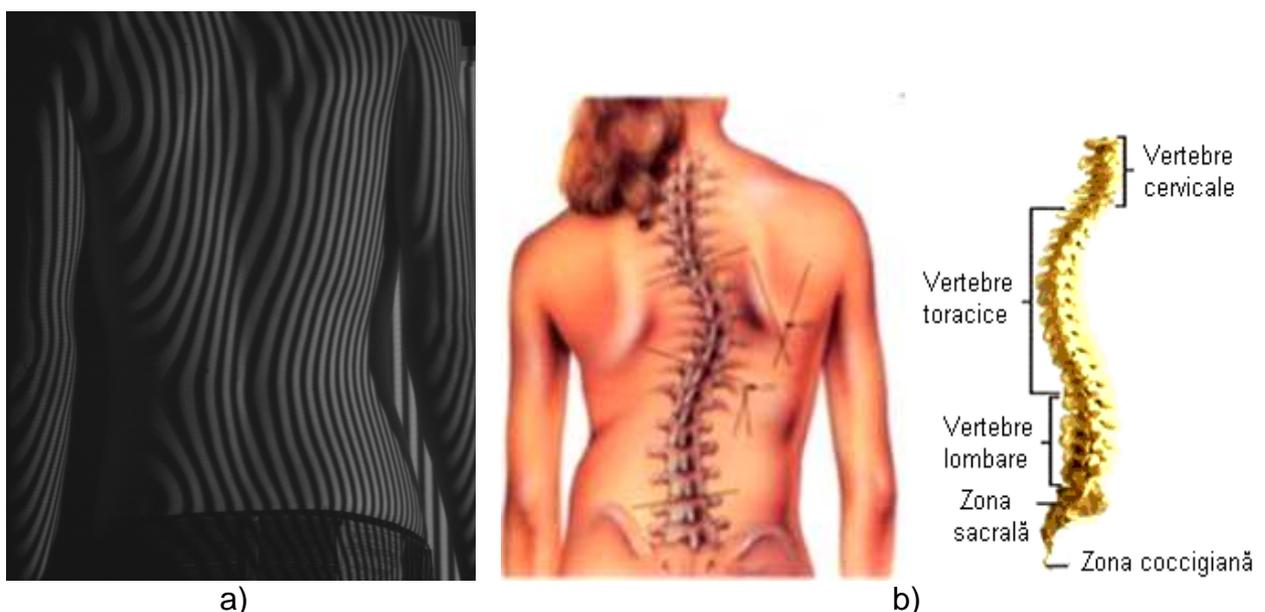
**Fig. 2.8** Problème de synchronisation dans le cas d'un code binaire pour le passage de la valeur 0011 à la valeur de 0100

Les travaux réalisés avec ce type de code, pour la mesure des reliefs, ont été présentés par Sansoni [SAN 99].

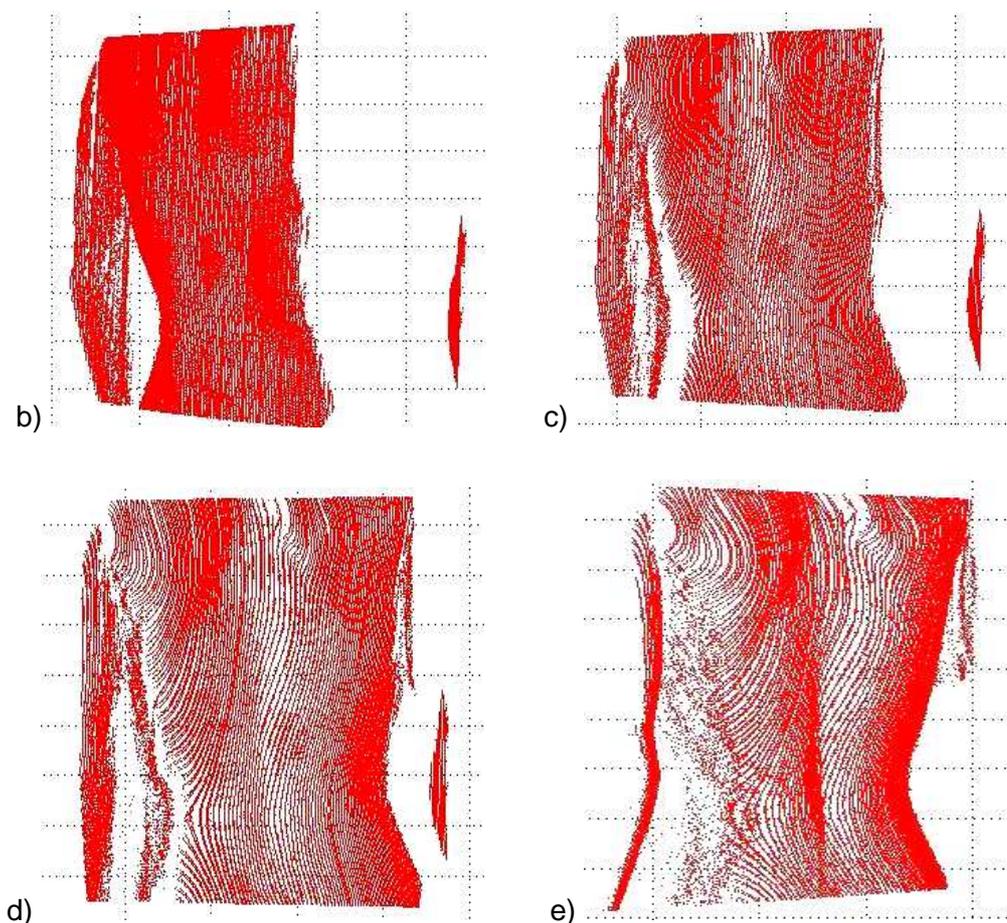
#### 2.4.4. Exemple de mesure des déformations par la méthode de la lumière structurée avec le code Gray

Par la technique de la lumière structurée avec le code Gray on peut effectuer des mesures pour savoir si une personne souffre ou non de la scoliose.

La Fig. 2.9 [POI 06] présente la mesure de la scoliose de l'organisme humaine par projection avec le code Gray et dans la Fig. 2.10 est donnée la reconstruction du relief du corps humain en 3D.



**Fig. 2.9** a) La projection avec le code Gray pour la mesure de la scoliose; b) Exemple de la colonne affectée de la scoliose [POI 06]



**Fig. 2.10** La projection avec le code Gray: a), b), c), d) et e) la reconstruction du corps humain en 3D [POI 06]

La scoliose (en grec Scolios) est une déformation tridimensionnelle de la colonne vertébrale (dans les trois plans), qui peut se produire dans la zone cervicale, thoracique ou lombaire, qui entraîne une torsion d'une ou plusieurs vertèbres, provoquant des déformations du thorax, de l'abdomen ou des zones para-vertébraux (dans le voisinage des vertèbres). La scoliose peut être structurale, quand la colonne est courbée et présente une rotation et non structurée, quand la colonne est seulement courbée. Usuellement, la scoliose se produit au milieu du dos (colonne thoracique) ou dans le bas du dos (colonne lombaire). Beaucoup de gens ont un certain degré de déviation de la colonne vertébrale. La scoliose est déclarée quand la déviation de la colonne est supérieure à 10 degrés. La colonne vertébrale se courbe d'habitude en forme des lettres S ou C.

Le traitement de la scoliose se fait par kinésithérapie et par l'application d'un corset pour renforcer la musculature ou le port d'un corset pour la correction de la colonne si elle n'est pas très touchée.

Dans le cas étudié qui est présenté dans la figure 2.10, la personne pour laquelle ont été effectuées les mesures ne souffre pas de scoliose.

## 2.5. L'interférométrie holographique

### 2.5.1. Généralités

L'holographie n'est pas une méthode de mesure, elle est une méthode d'enregistrement, elle est décrite parce qu'elle a le caractère de modèle.

Le principe théorique de l'holographie a été découvert en 1948 par le physicien Dennis Gabor (1900-1979), quand il effectuait des recherches en microscopie électronique. Dennis Gabor a reçu ensuite en 1971 le prix Nobel en physique pour cette invention. Malgré ça, il a fallu attendre jusqu'en 1964 et les premiers lasers pour que cette technique ait des applications pratiques. L'holographie est un mélange entre l'interférence et la diffraction. Les interférences codent l'amplitude et le relief d'un objet tridimensionnel et la diffraction agit comme un décodeur de reconstruction d'une onde qui semble provenir de l'objet précédemment éclairé.

Le terme «holographie» vient des mots grecs "Holos" qui signifie "un tout" et "grapho" qui signifie «écrire», alors, «holographie» signifie «écriture en totalité» ou «écriture en ensemble»

L'holographie est un procès d'imagerie en trois dimensions utilisant les propriétés de la lumière cohérente issue des lasers.

Le principe de l'holographie se trouve dans l'enregistrement de la phase du faisceau lumineux qui arrive sur une plaque photosensible. L'enregistrement de cette phase est rendu possible par les interférences entre le faisceau de référence et le faisceau objet. Pour que ces deux faisceaux interfèrent, il faut qu'ils vérifient certaines conditions, notamment leur cohérence et leur polarisation.

En général, la source d'éclairage utilisée est un laser qui possède des propriétés adéquates pour la création des interférences lumineuses de bon contraste:

- Cohérence spatiale = source ponctuelle. Le faisceau laser peut être focalisé dans un spot lumineux très petit (tache de diffraction);
- Cohérence temporelle = le laser émet une radiation quasi monochromatique. Plus la radiation est monochromatique, plus la cohérence est plus grande et plus les dimensions de l'objet pourront être importantes [SMI 01a].

### 2.5.2. L'enregistrement d'un hologramme

Pour mieux comprendre en quoi consiste l'interférométrie holographique, il est nécessaire d'abord de comprendre le processus d'enregistrement et de restitution de l'onde lumineuse provenant d'un objet, c'est-à-dire le processus de l'holographie. On considère comme essentiel le cas des objets solides tridimensionnels diffusant la lumière qu'ils reçoivent (les objets en relief les plus souvent rencontrés dans les applications de la mécanique).

L'enregistrement du relief d'un objet consiste à enregistrer la phase de l'onde lumineuse qui a éclairé l'objet. L'enregistrement de la phase d'une onde se fait par interférométrie, c'est-à-dire en superposant à l'onde venant de l'objet, une onde lumineuse de référence. Les interférences ne sont possibles que si les deux ondes, objet et référence, proviennent d'une source unique d'éclairage. L'holographie consiste donc à enregistrer par l'interférométrie, sur un support photosensible, l'onde lumineuse diffusée, diffractée par un objet convenablement éclairé, puis à restituer à loisir cette onde lumineuse à partir de l'enregistrement (appelé hologramme).

Pour réaliser un hologramme, il est nécessaire que la source de lumière ait une certaine cohérence permettant à l'onde de référence et à l'onde objet (issues de cette même source de lumière) d'interférer dans de bonnes conditions. Cette cohérence a deux aspects:

- l'aspect spatial: la source de lumière doit être ponctuelle;
- l'aspect temporel: la source laser doit être monochromatique.

La Fig. 2.11 montre le principe de l'enregistrement d'un hologramme: la source de lumière laser S éclaire l'objet qui diffuse (l'onde objet  $U_o$ ) la lumière qu'il reçoit qui est divisé par un miroir demi réfléchissant. Une partie éclaire l'objet et s'appelle onde-objet  $U_o$  (avec sa phase  $\varphi$ ) et est réfléchi vers le support holographique la deuxième

partie s'appelle onde de référence  $U_r$  ; elle est redirigée par un miroir vers le support holographique où elle interfère avec l'onde-objet. L'onde-objet  $U_o$  et l'onde de référence  $U_r$  interfèrent dans tout l'espace où elles se superposent et la plaque photographique enregistre une fraction de ces interférences. Après le développement de la plaque photo (ou du film), on a un hologramme ayant enregistré l'onde-objet  $U_o$  en amplitude et en phase, [SMI 98b], [BOR 01].

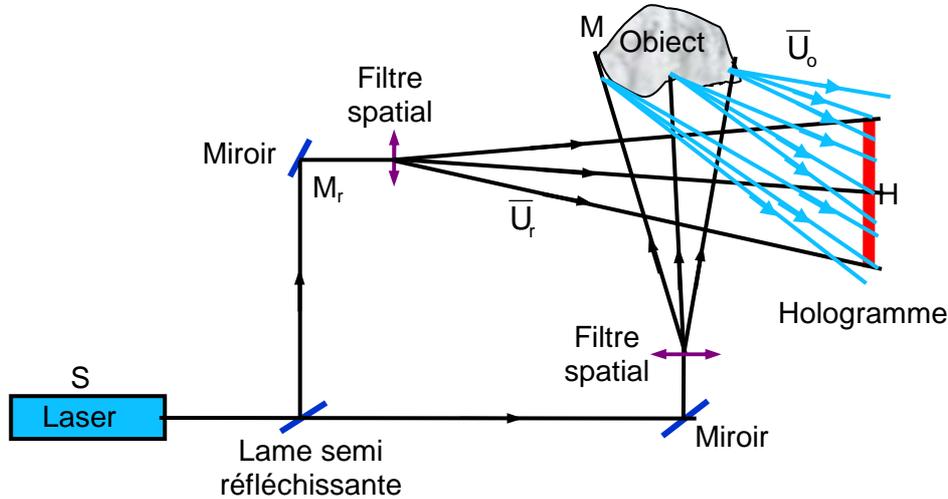


Fig. 2.11 L'enregistrement d'un hologramme [SUR 00]

L'amplitude totale dans un point H sur l'hologramme est [SMI 98b]:

$$U = U_o + U_r \quad (2.12)$$

L'intensité d'interférence est donnée par l'expression:

$$I = U \cdot U^* = |U|^2 \quad (2.13)$$

où  $U^*$  est l'amplitude complexe conjuguée de  $U$ .

L'amplitude complexe de l'onde résultante est égale à la somme des amplitudes complexes des deux ondes et son intensité est le produit entre l'amplitude complexe et la conjuguée de celle-ci, donc, si on remplace  $U$  avec sa valeur, on obtient:

$$I_{\text{interf}} = (U_o + U_r) \cdot (U_o + U_r)^* \quad (2.14)$$

par développement, l'expression devient:

$$I_{\text{interf}} = |U_o|^2 + |U_r|^2 + U_o \cdot U_r^* + U_o^* \cdot U_r \quad (2.15)$$

Les deux premiers termes  $|U_o|^2$  et  $|U_r|^2$  sont les intensités des deux ondes;  $U_o \cdot U_r^*$  et  $U_o^* \cdot U_r$  sont les termes interférométriques et l'amplitude résultante a l'expression:

$$I_{\text{inreg}} = 1 - k \int_0^{T_{\text{exp}}} I_{\text{interf}} dt \quad (2.16)$$

où:  $I_{\text{inreg}}$  – est l'intensité de l'onde d'enregistrement;  
 $I_{\text{interf}}$  – est l'intensité de l'onde d'interférence;  
 $T_{\text{exp}}$  – est la durée d'exposition [s].

L'amplitude complexe de l'onde - objet peut être décrite par l'expression:

$$\bar{U}_o(M, t) = U_o(M, t)e^{j\phi_o(M, t)} \quad (2.17)$$

où:

$U_o(M, t)$  - est l'amplitude réelle, l'onde provenant d'un point quelconque M de la surface de l'objet;

$\phi_o$  – est sa phase spatiale;

$j^2 = -1$ .

L'enregistrement holographique de l'onde-objet se fait après son interférence avec l'onde de référence:

$$\bar{U}_r(M, t) = U_r(M, t)e^{j\phi_r(M, t)} \quad (2.18)$$

Le dispositif d'enregistrement d'un hologramme, présenté dans la Fig. 2.11 [Borza], est installé sur une table antivibratoire [BOR 01].

### 2.5.3. La lecture de l'hologramme (restitution de l'onde - objet)

Pour lire l'hologramme et restituer l'onde  $U_o$  en amplitude et en phase, (Fig. 2.12) on éclaire la plaque photographique à l'aide de l'onde de reconstruction  $U_r$ , dans les mêmes conditions que lors de l'enregistrement (même angle d'incidence sur la plaque et même chemin optique); on obtient derrière l'hologramme une onde transmise (K est une constante liée aux conditions du traitement chimique de l'émulsion photosensible).

L'intensité de l'onde de reconstruction  $I_{recons}$  est:

$$I_{recons} = \bar{U}_r \cdot I_{inreg} = \bar{U}_r \left( 1 - k \int_0^{T_{exp}} I_{interf} dt \right) \quad (2.19)$$

Si on développe l'expression de  $I_{inreg}$  et on remplace  $I_{interf}$  par son expression, on peut constater que l'un des termes obtenus sera :

$$\bar{U}_v = -k \cdot |U_r|^2 \int_0^{T_{exp}} \bar{U}_o dt \quad (2.20)$$

Le résultat montre qu'on obtient l'amplitude complexe d'une onde qui a comme direction de propagation celle de l'onde – objet [RUN 08b].

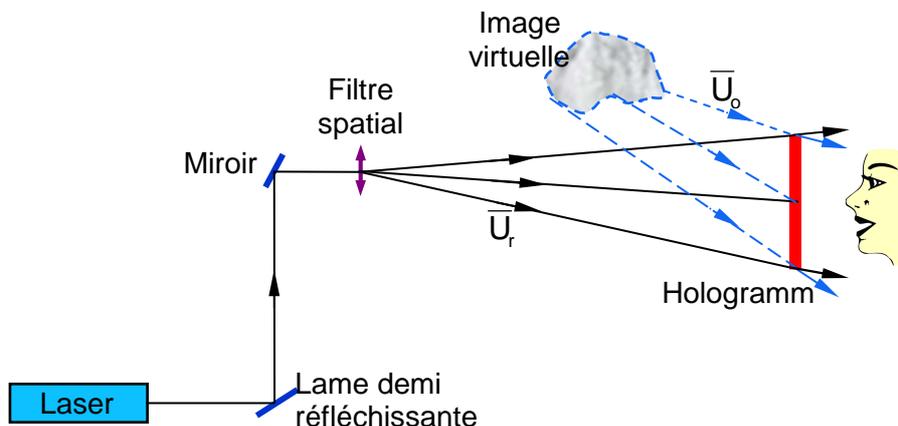


Fig. 2.12 La restitution de l'image par l'hologramme [SUR 00], [SMI 98b]

Cette onde peut créer, pour un observateur (placé sur la direction de propagation de l'onde objet) et qui regarde vers l'hologramme, une image virtuelle de l'objet.

Chaque partie de l'hologramme restitue une image qui correspond à la direction sous laquelle l'objet a été "vu" pendant l'enregistrement. L'aspect tridimensionnel est aperçu très fortement par un observateur.

### 2.5.4. L'interférométrie holographique à double exposition

La technique est similaire à celle utilisée pour réaliser un hologramme simple. On effectue une première exposition avec l'objet dans la position  $P_1$  puis une seconde exposition sur la même plaque avec l'objet dans la position  $P_2$ , sans toucher à rien d'autre. Après on effectue une nouvelle pose permettant l'enregistrement effectué dans la position  $P_2$ . Après le développement on a une plaque contenant la somme des deux hologrammes, incohérents entre eux, parce qu'ils ont été réalisés dans deux moments différents. Lors de leur restitution on peut obtenir une superposition des deux ondes issues de l'objet dans les positions  $P_1$  et  $P_2$  (Fig. 2.13). Ces deux ondes interfèrent et les franges d'interférence observées expriment les modifications subies par l'objet [SMI 01a].

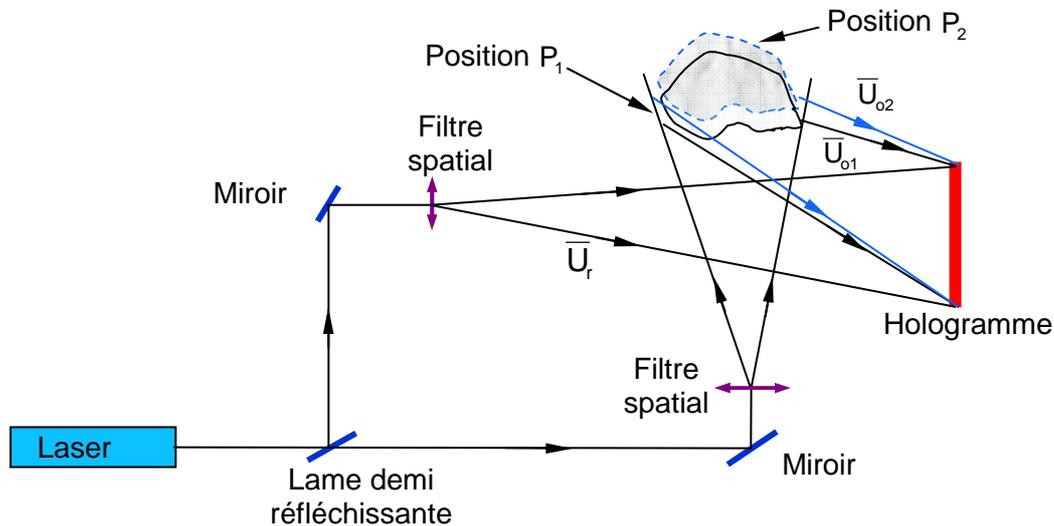


Fig. 2.13 L'enregistrement de l'hologramme en double exposition [SMI 01a]

La méthode permet la détection et la mesure des variations de phase survenues entre les deux expositions.

On note  $\bar{U}_{o1}$  et  $\bar{U}_{o2}$  les amplitudes complexes des ondes diffractées issues de l'objet dans les positions  $P_1$  et  $P_2$ . Pour chaque exposition, les amplitudes ont les expressions [PIC 08]:

- Pendant une durée  $\Delta t_1$

$$\bar{U}_{o1} = |\bar{U}_r|^2 + |\bar{U}_1|^2 + \bar{U}_r^* \bar{U}_1 + \bar{U}_r \bar{U}_1^* \quad (2.21)$$

- Pendant une durée  $\Delta t_2$

$$\bar{U}_{o2} = |\bar{U}_r|^2 + |\bar{U}_2|^2 + \bar{U}_r^* \bar{U}_2 + \bar{U}_r \bar{U}_2^* \quad (2.22)$$

L'onde transmise est [BOR 01]:

$$\bar{U}_t = -C(\bar{U}_{o1} + \bar{U}_{o2}) \quad (2.23)$$

L'intensité lumineuse est écrite sous la forme:

$$I = I_0 \left[ 1 + \cos \frac{2\pi}{\lambda} d (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] \quad (2.24)$$

Pour expliquer la relation (2.21), les notations de la Fig. 2.12. représentent:

M – est un point quelconque de l'objet, ayant le déplacement d;

S – est le point d'où l'on éclaire l'objet;

H – est un point sur l'hologramme et la direction de déplacement forme les angles différents avec les direction de l'éclairage, respectivement d'observation [BOR 01].

Dans la Fig. 2.14 on note:

$\theta_1$  - est l'angle pour la direction d'éclairage;

$\theta_2$  - est l'angle pour la direction d'observation.

Les franges lumineuses qui correspondent aux points lumineux situés sur l'objet ont les déplacements:

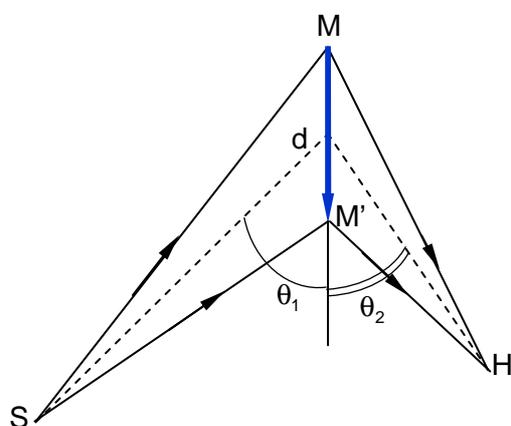
$$d = 2m \frac{\lambda}{2(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}; \quad (2.25)$$

avec  $m = 0, 1, 2, \dots$

et les franges sombres correspondent aux points pour lesquels:

$$d = (2m + 1) \frac{\lambda}{2(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}; \quad (2.26)$$

avec  $m = 0, 1, 2, \dots$



**Fig. 2.14** Interférométrie holographique en double exposition

La différence de déplacement pour deux points situés sur deux franges adjacentes est:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2(\cos \theta_1 + \cos \theta_2)}. \quad (2.27)$$

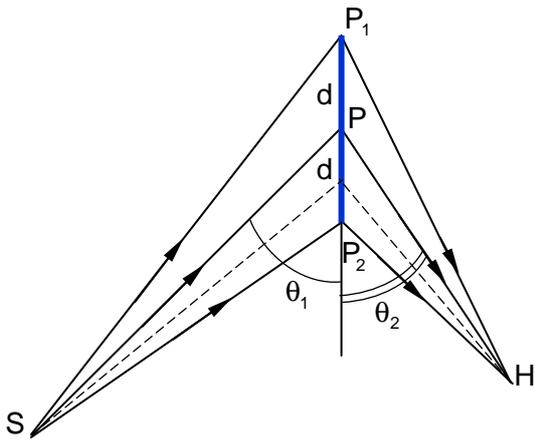
Cette technique est appliquée en contrôle non destructif, en analyse de contraintes mécaniques, thermiques ou pneumatiques d'un objet industriel et, également, en analyse de défauts des objets, tels que: défauts de collage, fissures dans les structures.

### 2.5.5. L'interférométrie holographique par intégration temporelle

Cette méthode est aussi connue sous le nom d'interférométrie holographique «en temps moyen».

Cette méthode est proposée pour l'analyse vibratoire des structures. Elle implique un mouvement continu de l'objet, en général vibratoire, pendant toute la durée de l'enregistrement [PIC 08], [SUR 03].

L'interférométrie holographique par intégration temporelle permet de visualiser non seulement la carte des déplacements de l'objet en vibration périodique, mais aussi les lignes nodales. C'est une méthode très performante pour l'étude vibratoire des structures industrielles (qui peuvent avoir plus d'un mètre de diamètre). Son principe est simple (Fig. 2.15.), [BOR 01]



**Fig. 2.15** Interférométrie holographique par intégration temporelle

À l'amplitude complexe de l'onde-objet, correspond un chemin optique qui est la somme entre un chemin optique constant qui donne la position moyenne du point P pendant le temps d'une vibration et le chemin optique variable (supplémentaire) créé par le mouvement vibratoire du point P à une certaine pulsation.

L'expression de l'amplitude complexe est:

$$\bar{U}_r = -C \cdot \bar{U}_{o1} \cdot J_0 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} d(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] \quad (2.28)$$

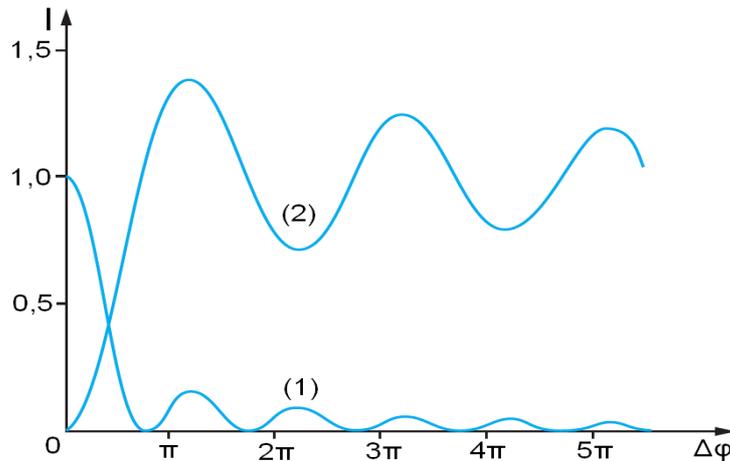
où  $J_0$  est la fonction Bessel de première

espèce et d'ordre zéro.

L'hologramme instantané dépend du temps et est donné par l'expression suivante:

$$\bar{U}_{o1} = |U_r|^2 + |U_1|^2 + U_r^* U_1 + U_r U_1^* \quad (2.29)$$

Dans la Fig. 2.16 [SMI 98a] sont représentées la fonction Bessel  $J_0$  et  $J_0^2$ .



En ordonnée, l'échelle normalisée (maximum de  $J_0^2 = 1$ )

**Fig. 2.16.** L'intensité  $I = J_0^2(\Delta\phi)$  observée en intégration temporelle (courbe 1) et l'intensité  $I = 1 - J_0(\Delta\phi)$  observée en temps réel (courbe 2), pour un même objet en vibration sinusoïdale [SMI 98a]

La distribution de l'intensité lumineuse est donnée par l'expression:

$$I = I_0 \cdot J_0^2 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} d(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] \quad (2.30)$$

L'hologramme est enregistré lorsque l'objet est excité harmoniquement. Pour comprendre le principe de la formation des images, on considère que l'objet est excité en régime strictement sinusoïdal.

Dans un montage holographique classique, on enregistre l'hologramme de l'objet en vibration en mouvement de régime, après qu'on a dépassé le régime transitoire.

Cette technique, associée à la technique en temps réel, est très utile pour caractériser les modes de vibration des structures industrielles: analyse modale, validation de codes de calculs etc. Avec cette méthode on peut déterminer l'amplitude de la vibration en chaque point de la structure.

En général, on identifie les fréquences propres par interférométrie holographique en temps réel, puis on enregistre les hologrammes par intégration temporelle aux fréquences propres. Le montage se garde sur tout le parcours de la détermination.

### 2.6.6. L'interférométrie holographique en temps réel

L'interférométrie holographique en temps réel est utilisée en laboratoire, dans un environnement très stable, en utilisant en général un laser à émission continue.

Cette méthode est la plus performante. Par cette méthode, l'hologramme de l'objet se réalise dans un état initial. Après développement, on regarde par cet hologramme vers l'objet. L'hologramme et l'objet doivent se trouver dans les mêmes positions que celles initiales, qu'ils ont occupées pendant l'enregistrement.

Ainsi il y aura deux ondes cohérentes (Fig. 2.17.), qui se propagent simultanément vers le détecteur (caméra), elles sont: l'onde reconstituée par l'hologramme, qui correspond à l'état initial de l'objet  $\bar{U}_0'$  et l'onde provenant de l'objet lui-même  $\bar{U}_0''$ , à l'instant même (t) de l'observation. L'onde résultante peut être écrite ainsi:

$$\bar{U}_r = \bar{U}_0' + \bar{U}_0'' \quad (2.31)$$

Si l'objet se trouve dans le même état que lors de l'enregistrement, les deux ondes sont identiques et on peut percevoir simplement l'image de l'objet.

Dans ces conditions, si on regarde à travers l'hologramme, on observe:

- l'objet lui-même éclairé par un faisceau d'éclairage (Fig. 2.17 a),
- l'image holographique de l'objet au repos restituée par l'hologramme (Fig. 2.17 b).

En effet, si l'hologramme est remplacé dans le montage avec un décalage latéral, l'objet virtuel reconstruit sera également décalé et ne pourra pas être superposé à l'objet réel. Ils y aura des franges parasites si le décalage n'est pas assez important [SUR 03].

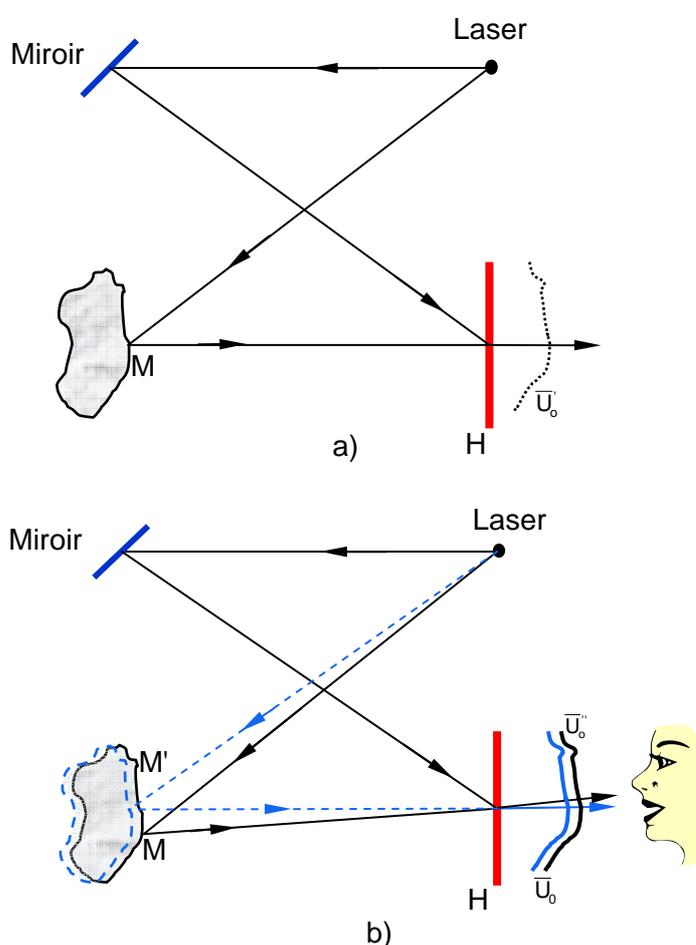


Fig. 2.17. L'interférométrie holographique en temps réel a) enregistrement; b) restituée [SMI 01a]

### 2.5.6.1. L'objet déformé ou déplacé

Si l'objet est déformé ou déplacé, l'intensité sera:

$$I = I_0 \left[ 1 - \cos \frac{2\pi}{\lambda} d(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] \quad (2.32)$$

La différence par rapport à l'hologramme en double exposition, est que les franges lumineuses prendront la place des franges sombres et vice-versa.

### 2.5.6.2. L'objet en état de vibration

Pour l'objet en état de vibration harmonique stationnaire, l'intensité lumineuse a l'expression:

$$I = I_0 \left\{ 1 - J_0 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} d(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] \right\} \quad (2.33)$$

$$\text{Si } J_0 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} d(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] = \max \quad (2.34)$$

nous avons les franges brillantes.

$$\text{Si } J_0 \left[ \frac{2\pi}{\lambda} d(\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \right] = \min \quad (2.35)$$

nous avons les franges sombres.

L'interférométrie en temps réel est utilisée pour le contrôle non destructif, l'analyse vibratoire ou encore pour la compréhension globale du comportement des ensembles mécaniques soumis aux contraintes statiques ou l'évaluation des charges en manière lente.

Par exemple: la déformation du carter d'une boîte de vitesse lorsqu'on fait varier lentement le couple sur l'arbre ou la détection des défauts qu'on peut faire évoluer quand il s'agit une contrainte thermique etc.

## 2.6. L'holographie numérique

### 2.6.1. Généralités

L'holographie est une méthode de diagnostic optique qui permet l'enregistrement des informations en 3D d'un objet de manière instantanée. Elle est peu utilisée dans l'industrie pour des raisons pratiques. La méthode présente un intérêt spécial dans la microscopie.

L'enregistrement et le développement de la plaque holographique sont des opérations délicates. L'étape de restitution nécessite un montage de déplacement mécanique de l'hologramme.

Avec l'apparition des nouveaux systèmes numériques performants (caméras digitales performantes, ordinateurs puissants) pour l'enregistrement et la restitution numérique de l'objet étudié, la plaque holographique de l'interférométrie holographique est remplacée par une caméra vidéo CCD.

L'holographie numérique offre de nouvelles possibilités. Dans l'holographie digitale, les hologrammes sont directement enregistrés et numérisés par un capteur CCD couplé à un système d'analyse d'images. Cette approche évite les problèmes liés aux supports classiques d'enregistrement holographique, ainsi que les faibles sensibilités, le bruit et la réponse non-linéaire des émulsions photographiques. La reconstruction holographique est faite de manière numérique.

Elle consiste dans l'enregistrement direct d'un hologramme sur un capteur CCD et la restitution numérique, ce qui simplifie la mise en œuvre expérimentale.

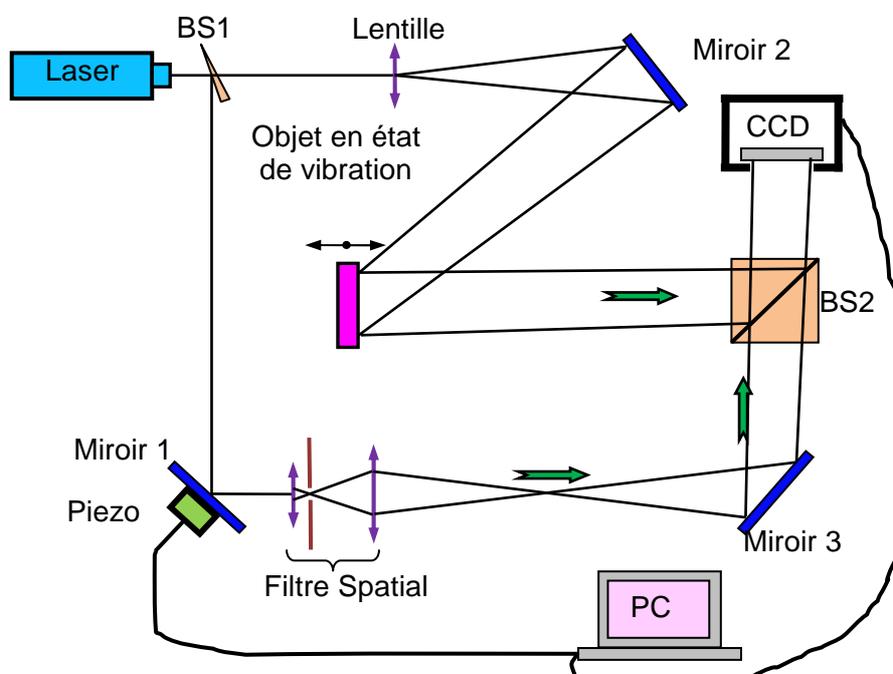
L'obtention de l'hologramme se réalise sans avoir besoin de la phase de développement. Après la simulation de la restitution par un calcul informatique, on obtient des informations sur l'amplitude et la phase et les images sont retournées à l'écran.

En utilisant le capteur CCD avec une grande sensibilité, l'holographie numérique permet, en outre, de réduire d'une manière importante le temps d'exposition et la puissance du laser nécessaire.

### 2.6.2. Le principe général de l'holographie numérique

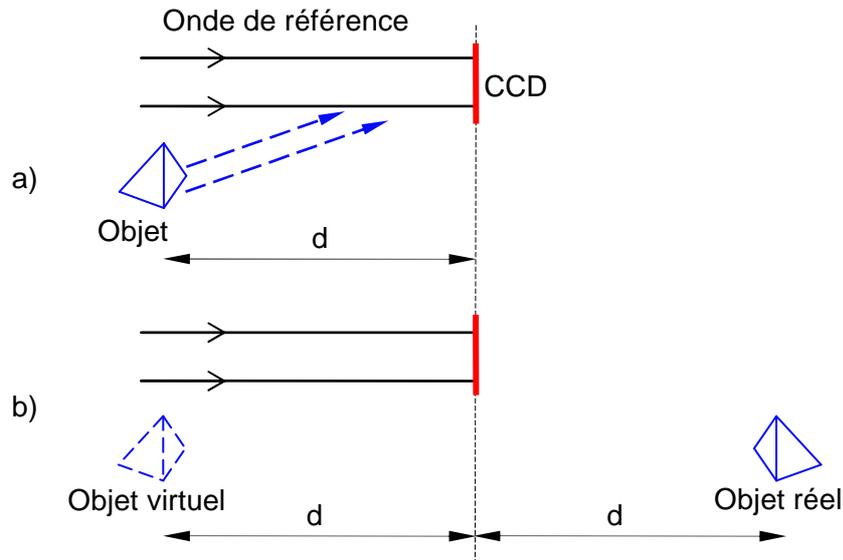
La Figure 2.18 [BOR 05] montre une installation typique pour l'enregistrement d'un hologramme numérique, qui est une installation en off-axis. Le principe est le suivant: un faisceau laser est séparé en deux parties à l'aide d'un diviseur de faisceaux, le premier faisceau éclaire la surface de l'objet (l'onde objet) et le deuxième faisceau est le faisceau de référence (l'onde de référence). Les deux ondes se superposent sur la surface du détecteur CCD de la caméra vidéo. L'objet est, généralement, un corps tridimensionnel avec une surface rugueuse, situé à une distance «d» du capteur CCD [SCH 02].

Dans l'holographie numérique la caméra n'a pas d'objectif.



**Fig. 2.18.** Le système de l'holographie numérique Fresnel comme utilisation dans l'interférométrie numérique (off-axis) [BOR 05]

La phase de reconstruction peut être calculée en partant directement de l'hologramme.

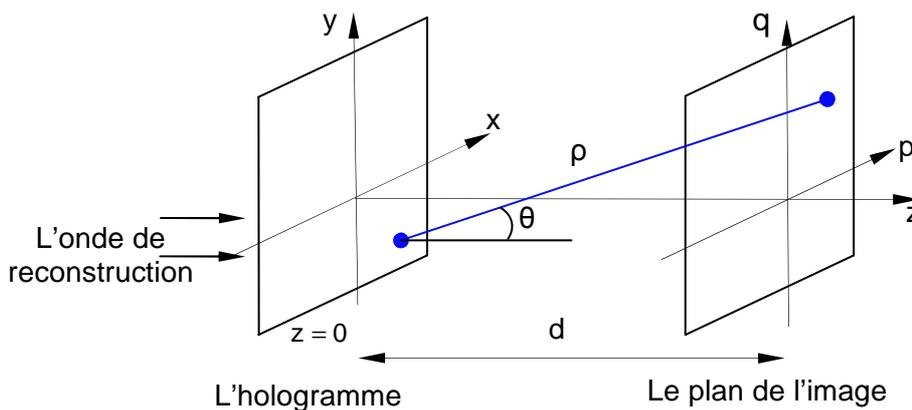


**Fig. 2.19** Holographie numérique: a) enregistrement et b) reconstruction de l'image [SCH 02]

Dans la reconstruction optique, l'image virtuelle apparaît à une distance «d» de la position de l'objet original, elle est symétrique à l'image réelle dans la direction opposée du CCD, mais à la même distance (Fig. 2.19 b).

L'étape de restitution est remplacée par un calcul numérique. La restitution de l'onde-objet est faite en éclairant l'hologramme avec l'onde plane de reconstruction U, qui a l'expression (2.36) et on obtient un champ transmis appelé front d'onde reconstruit. On calcule l'amplitude complexe résultante à une distance «d», comme dans la Figure 2.19 et 2.20, derrière l'hologramme, dans le plan de l'image réelle de l'objet.

$$U \cdot I_{\text{interf}} = U \cdot |U_o|^2 + U \cdot |U_r|^2 + U \cdot U_o \cdot U_r^* + U \cdot U_o^* \cdot U_r \quad (2.36)$$



**Fig. 2.20** Les coordonnées de système [SCH 02]

Les premiers deux termes de la relation 2.36 représentent la diffraction d'ordre zéro, qui se propage sur la direction de l'onde plane de reconstruction, U. Celle-ci est utilisée pour restituer une réplique de l'onde de référence. Les termes d'interférence 3 et 4 produisent deux ondes-objet de l'image conjuguée:  $U \cdot U_o \cdot U_r^*$  représente l'onde capable de produire l'image virtuelle située dans le lieu où s'éte trouvé initialement l'objet. Le 4-ème terme,  $U \cdot U_o^* \cdot U_r$  forme une image réelle, symétrique à l'objet par rapport à l'hologramme.

Pour obtenir une image de l'objet bien focalisée, il faut que le plan d'observation soit situé au niveau de l'objet initial «d» comme dans la Figure 2.19. Le front de l'onde restituée correspond à l'intégrale de diffraction Fresnel-Kirchhoff [SCH 02]:

$$U(p, q) = \frac{i}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y) U_r(x, y) \frac{e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}\rho}}{\rho} \times \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \theta \right) dx dy \quad (2.37)$$

où « $\rho$ » est donnée par la relation:

$$\rho = \sqrt{(x-p)^2 + (y-q)^2 + d^2} \quad (2.38)$$

$H(x, y)$  – est la fonction de l'hologramme;

$U_r(x, y)$  – est l'onde de référence;

$\rho$  – représente la distance entre un point du plan d'hologramme et un point dans le plan de reconstruction [m];

$\lambda$  – est la longueur d'onde [m];

$\cos(\theta) = \frac{d}{\rho} \approx 1$  - est le cosinus de l'angle entre «d» et « $\rho$ », représenté dans la

Figure 2.18.

Pour les valeurs «x» et «y», ainsi que pour les valeurs «p» et «q», qui sont faibles en comparaison avec la distance «d» entre le plan de reconstruction et CCD, l'expression (2.38) peut être remplacée par les termes de la première série de Taylor:

$$\rho = d + \frac{(p-x)^2}{2d} + \frac{(q-y)^2}{2d} - \frac{1}{8} \frac{[(p-x)^2 + (q-y)^2]^2}{d^3} + \dots \quad (2.39)$$

Dans la relation (2.39) on néglige les infinis petits d'ordre supérieur et ainsi on peut écrire que :

$$\rho = d + \frac{(p-x)^2}{2d} + \frac{(q-y)^2}{2d} = d + \frac{(p-x)^2 + (q-y)^2}{2d} \quad (2.40)$$

L'approximation Fresnel est valide si la taille du détecteur de la caméra CCD est beaucoup plus petite que la distance «d» de l'objet. Le front d'onde restituée correspond à l'intégrale de diffraction Fresnel si on considère  $\cos(\theta) \approx 1$ . On fait ce remplacement dans la relation 2.37 et résulte l'expression suivante [SCH 02]:

$$U(p, q) = \frac{i}{\lambda d} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}d} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y) U_r(x, y) \times e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}((p-x)^2 + (q-y)^2)} dx dy \quad (2.41)$$

Si on effectue les multiplications au carré dans l'argument de l'exponentielle à l'intérieur de l'intégrale, on obtient l'expression [SCH 02]:

$$U(p, q) = \frac{i}{\lambda d} e^{-i\frac{2\pi}{\lambda}d} e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(p^2 + q^2)} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} H(x, y) U_r(x, y) e^{-i\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)} \times e^{-i\frac{2\pi}{\lambda d}(xp + yq)} dx dy \quad (2.42)$$

L'implémentation numérique de la restitution impose également une discrétisation des fonctions continues.

L'image de l'objet est restituée en simulant l'éclairage de l'hologramme avec une onde de référence numérique.

À la fin du calcul, on obtient donc une image de  $M \times N$  pixels, dans le plan  $(p, q)$ . Pour reconstituer correctement l'onde-objet, il est nécessaire d'utiliser une onde de référence numérique qui est la réplique de l'onde de référence réelle.

La relation (2.42) s'appelle l'approximation de Fresnel ou la transformée de Fresnel. Elle permet la reconstruction du front d'onde dans un plan parallèle à l'hologramme. L'intensité est calculée par l'évation au carré [SCH 02]:

$$I(p, q) = |U(p, q)|^2 \quad (2.43)$$

La phase est calculée par:

$$\varphi(p, q) = \arctg \frac{\text{Im}[U(p, q)]}{\text{Re}[U(p, q)]} \quad (2.44)$$

où:  $\text{Re}[U(p, q)]$  – représente la partie réelle de la fonction d'onde;

$\text{Im}[U(p, q)]$  – représente la partie imaginaire de la fonction d'onde.

Si l'objet n'introduit pas de déphasage à la réflexion (surface uniforme), l'image de phase (modulo  $2\pi$ ) est liée au chemin optique jusqu'au plan d'observation et elle est déterminée du relief de l'objet.

Pour connaître les dimensions réelles de l'image reconstruite, on utilisera la relation liée aux variables conjuguées pour obtenir les dimensions en pixels de l'image reconstruite:

$$dp = \frac{\lambda \cdot d}{M \cdot dx} \quad \text{et} \quad dq = \frac{\lambda \cdot d}{M \cdot dy} \quad (2.45)$$

### 2.6.3. Les avantages de l'holographie numérique par rapport à l'holographie classique

Les avantages de l'holographie numérique par rapport à l'holographie classique peuvent se présenter ainsi:

- le calcul direct de l'amplitude et de la phase de l'onde-objet;
- la rapidité de la mesure: ainsi, celle-ci peut être effectuée à l'aide d'une seule acquisition, sans avoir besoin d'un développement chimique du support d'enregistrement, comme dans l'holographie classique;
- l'enregistrement holographique est effectué sur un support numérique, permettant la réalisation d'un nombre illimité d'acquisitions, contrairement à l'holographie classique, qui nécessite à chaque acquisition un nouveau support.

L'holographie numérique a beaucoup d'applications dans le domaine de la microscopie. F. Charrière, N. Pavillon, T. Columb et C. Depeursinge, ont étudié la technique optique de la tomographie par diffraction et la tomographie de l'indice de réfraction cellulaire basées sur l'holographie microscopique numérique [CHA 06a], [CHA 06b].

## 2.7. La corrélation d'images numériques

### 2.7.1. Généralités

Les méthodes de corrélation d'images ont été développées au début des années '80 et, malgré leur nouveauté, elles ont gagné rapidement une place dans les études du

domaine de la mécanique. Une partie des applications concernent des études macroscopiques sur des éprouvettes d'essais mécaniques.

La corrélation d'images numériques est une technologie relativement nouvelle de mesure sans contact des déformations. Cette technique expérimentale fait appel aux caméras vidéo de haute résolution pour saisir l'image et suivre le mouvement des caractéristiques de la surface sur une éprouvette pendant le temps que celle-ci se déforme sous l'effet d'une force. Il existe deux niveaux de complexité dans la corrélation d'images numériques: la corrélation bidimensionnelle et la corrélation tridimensionnelle. La corrélation bidimensionnelle d'images utilise une caméra pour calculer le champ des contraintes de l'éprouvette se déplaçant très peu en dehors de la surface plane. La corrélation tridimensionnelle d'images utilise deux caméras et peut créer des profils d'images tridimensionnelles de l'éprouvette essayée ou mesurer des déformations en champ ouvert.

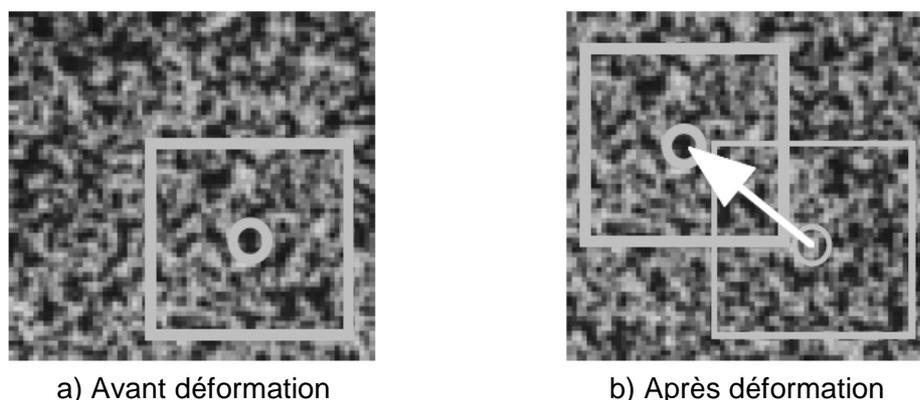
La corrélation d'images numériques est une méthode optique de mesure de la déformation à la surface d'un objet. Elle est basée sur l'application du traitement de signaux bidimensionnels et, en spécial, sur l'inter-corrélation d'images numériques. Le champ de déplacements dans le plan est obtenu par une inter-corrélation d'images de référence avec une image déformée. L'application de cette méthode est facile à réaliser car le matériel nécessaire à la mise en évidence des déformations ne nécessite qu'une caméra vidéo CCD, une carte d'acquisition rapide, un PC et une source de lumière blanche.

La corrélation permet la mesure des déplacements dans le plan.

### 2.7.2. Le principe général de la méthode

La corrélation d'images numériques est une technique d'appariement d'images ou de parties d'images appelée « zone d'étude ». La comparaison des deux images s'effectue en faisant apparaître des points homologues par maximisation d'une corrélation calculée sur un voisinage autour de ces points (Fig. 2.21), [MOU 07], [BER 04].

Le processus de mesure est robuste et simple, car il n'y a aucune influence de la position de la source d'éclairage par rapport à l'objet.

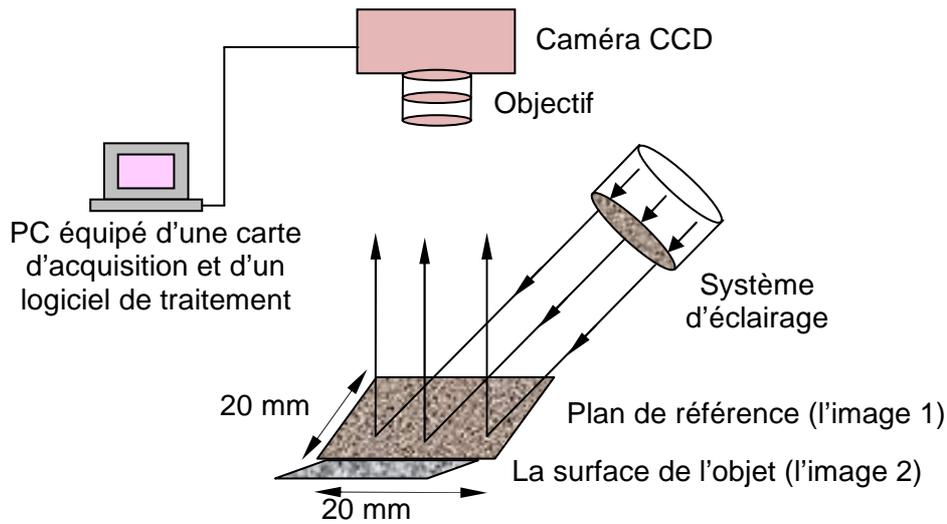


**Fig. 2.21** La région d'intérêt d'un modèle aléatoire repéré, avant et après déformation (translation de corps rigide)

La figure 2.22 montre le principe d'acquisition d'images [BRI 06], [RUN 08b].

Le déplacement d'une zone d'étude par rapport à sa position initiale produit un décalage d'un signal bidimensionnel d'intensité. Le modèle aléatoire rend possible la corrélation des zones homologues les unes par rapport aux autres. La recherche du

maximum de la corrélation est traitée numériquement. On évalue les déplacements par différences et les déformations locales par dérivation discrète.



**Fig. 2.22** Schéma d'un système d'acquisition de données pour un montage de corrélation d'images numériques bidimensionnelles

La distance euclidienne entre deux modèles  $f(x, y)$  et  $g(x-u, y-v)$ , décalés de  $u$  et  $v$ , suivant les directions de  $x$  et  $y$ , peut être exprimée à partir de l'expression [BOR 01]:

$$d_{fg}^2(u, v) = \sum_{x,y} [f(x, y) - g(x-u, y-v)]^2 \quad (2.46)$$

et, par élévation au carré on obtient:

$$d_{fg}^2(x, y) = \sum_{x,y} [f^2(x, y) + g^2(x-u, y-v) - 2f(x, y)g(x-u, y-v)] \quad (2.47)$$

Les deux premiers termes sont presque constants si l'éclairage de l'objet est uniforme. Le troisième terme estime la similitude entre les deux images indiquant la corrélation entre les deux images, notée  $C(u, v)$ . Alors:

$$C(u, v) = \sum_{x,y} f(x, y)g(x-u, y-v) \quad (2.48)$$

Si l'éclairage de l'objet varie au cours des mesures, on utilise de préférence un coefficient de corrélation normalisé, décrit dans la littérature de spécialité [BER 04], [BOR 01]:

$$\gamma(u, v) = \frac{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}] \cdot [g(x-u, y-v) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{x,y} [f(x, y) - \bar{f}]^2 \cdot [g(x-u, y-v) - \bar{g}]^2}} \quad (2.49)$$

où:  $\bar{f}$  et  $\bar{g}$  sont les valeurs moyennes de  $f$  et  $g$ .

Les applications de la corrélation d'images sont diverses: sur les métaux (aspects liés à l'énergie, fort gradient de déformations etc.), les polymères et les composites (fissurations); sur les céramiques, les matériaux biologiques, les élastomères, autres (par exemple la laine de verre).

### 2.7.3. Les avantages et les inconvénients de la méthode

Les avantages de la technique de corrélation d'images numériques sont:

- est extrêmement économique;
- est très simple à utiliser, même pour un débutant;
- la surface de référence ne nécessite pas une préparation préalable (si le marquage existe naturellement);
- sont nécessaires peu d'équipements: une caméra CCD, une lentille, une carte d'acquisition et un ordinateur ; peut nécessiter des caméras rapides

Même si la méthode est relativement nouvelle, elle a déjà été largement utilisée; une analyse par corrélation d'images numériques est très rapide et permet l'obtention d'une multitude des points de mesure [MOU 07].

Les inconvénients de cette méthode sont :

- les déplacements hors-plan induisent des déplacements et des déformations parasites quand on utilise une seule caméra vidéo;
- le nombre des points traités est limité par la taille du capteur de la caméra CCD utilisée.

La corrélation d'images s'utilise beaucoup sur les matériels biologiques.

La plupart d'applications se résume dans les études macroscopiques sur les éprouvettes testées mécaniquement, qui sont de plus en plus utilisées dans les études sur matériaux divers.

La technique de la corrélation d'images numériques est très utile pour la mesure des déplacements et des faibles déformations.

## 2.8. La vibrométrie Doppler

La vibrométrie Doppler est une technique déjà connue dans le domaine médical. Elle a aussi de nombreuses applications dans la mesure des vibrations mécaniques. S'agissant d'une technique ponctuelle (même si par balayage on peut obtenir des résultats sur une surface étendue) elle ne rentre pas dans le sujet de cette thèse.

Les différences par rapport aux techniques déjà présentées sont:

- la vibrométrie Doppler a une résolution temporelle très bonne, tandis que les autres techniques ont une mauvaise résolution temporelle;
- la vibrométrie Doppler a une mauvaise résolution spatiale, tandis que les autres techniques ont une très bonne résolution spatiale.

## 2.9. Conclusions

Les vibrations sont une cause de malaise ou de douleur et sont en fonction de l'amplitude, la fréquence et la durée d'exposition, mais dans d'autres conditions produisent des états de relaxation et de bon-humeur.

L'étude des vibrations qui agissent sur l'organisme humain peut être faite optiques.

Toutes les parties de l'hologramme, même des petites parties, contiennent toute l'information sur l'objet. L'hologramme peut être fragmenté, et dans ce cas la résolution de l'image est diminuée. Tous les points de l'hologramme reçoivent la lumière de tous les points de l'objet. Ainsi, un point de l'hologramme contient les informations de tout l'objet.

Outre les démonstrations spectaculaires avec des images holographiques, l'holographie a beaucoup d'applications pratiques. Il permet la mesure des petits

déplacements ou des déformations, ainsi que le stockage des informations. En principe, un hologramme permet de stocker jusqu'à 1000 hologrammes différents sur une couche de 1 mm d'épaisseur.

Un hologramme se différencie d'une photographie ordinaire par le fait qu'il enregistre non seulement l'amplitude de l'onde lumineuse, mais aussi sa phase.

**La corrélation d'images numérique** permet la détermination, par post-traitement, des mesures par essais mécaniques, des propriétés élastiques de matériaux disponibles ayant des petits volumes (l'épaisseur de l'ordre de 100  $\mu\text{m}$ ) et permet la mesure des petites déformations (matériaux rigides, tels que les céramiques).

Le processus de mesure est robuste et simple car il n'y a aucune influence de la position de la source d'éclairage par rapport à l'objet, ni de la longueur d'onde ou une référence de la phase etc.

La résolution spatiale de la mesure par corrélation d'images numériques n'est pas limitée par la distance entre les points.

## CHAPITRE 3

### LES EFFETS DES VIBRATIONS SUR L'ORGANISME HUMAIN. STADE ACTUEL

#### 3. 1. Notions générales

La vibration est un phénomène qui se produit chaque jour, on le rencontre à la maison, sur la route, au travail etc.

Des nombreuses études faites sur les vibrations ont comme sujet l'homme, les bâtiments et les machines. Parmi tous, l'homme est le plus sensible à la perception des vibrations.

La présence de l'homme à la commande ou à la manipulation des machines est des outillages constitue l'un des facteurs déterminants sur la productivité dans le processus de travail. On souligne que pour les outillages automotrices, ainsi que pour ceux qui sont stationnaires, les vibrations transmises du poste de travail du mécanicien sont perçues par l'organisme et, en particulier, par certaines parties du corps qui sont en contact direct avec les éléments de l'outillage qui sont en mouvement vibratoire.

Dans le Tableau 3.1 sont donnés, pour exemplification, quelques-uns des domaines industriels dans lesquels se retrouve les effets de la vibration sur l'organisme l'humain entier [TRU 09].

**Tableau 3.1**

Les domaines d'activité pour lesquels on peut faire des avertissements quant aux effets de la vibration sur le corps humain

Équipements industriels	Autres
Grues	Perforateurs
Équipement pour les stations de contrôle	Scies électriques à main
Presses	Moulins
Marteaux	Tamis vibrants
Machines-outils travaillant par coupe	Bulldozer, dragues
Machines à effleurer	Machine à enduire
Machines à couper	Machine à couper le béton
Machines à percer	Mailloches, compacteurs
Mélangeuses	Vibrantes de béton
Plaques vibrantes	Guillotines de pierre

#### 3.2. Les effets des vibrations sur le corps humain

L'environnement artificiel créé par l'homme, notamment celui industriel et urbain, est souvent pollué par les vibrations. Elles ont un effet nuisible sur le corps humain, réduisant la capacité d'effort et la qualité du travail, étant aussi responsables des maladies des personnes soumises aux vibrations pendant un temps prolongé.

Les vibrations de fréquence basse (1-20 Hz) provoquent des douleurs de dos (lombago) lombosciatique, hernies du disque, des maladies qui peuvent survenir après un certain temps d'exposition aux vibrations.

Les vibrations de fréquences très basses (inférieures à 1 Hz) dues à l'action des variations d'accélération sur le labyrinthe de l'oreille interne, produisent des déséquilibres et des sensations de vomissement (mal de mer, de véhicule, d'avion etc.).

Les vibrations mécaniques qui agissent sur le corps humain peuvent produire:

- la diminution de l'activité physique et intellectuelle;
- des dommages mécaniques (os cassés, des dommages aux poumons);
- des phénomènes subjectifs (gêne, douleur et peur).

L'exposition de courte durée aux vibrations a comme effets:

- l'épuisement plus rapide;
- le manque de concentration;
- l'aggravation des troubles de la vision.

L'exposition à court terme aux vibrations a comme conséquences:

- des troubles musculo-squelettiques – notamment des problèmes de la colonne vertébrale;
- des affections de la circulation sanguine, notamment aux doigts.

### 3.3. Les effets des vibrations transmises au système main-bras

L'action des vibrations globales sur le corps humain a des effets différents par comparaison avec l'action des vibrations sur le système main-bras.

La transmission des vibrations au système main – bras génère des risques pour la santé et pour la sécurité des travailleurs, notamment des troubles vasculaires, des lésions de l'os ou des articulations, des troubles neurologiques ou musculaires.

La gravité des effets biologiques des vibrations transmises au système main-bras dans des conditions de travail est influencée par plusieurs facteurs:

- *La durée d'exposition et la méthode de travail* (la durée, la fréquence et les séquences des périodes de travail et de repos, le dépôt ou le maintien dans la main de l'outillage arrêté pendant les pauses de travail etc.). Sont importantes aussi la durée de l'exposition au cours d'une journée de travail et la durée cumulée de la journée de travail [MAL 98];

- *Les directions des vibrations* transmises aux mains et aussi la grandeur et la direction des forces appliquées par les mains de l'opérateur à l'outil et à son propre corps pendant l'exposition (c'est-à-dire les angles des articulations des doigts, de la main, du poignet, du coude et de l'épaule);

- *La surface et la partie des mains / des bras* exposées aux vibrations;

- *Le type et l'état des mécanismes vibratoires* des outils à main ou de la pièce travaillée;

- *La méthode de travail et la qualification de l'opérateur.*

Les facteurs suivants peuvent influencer, en particulier, les modifications de la circulation provoquées par des vibrations transmises au système main-bras:

*Les facteurs de l'environnement de travail:* en particulier le microclimat, le bruit et les agents chimiques et certains problèmes de santé individuels, la présence des agents qui affectent la circulation périphérique, tels que le tabagisme ou les médicaments pour certaines maladies qui ne sont pas produites par les vibrations.

La zone de sensibilité du système main-bras est située entre les fréquences de 6,3 Hz et 1250 Hz. L'exposition à ces vibrations peut conduire à une série de maladies et peut affecter la circulation sanguine. Ce phénomène est connu comme *le syndrome de Raynaud*.

L'effet est similaire à l'action du froid de longue durée par le gel des doigts qui deviennent blancs.

Le syndrome Raynaud ou «la maladie des doigts blancs» consiste dans l'atrophie et la sclérose des capillaires de la circulation périphérique des doigts, sous l'action prolongée des vibrations mécaniques sur les mains de l'opérateur humain.

Le blanchiment des doigts se produit à cause du manque de circulation sanguine périphérique.

L'évolution du syndrome de Raynaud se déroule typiquement ainsi:

- a) des picotements et des pertes légères de sensibilité tactile ou l'engourdissement des doigts;
- b) des blancheurs des doigts, généralement sans affecter le pouce;
- c) des blancheurs des doigts, en affectant le pouce;
- d) la douleur, parfois avec une rougeur, qui accompagne la reprise de la circulation sanguine en général, après un intervalle entre 15 minutes jusqu'à une heure, parfois plus;
- e) les crises se produisent fréquemment par périodes courtes et sont dues au réchauffement artificiel des mains ou des outils.

### **3.4. Les effets des vibrations à action générale, transmises au corps entier (vibrations globales)**

L'exposition aux vibrations à action générale produit une distribution complexe des forces et des mouvements oscillatoires dans le corps.

Cela peut provoquer des sensations désagréables, donnant naissance à un inconfort, à la réduction des capacités (par exemple, diminution de l'acuité visuelle) ou présente même un risque pour la santé (par exemple: la destruction des tissus ou des changements physiologiques).

Les principaux effets des vibrations sur l'homme se produisent sur la santé, sur les activités et le confort [GUI 06b].

Il existe beaucoup de récepteurs dans l'être humain qui réagissent aux vibrations: la partie du corps qui est en contact avec la surface vibrante, l'intérieur du corps où se transmettent les vibrations (les récepteurs de la peau, suivis par les systèmes et les centres récepteurs dans différents tissus), l'appareil auditif qui réagit aux vibrations quand elles agissent sur le corps entier.

Toute partie du corps peut être affectée par l'exposition à une quantité suffisamment importante de vibrations (les parties du corps qui seront affectées le plus probablement pendant l'exposition aux vibrations à action générale sont influencées par la distribution dans le corps des vibrations, cette répartition dépendant de la fréquence et de la direction des vibrations et du mode de couplage du corps à la source de vibration).

L'interférence des vibrations avec l'activité déposée (par exemple l'écriture ou la lecture) peut être parfois considérée comme une cause/une source de inconfort. Les effets dépendent de la nature de cette activité.

Les vibrations qui affectent le corps humain sont comprises entre les fréquences de 0,5 et 80 Hz. Les vibrations sont transmises aux parties du corps qui entrent en contact direct avec la source de vibration, habituellement le siège du conducteur ou la plate-forme de travail.

Sous l'action des vibrations produites par ces machines, les douleurs de dos sont les plus fréquentes et elles ont l'effet prédominant sur l'organisme.

L'exposition aux vibrations produit des effets négatifs sur l'activité humaine. Les vibrations à action générale transmises au corps entier peuvent affecter:

- l'accumulation d'informations à l'aide des sens;
- le traitement des informations;
- les niveaux d'intérêt, la stimulation ou la fatigue;
- les actions intentionnelles.

La vue est le mécanisme de la perception affecté le plus facilement par l'action des vibrations, parce que même les petits mouvements d'une image sur la rétine de l'œil peuvent dégrader l'acuité visuelle.

La perception de l'orientation du corps et la stabilité de la position peuvent être également affectées.

Pour l'individu exposé à l'action des vibrations pendant les activités, le lieu de contact du corps avec la source des vibrations est d'une importance particulière.

### **3.5. Les effets physiologiques et pathologiques de l'action des vibrations sur l'homme**

Les vibrations mécaniques qui sont transmises sur l'homme ont une action nocive complexe, affectant la santé de l'homme par les effets physiques et pathologiques, et aussi l'embarrassent par l'alourdissement du développement des processus de travail jusqu'à la perte de la capacité de travail. Les plus importants effets produits par l'action des vibrations sont de nature: physiologique, mécanique, thermique. Les deux derniers sont dominants.

À la suite de l'exposition aux vibrations, soit de l'ensemble du corps, soit seulement de certaines parties de celui-là, apparaissent des troubles de nature fonctionnelle et organique telles que:

- la stimulation du système nerveux et de l'activité hormonale, provoquant la modification des processus métaboliques;
- l'apparition des troubles de la sensibilité périphérique tactile;
- l'apparition des états de fatigue et de somnolence, manifestés par la diminution de l'attention et de l'acuité visuelle, ce qui conduit à la réduction de la capacité de travail;
- l'apparition des états émotionnels, de peur et d'anxiété;
- l'apparition des douleurs thoraciques, épigastriques, habituellement accompagnées de nausées, pertes d'appétit, vomissements, maux de tête, augmentation du pouls et de la tension artérielle, les changements de la fonction respiratoire;
- l'apparition des troubles vasculaires accompagnées par un refroidissement excessif des extrémités des membres qui entrent en contact avec les parties vibratoires de l'outillage. Dans ce sens, on donne l'exemple de l'apparition de l'effet "blanchiment des doigts", ce qui conduit au manque de sensibilité jusqu'à l'aspect de "doigt mort";
- la provocation des lésions ostéo-articulaires et des tendons musculaires.

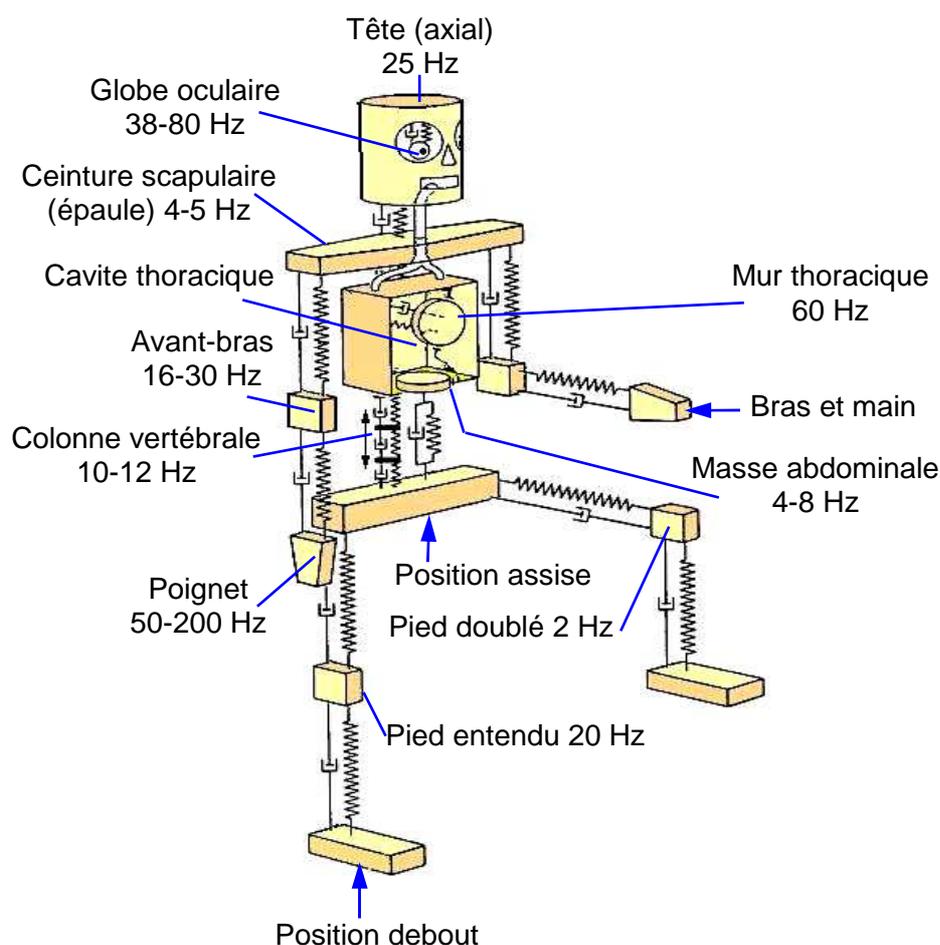
La plupart des études ont comme base les effets indésirables provoqués par les vibrations sur l'organisme, mais les vibrations ne sont pas toujours une source d'agacement. Par exemple, les effets bénéfiques des vibrations sont utilisés à la construction des appareils médicaux (de dialyse, de massage etc.).

La valeur limite des vibrations n'est pas importante sans l'indication de la position du sujet et des facteurs de l'environnement.

La position de la personne est essentielle et aussi son degré de mobilité. Par exemple, dans les activités avec utilisation des mains au lieu de travail, on peut décrire les mouvements discrets (en appuyant sur un bouton) ou continu (le pilotage d'un avion).

Les performances dynamiques des mains et des installations sont établies de manière à atténuer les mouvements de vibrations et ceci s'effectue autour de la valeur de 1 Hz. Mais ces performances ne peuvent pas être établies avec une exactitude de 100% parce qu'elles dépendent de la position des mains pendant les opérations, l'entrée des vibrations dans le système et d'autres facteurs qui ne sont pas prévus antérieurement.

Dans la Figure 3.1 sont indiquées les fréquences propres des principales parties du corps humain [RAS 83].



**Fig. 3.1** Le système mécanique équivalent, simplifié, du corps humain et les fréquences propres des différents organes pour les deux positions (restant assis et debout)

Les vibrations avec des fréquences entre 2,5 et 5 Hz génèrent des résonances puissantes dans les vertèbres, au niveau du cou et de la zone lombaire et peuvent atteindre des amplifications de jusqu'à 240%; les vibrations entre 4 et 6 Hz conduisent aux résonances du tronc, avec des amplifications de jusqu'à 200%, tandis que les vibrations de 20 à 30 Hz causent des résonances dans la zone tête – cou - épaule, avec des amplifications jusqu'à 350%.

Une limite utile pour la mesure des vibrations est la connaissance de la réponse humaine aux vibrations et à la variation des systèmes réels (par exemple, l'interface du contrôle de la main) qui offre la possibilité d'anticiper les forces et des mouvements qui ont causés des vibrations, la conception et l'interprétation de ces données pour l'amélioration du système.

À l'évaluation des effets des vibrations sur l'organisme humain on recommande l'application des règles de sécurité pour la personne exposée aux vibrations selon la norme BS 6841, SR ISO 2631 et l'utilisation des fréquences permises.

### 3.6. Les effets nocifs des actions des vibrations sur l'homme

Une exposition prolongée du corps entier ou des parties du corps aux vibrations peut conduire à une série d'effets indésirables, qui sont résumés dans le Tableau 3.2 [RAS 83].

Tableau 3.2

Les effets indésirables à la suite de l'exposition prolongée aux vibrations

Symptôme	Fréquence à laquelle survient
Sensation générale de malaise	4-9 Hz
Maux de tête	13-20 Hz
Gêne à la mâchoire inférieure	6-8 Hz
Problèmes avec des paroles	13-20 Hz
Sensation de boule dans la gorge	12-16 Hz
Douleurs thoraciques	5-7 Hz
Douleurs abdominales	4-10 Hz
Besoin impérieuse d'uriner	10-18 Hz
Difficultés aux mouvements respiratoires	4-8 Hz
Augmentation du tonus musculaire	13-20 Hz

#### 1. Les maladies qui sont dues aux vibrations:

- Les maladies professionnelles des travailleurs qui travaillent sur la presse et dans les ateliers d'usinage à chaud et à froid;
- Le cancer du aux oscillations de noyau cellulaire à la pulsation (ou à proximité de la pulsation) de résonance (noyau - masse, plasma - amortisseur, membrane - élasticité);
- Les maladies du cœur, du foie, pancréas, de la bile peuvent avoir des explications dans les vibrations;
- L'obésité peut être un résultat de la combustion insuffisante qui se produit au niveau cellulaire;
- Les vibrations peuvent provoquer des déplacements de certains organes, la rupture des ligaments ou des tissus, des hémorragies pulmonaires (pour les fréquences dans le domaine 5-15 Hz);
- La fatigue qui apparaît au volant due aux vibrations.

#### 2. Les effets nocifs des vibrations sur l'environnement:

- Accroître le degré d'usure des machines;
- Provoquer la diminution de la résistance des bâtiments, ponts, rails et autres installations techniques et constructions;
- Contribuer à l'insécurité des transports
- Compromettre les mesures optiques;
- Réduire le degré de précision dans l'exécution d'une pièce.

### 3.7. La législation

#### 3.7.1. La norme SR ISO 2631-1/2001. Les vibrations et les chocs mécaniques. L'évaluation de l'exposition humaine aux vibrations globales du corps humain

À cause des difficultés d'évaluation de la réponse aux vibrations, ainsi qu'aux données insuffisantes obtenues jusqu'à présent par les recherches, l'Organisation Internationale des Normalisations (ISO) a établi la norme SR ISO 2631-1 qui fait référence à l'évaluation de l'exposition humaine aux vibrations globales du corps. La norme SR ISO 2631-1 a comme but la définition des méthodes de quantification des vibrations globales du corps sur la santé, le confort de l'homme, la perception des vibrations et l'incidence du mal de mouvement. La norme fixe les limites numériques pour l'exposition aux vibrations transmises d'une surface solide au corps humain dans le domaine de fréquences de [SR ISO 2631/1]:

- de 0,5 Hz à 80 Hz pour la santé, le confort et la perception de la vibration;
- de 0,1 Hz à 0,5 Hz pour le mal de mouvements.

Le domaine de fréquences de 0,5 Hz jusqu'à 80 Hz produit des vibrations suivant les six axes sur la surface de la chaise sur laquelle est assis l'opérateur humain au cours du travail qui sollicite la position assise (trois axes de translation: les axes x, y et z et trois axes de rotation  $r_x$ ,  $r_y$  et  $r_z$ ). De même, il s'applique pour les trois axes de translation (x, y et z) sur le dossier et pour les jambes des personnes en position assise (Fig. 3.2).

Cette norme ne comprend pas les effets potentiels sur la performance humaine, mais contient les principes des méthodes privilégiées de montage des capteurs pour la détermination de l'exposition humaine. Les capteurs sont utilisés pour la détection des mouvements transmis par les surfaces d'appui du corps humain comme un entier: les jambes d'une personne debout, le siège, le dos et les jambes d'une personne assise ou la surface d'appui pour une personne couchée.

Quelques recherches indiquent le fait que la norme n'est pas assez exacte car à l'exposition sous la limite maximale admissible, existe le risque des maladies au niveau des muscles ou même du squelette.

Cette norme est applicable uniquement aux personnes en bonne santé: les personnes capables de développer une activité quotidienne normale, inclusivement à voyager ou travailler dans des conditions tendues ou changeantes.

### **3.7.1.1. La mesure des vibrations**

La principale grandeur mesurée des vibrations doit être la valeur de l'accélération. Dans le cas des fréquences très basses et des faibles valeurs des vibrations doivent être effectuées des mesures de la vitesse et les valeurs obtenues doivent être transposées en accélérations.

Les vibrations doivent être mesurées selon un système de coordonnées avec l'origine dans un point où l'on considère que les vibrations entrent dans le corps humain.

La vibration transmise dans le corps humain doit être mesurée sur la surface entre le corps et cette surface. Pour les personnes assises la norme utilise trois surfaces principales: la surface d'appui de la chaise, le dossier de la chaise et la surface d'appui pour les pieds.

### **3.7.1.2. L'évaluation des vibrations**

L'évaluation des vibrations doit inclure des mesures des accélérations moyennes quadratiques (r.m.s.) pondérées. L'accélération moyenne quadratique pondérée est exprimée en mètres par seconde au carrée ( $m/s^2$ ) pour les vibrations de translation et pour les vibrations de rotation en radians par seconde au carrée ( $rad/s^2$ ). L'accélération r.m.s. pondérée doit être calculée à l'aide de la relation (1.8) donnée au Chapitre 1 [SR ISO 2631/1].

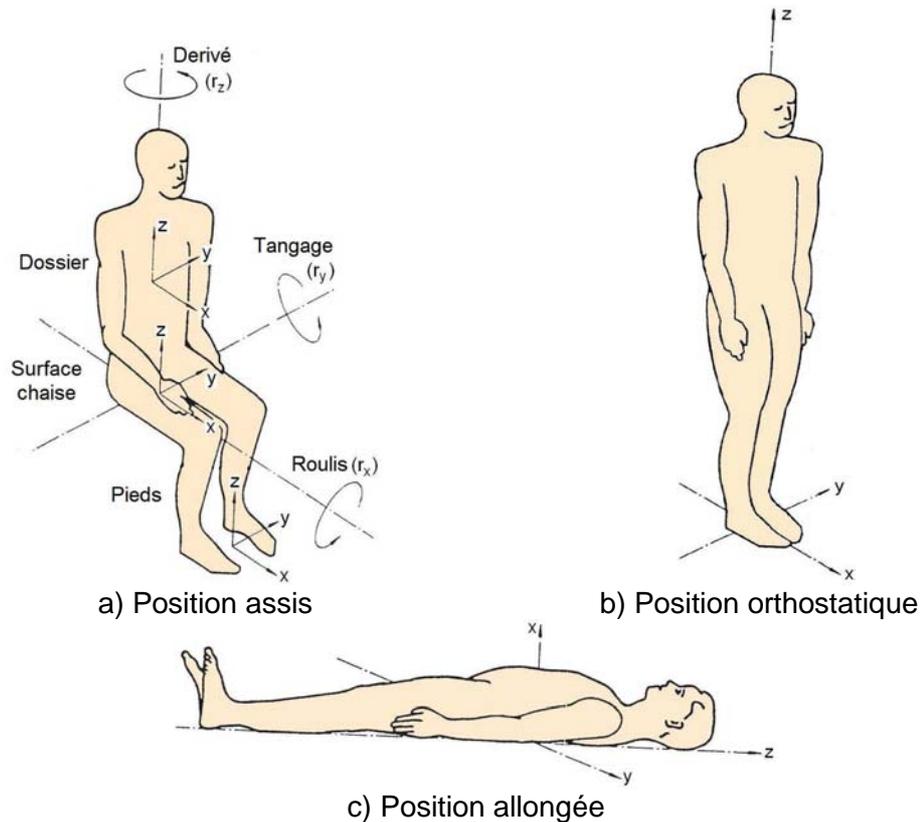
La pondération en fréquence est présentée dans l'Annexe A2.

L'accélération r.m.s. pondérée doit être déterminée pour chaque axe des vibrations de translation sur la surface sur laquelle est située la personne.

L'évaluation de l'effet des vibrations sur la santé doit être effectuée indépendamment sur chaque axe (Fig. 3.2).

L'orientation des systèmes de coordonnées biodynamiques est donnée habituellement par la règle de la main droite. Pour une personne assise ou debout, les directions positives sont: de dos en face, de la droite à gauche et de bas en haut [SR ISO 8727].

La recherche biodynamique et aussi les études épidémiologiques ont mis en évidence un risque élevé de détérioration de la santé du à l'exposition à long terme aux vibrations globales du corps, à grande intensité. En principal, sont affectées la partie lombaire de la colonne vertébrale et le système nerveux afférent. Un effet supplémentaire est celui des dommages qu'ils peuvent causer aux facteurs métaboliques ou d'autres facteurs internes. Parfois, on suppose qu'à la douleur musculaire peuvent contribuer aussi des facteurs de l'environnement tel que la posture du corps, la température basse, mais aussi la sécheresse.



**Fig. 3.2** Les positions du corps humain soumis aux vibrations globales définies par SR ISO 2631-1

Un effet supplémentaire est la détérioration que peuvent subir les facteurs métaboliques ou d'autres facteurs internes.

Une durée d'exposition plus grande (dans la journée de travail ou journalier, par plusieurs années) et une intensité plus grande des vibrations signifient une dose plus élevée et peuvent contribuer à une croissance du risque, tandis que les périodes de repos réduisent le risque.

Pour établir une relation quantitative entre l'exposition aux vibrations et le risque des effets sur la santé il n'existe pas des données suffisantes, et il résulte qu'il n'est pas possible d'évaluer les vibrations globales du corps en fonction de la probabilité du risque pour des différentes valeurs et durées d'exposition [SR ISO 2631/1].

Deux expositions journalières aux vibrations différentes sont considérées équivalentes quand:

$$a_{w1} \cdot T_1^{1/2} = a_{w2} \cdot T_2^{1/2} \quad (3.1)$$

où:

$a_{w1}$  et  $a_{w2}$  – représentent les valeurs de l'accélération r.m.s. pondérée pour la première et respectivement la deuxième exposition aux vibrations globales;

$T_1$  et  $T_2$  – sont les durées correspondantes pour la première exposition et la deuxième exposition.

D'autres études indiquent une dépendance du temps selon la formule suivante:

$$a_{w1} \cdot T_1^{1/4} = a_{w2} \cdot T_2^{1/4} \quad (3.2)$$

Dans la figure 3.3 est présentée une zone d'attention à partir des indications pour la santé obtenues avec les relations 3.1 et 3.2.

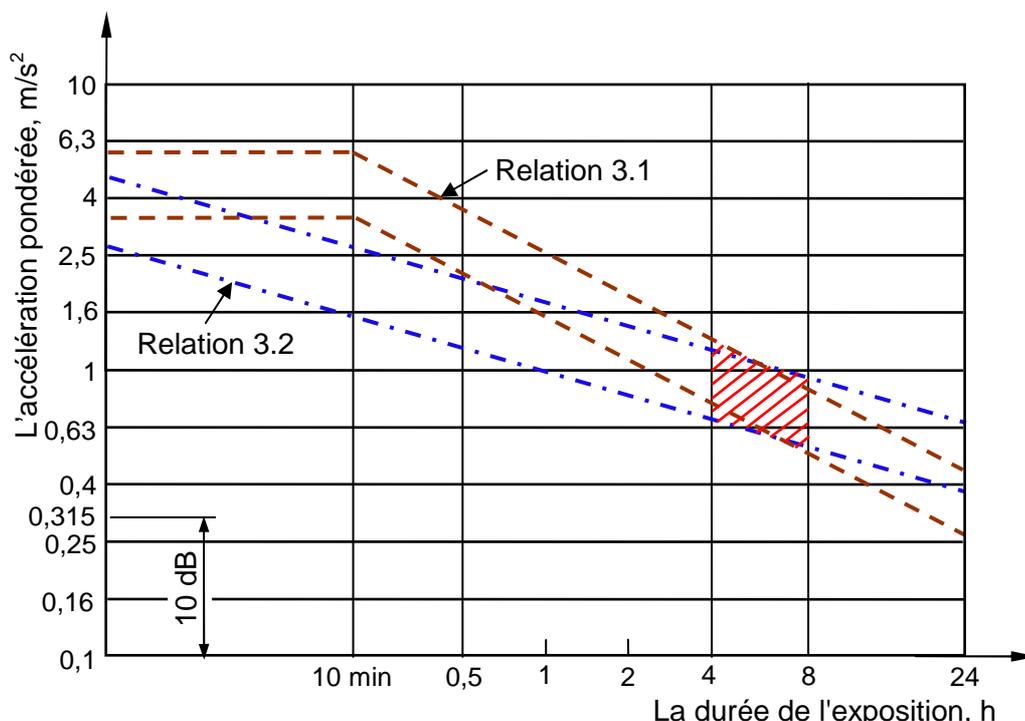


Fig. 3.3. La zone d'attention des indications pour la santé [SR ISO 2631/1]

Pour les expositions situées au-dessous de la zone hachurée, les effets sur la santé n'ont pas été mis en évidence très clairement et/ou ils n'ont pas été observés objectivement; la zone hachurée indique l'attention aux risques potentiels pour la santé et pour les expositions qui sont au-dessus de la zone hachurée sont probables les risques pour la santé. Cette recommandation est fondée, principalement, sur les expositions dans le domaine de 4 h à 8 h, comme il est indiqué par la zone hachurée dans la Figure 3.3. [SR ISO 2631/1].

On considère que certaines vibrations provoquent l'inconfort inacceptable dans une situation, mais peuvent être classées comme agréables ou drôles dans d'autres situations.

Cinquante pour cent des personnes vigilantes, saines, peuvent détecter une vibration pondérée avec une valeur de pic de 0,015 m/s<sup>2</sup>.

### 3.7.2. La norme SR EN ISO 5349-1/2003. Les vibrations mécaniques. Les mesures et l'évaluation de l'exposition humaine aux vibrations transmises par la main

Les vibrations de haute intensité peuvent être transmises aux mains et aux bras des opérateurs par des outils, des machines ou les pièces à usiner vibrantes (scies à chaîne, outils à percussion ou moulins à commande électrique, hydraulique ou pneumatique).

En fonction du type et du lieu de travail, les vibrations agissent sur un seul bras ou sur les deux bras en même temps et elles peuvent être transmises par la main et le bras à l'épaule.

L'objectif de la norme SR EN ISO 5349-1/1 est de présenter les exigences générales pour la mesure et le rapport de l'exposition aux vibrations transmises par la main selon les trois axes orthogonaux. La norme définit la pondération en fréquence et les filtres de bande à utiliser afin de permettre une comparaison uniforme des mesures.

Il existe quelques facteurs qui influencent les effets de l'exposition humaine aux vibrations transmises par la main dans les conditions de travail. Ils sont les suivants:

- le spectre de fréquence des vibrations;
- la valeur de l'accélération des vibrations;
- la durée d'exposition pendant une journée de travail;
- l'exposition cumulative jusqu'à la date de la mesure.

### 3.7.2.1. L'emplacement et l'orientation des transducteurs

Le transducteur des vibrations est habituellement un accéléromètre qui peut être destiné à effectuer des mesures générales des vibrations (aux outils sans percussion) ou peut être destiné spécifiquement aux accélérations de grand pic, comme sont celles produites par les outils à percussion.

Les vibrations transmises à la main doivent être mesurées et rapportées dans les trois directions d'un système orthogonal de coordonnées, tel que celui défini dans la Figure 3.4. Il est préférable que les vibrations soient mesurées simultanément sur les trois directions.

Bien que pour la caractérisation de l'exposition aux vibrations s'utilise comme grandeur principale l'accélération moyenne quadratique (r.m.s.) pondérée en fréquence de la surface de contact avec la main, on peut présumer que les effets biologiques dépendent en grande partie du couple de la main avec la source des vibrations [SR ISO 5349-1/1].

À la plupart des outils, les vibrations transmises à la main contient les contributions de toutes ces trois directions de mesure.

L'évaluation de l'exposition aux vibrations est fondée sur une grandeur qui combine toutes ces trois axes x, y et z. Celle-ci est la valeur totale de l'accélération des vibrations,  $a_{hv}$  et elle est définie comme étant la racine carrée de la somme des carrés des valeurs de ces trois composantes de l'accélération [SR ISO 5349-1/1]:

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2} \quad (3.3)$$

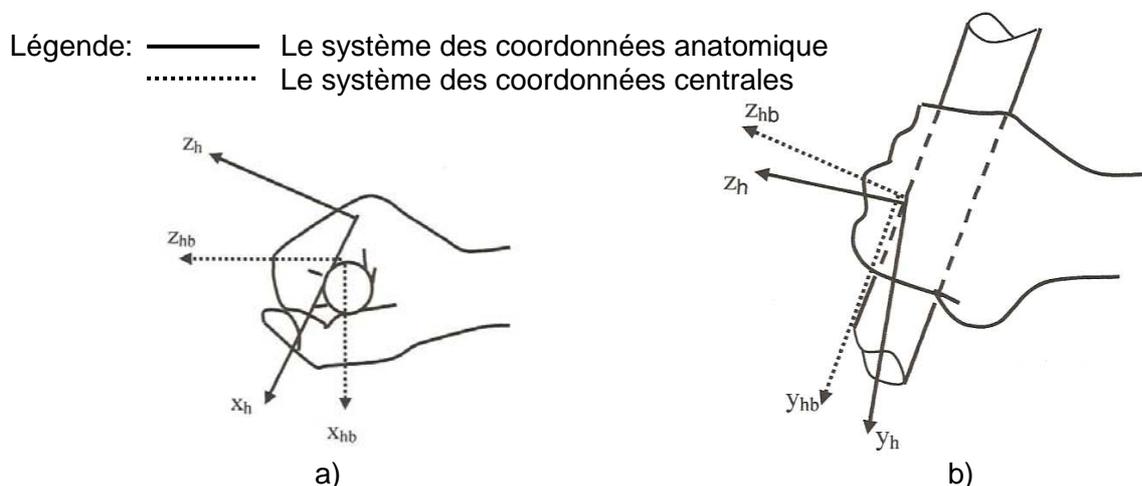


Fig. 3.4. Les systèmes des coordonnées anatomique et centrale défini par SR ISO 5349-1

a) Le système des coordonnées anatomique:

ORIGINE:

Le centre du système est considéré l'extrémité du troisième os métacarpienne de chaque main.

ORIENTATION:

$z_h$ : la direction de l'axe est au long du troisième os métacarpienne.  
 $x_h$ : la direction de l'axe est de l'intérieur de la paume, normale à  $z_h$ .  
 $y_h$ : la direction de l'axe est de la droite à gauche, normale à  $x_h$  et  $z_h$ .

b) Le système des coordonnées centrale (quand l'outil est maintenu en position horizontale):

ORIGINE:

Le centre du système est sur la surface de l'outil, positionné sur la direction du troisième os métacarpien de la main.

ORIENTATION:

$z_{hb}$ : L'axe a la direction horizontale, normale à  $x_{hb}$  et  $y_{hb}$ .  
 $x_{hb}$ : L'axe a la direction verticale.  
 $y_{hb}$ : L'axe a la direction parallèle à l'axe de l'outil (ou aux parties à son aide).

### 3.7.3. Guide consultatif de bonnes pratiques de l'Union Européenne visant la Directive 2002/44/CE. Les vibrations main-bras

Certains calculateurs disponibles sur l'Internet simplifient le calcul des expositions journalières aux vibrations [GUI 06a].

#### 3.7.3.1. Les graphiques pour le calcul de l'exposition journalière aux vibrations

Le graphe de la figure 3.5 donne une méthode alternative simple pour déterminer l'exposition journalière ou l'exposition partielle aux vibrations de l'ensemble main-bras, sans recourir à un ordinateur.

À la première vue du graphique de la Fig. 3.5. on observe que la ligne de l'amplitude d'accélération  $A(8)$  qui est l'amplitude moyenne pondérée pour une période de 8 heures, est donnée par le point d'intersection de la valeur de l'amplitude maximale et la valeur de la période d'exposition. Dans le graphe est donné un exemple de mesure: pour une exposition à  $4 \text{ m/s}^2$  d'accélération maximale pendant 4 heures et 30 minutes, on obtient une amplitude de la vibration partielle  $A(8)$  de  $3 \text{ m/s}^2$ .

Dans la zone verte du graphique sont présentées les valeurs d'exposition active aux vibrations. L'exposition de longue durée à ces vibrations peut créer de graves dommages au corps humain. On doit prendre en considération qu'à une telle exposition, le corps humain n'est pas en sécurité, il pourrait y exister un risque de maladie, à cause des vibrations de valeurs faibles transmises à la main et au bras après plusieurs années d'exposition.

Dans la figure 3.6 est présenté le nomogramme qui fournit une méthode alternative simple pour l'obtention du temps d'exposition journalière aux vibrations main-bras, sans l'aide des relations de calcul.

Il est possible de simplifier la gestion de l'exposition aux vibrations main-bras, en utilisant un système de "points" d'exposition. Pour une machine ou un véhicule donné, le nombre des points d'exposition accumulés pendant une heure ( $P_{E,1h}$ ) peut être obtenu à partir de l'amplitude des vibrations  $a_{hv}$  [ $\text{m/s}^2$ ], en utilisant la formule suivante:

$$P_{E,1h} = 2a_{hv}^2 \quad (3.4)$$

dans laquelle:

$P_{E,1h}$  – représente le nombre de points d'exposition accumulés pendant une heure;

$a_{hv}$  – est l'amplitude des vibrations, [ $m/s^2$ ].

Les points d'exposition sont ajoutés simplement, alors on peut établir un nombre maximum de points par personne et par jour. Les points correspondants au seuil actif d'exposition et à la valeur limite d'exposition aux vibrations main-bras sont:

- le seuil actif d'exposition ( $2,5 m/s^2$ ) = 100 points;
- la valeur limite d'exposition ( $5 m/s^2$ ) = 400 points.

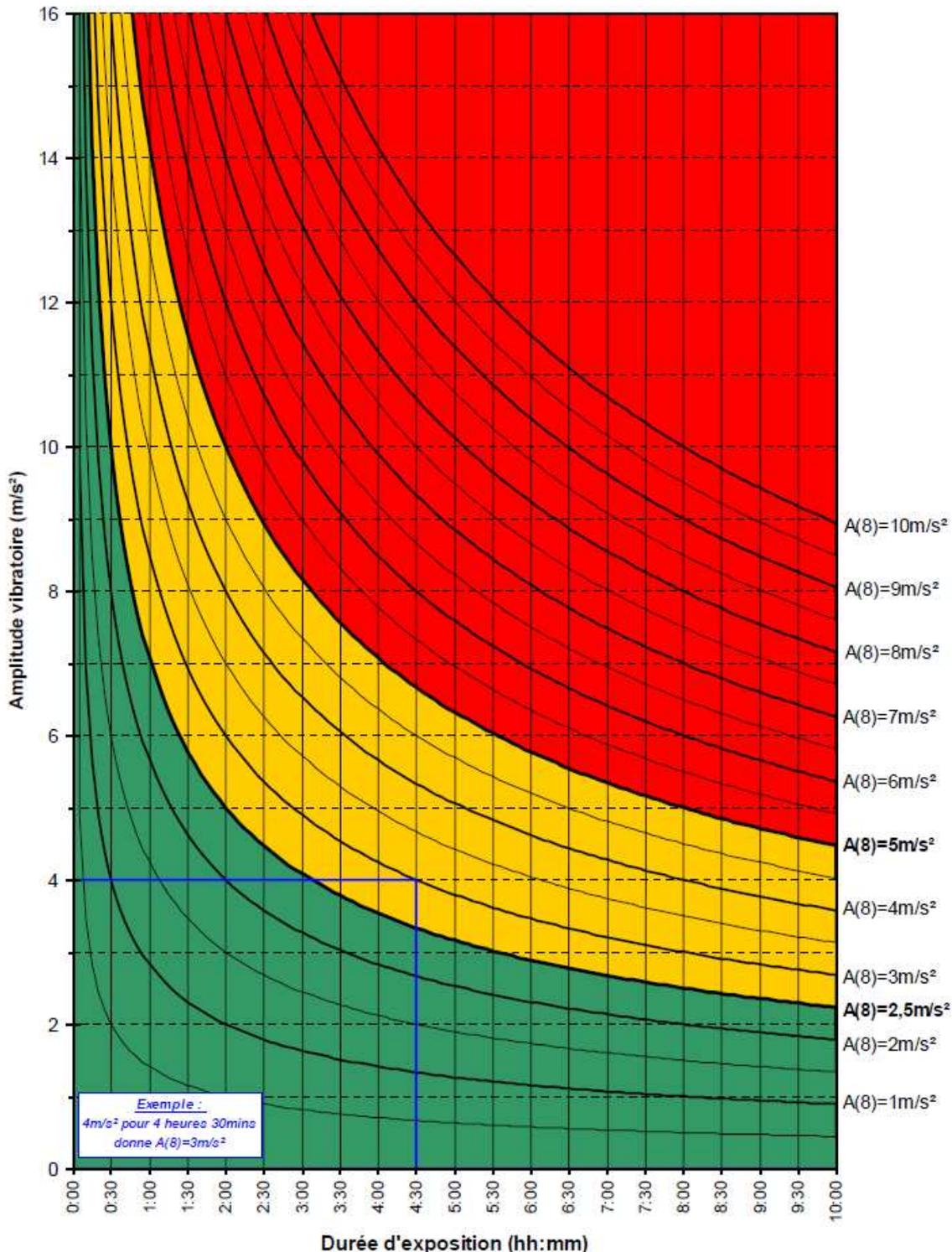


Fig. 3.5. Le graphe d'exposition journalière aux vibrations main-bras [GUI 06a]

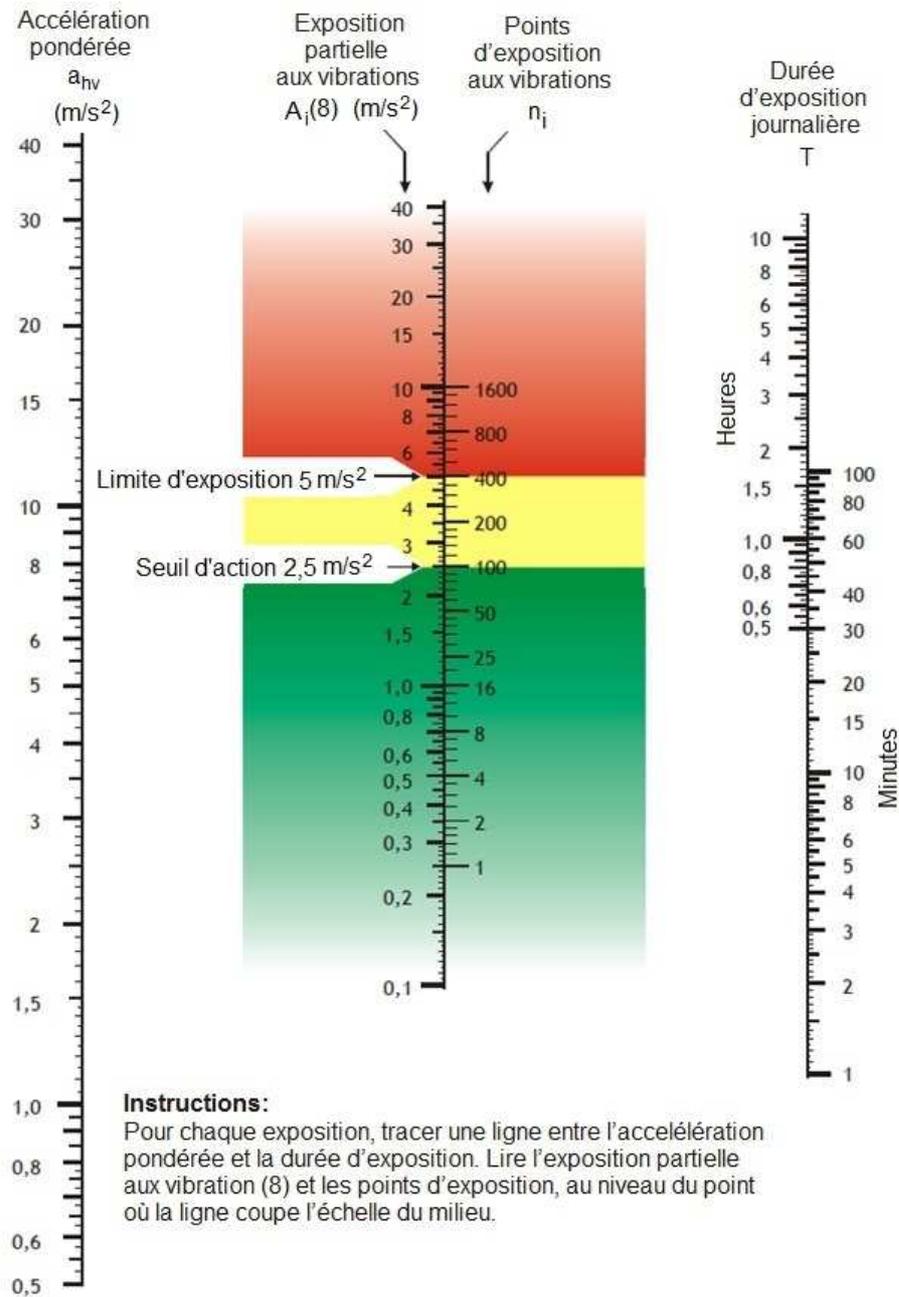


Fig. 3.6. Le nomogramme d'obtention du temps d'exposition journalière aux vibrations main-bras [GUI 06a]

En général, le nombre de points d'exposition  $P_E$  est défini par la relation:

$$P_E = \left( \frac{a_{hv}}{2,5} \right)^2 \frac{T}{8 \text{ ore}} 100 \quad (3.5)$$

où:

$P_E$  – est le nombre de points d'exposition;

$a_{hv}$  – est l'amplitude des vibrations mesurées [m/s<sup>2</sup>];

T – est le temps d'exposition mesurée en heure.

L'exposition journalière A(8) peut être calculée en utilisant la relation:

$$A(8) = 2,5 \sqrt{\frac{P_E}{100}} \quad (3.6)$$

Dans le Tableau 3.3 est donnée une méthode simple pour le calcul du nombre de points d'exposition.

Tableau 3.3.

Tableau avec les „points” d'expositions aux vibrations main-bras [GUI 06a].

Accélération (m/s <sup>2</sup> )	20	67	200	400	800	1600	2400	3200	4000	4800	6400	8000
	19,5	63	190	380	760	1500	2300	3050	3800	4550	6100	7600
	19	60	180	360	720	1450	2150	2900	3600	4350	5800	7200
	18,5	57	170	340	685	1350	2050	2750	3400	4100	5500	6850
	18	54	160	325	650	1300	1950	2600	3250	3900	5200	6500
	17,5	51	155	305	615	1250	1850	2450	3050	3700	4900	6150
	17	48	145	290	580	1150	1750	2300	2900	3450	4600	5800
	16,5	45	135	270	545	1100	1650	2200	2700	3250	4350	5450
	16	43	130	255	510	1000	1550	2050	2550	3050	4100	5100
	15,5	40	120	240	480	960	1450	1900	2400	2900	3850	4800
	15	38	115	225	450	900	1350	1800	2250	2700	3600	4500
	14,5	35	105	210	420	840	1250	1700	2100	2500	3350	4200
	14	33	98	195	390	785	1200	1550	1950	2350	3150	3900
	13,5	30	91	180	365	730	1100	1450	1800	2200	2900	3650
	13	28	85	170	340	675	1000	1350	1700	2050	2700	3400
	12,5	26	78	155	315	625	940	1250	1550	1900	2500	3150
	12	24	72	145	290	575	865	1150	1450	1750	2300	2900
	11,5	22	66	130	265	530	795	1050	1300	1600	2100	2650
	11	20	61	120	240	485	725	970	1200	1450	1950	2400
	10,5	18	55	110	220	440	660	880	1100	1300	1750	2200
	10	17	50	100	200	400	600	800	1000	1200	1600	2000
	9,5	15	45	90	180	360	540	720	905	1100	1450	1800
	9	14	41	81	160	325	485	650	810	970	1300	1600
	8,5	12	36	72	145	290	435	580	725	865	1150	1450
8	11	32	64	130	255	385	510	640	770	1000	1300	
7,5	9	28	56	115	225	340	450	565	675	900	1150	
7	8	25	49	98	195	295	390	490	590	785	980	
6,5	7	21	42	85	170	255	340	425	505	675	845	
6	6	18	36	72	145	215	290	360	430	575	720	
5,5	5	15	30	61	120	180	240	305	365	485	605	
5	4	13	25	50	100	150	200	250	300	400	500	
4,5	3	10	20	41	81	120	160	205	245	325	405	
4	3	8	16	32	64	96	130	160	190	255	320	
3,5	2	6	12	25	49	74	98	125	145	195	245	
3	2	5	9	18	36	54	72	90	110	145	180	
2,5	1	3	6	13	25	38	50	63	75	100	125	
	5m	15m	30m	1h	2h	3h	4h	5h	6h	8h	10h	
Durée d'exposition quotidienne aux vibrations main-bras												

### 3.7.4. Le calcul de l'exposition journalière aux vibrations par la main

L'exposition aux vibrations dépend de la grandeur des vibrations et de la durée de l'exposition aux vibrations.

La durée quotidienne d'exposition aux vibrations est le temps total durant lequel la main est exposée (ou les mains sont exposées) aux vibrations pendant une journée de travail.

L'exposition journalière aux vibrations,  $A(8)$ , pour un employé qui effectue une tâche sur une seule machine, peut être calculé à partir de la grandeur des vibrations (la valeur totale de l'accélération des vibrations) et de la durée d'exposition aux vibrations, par la relation suivante [SR ISO 5349/1]:

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \quad (3.7)$$

où:  $A(8)$  – est l'amplitude équivalente pour 8 heures [m];

$a_{hv}$  – est l'amplitude des vibrations, mesurée en  $m/s^2$ ;

$T$  – est la durée journalière d'exposition aux vibrations [s];

$T_0$  – est la durée de référence de huit heures (28 800 s), [s].

Pour une personne qui est exposée sur la longueur d'une journée à plusieurs sources de vibrations ayant des valeurs différentes, l'exposition quotidienne aux vibrations,  $A(8)$  est calculée avec la relation:

$$A(8) = \sqrt{\frac{T}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{hvi}^2 T_i} \quad (3.8)$$

où:  $A(8)$  – est l'amplitude équivalente pour 8 heures, [m];

$T$  – est la durée quotidienne d'exposition aux vibrations, [s];

$T_0$  – est la durée de référence de huit heures (28 800 s), [s];

$a_{hvi}$  – est la valeur totale de l'accélération des vibrations pour l'opération  $i$ , [ $m/s^2$ ];

$T_i$  – est la durée de l'opération  $i$ , [s].

On présente un exemple de calcul pour une exposition journalière aux vibrations d'un travailleur qui utilise trois machines pendant une seule journée de travail. Le travailleur utilise les machines suivantes:

1. une meuleuse d'angle: avec une accélération de  $4 m/s^2$ , pendant 2,5 heures;
2. une fraiseuse conique: avec une accélération de  $3 m/s^2$ , pendant 1 heure;
3. un burineur: avec une accélération de  $20 m/s^2$ , pendant 15 minutes.

Les expositions partielles pour les trois machines correspondent aux valeurs suivantes:

$$1. \text{ Meuleuse: } A_{meuleuse}(8) = 4 \sqrt{\frac{2,5}{8}} = 2,2 m/s^2$$

$$2. \text{ Fraiseuse: } A_{fraise}(8) = 3 \sqrt{\frac{1}{8}} = 1,1 m/s^2 \quad (3.9)$$

$$3. \text{ Burineur: } A_{burineur}(8) = 20 \sqrt{\frac{15}{8 \times 60}} = 3,5 m/s^2$$

La valeur totale de l'amplitude de l'accélération de l'exposition journalière est donc:

$$\begin{aligned} A(8) &= \sqrt{A_{meuleuse}(8)^2 + A_{fraise}(8)^2 + A_{burineur}(8)^2} \\ &= \sqrt{2,2^2 + 1,1^2 + 3,5^2} \\ &= \sqrt{4,8 + 1,2 + 12,3} = \sqrt{18,3} = 4,3 m/s^2 \end{aligned} \quad (3.10)$$

Une exposition quotidienne de  $4,3 \text{ m/s}^2$  est au-dessus du seuil d'action et au-dessous de la valeur limite d'exposition, selon la Figure 3.6.

Si on utilise le graphique de la Figure 3.5., ces calculs sont beaucoup plus simples.

### **3.8. Conclusions**

Une exposition excessive des mains aux vibrations peut provoquer des troubles de la circulation sanguine au niveau des doigts, des fonctions neurologiques et locomoteurs des mains et des bras.

Les parties de l'organisme humain ont des fréquences de résonance différentes, ainsi que dans certaines parties de l'organisme l'amplitude des vibrations peut croître dangereusement et peut provoquer des déplacements locaux, si la fréquence d'excitation est proche de sa fréquence propre.

L'exposition d'une personne aux vibrations est plus fréquente au lieu de travail, dans les véhicules de transport et rarement dans les bâtiments situés dans un environnement vibrationnel. Ces vibrations sont définies comme vibrations aléatoires.

Il ne faut pas autoriser l'exposition aux vibrations au-dessus des valeurs limites.

Les vibrations ont un effet négatif sur la santé.

Il faut évaluer les risques qui peuvent survenir à la suite d'une exposition aux vibrations.

L'exposition aux vibrations peut être quotidienne, pour quelques heures par jour ou toute la journée, continue ou intermittente. L'exposition des mains et des doigts aux vibrations conduit à l'apparition des affections dans le temps, incluant les affections de «blanchiment des doigts».

Les vibrations en milieu de travail ont un effet direct sur le travailleur, lui influençant le temps de réaction, la concentration et la santé.

Les effets nocifs des vibrations peuvent être éliminés si l'on adopte des mesures correspondantes dans toutes les phases de la conception et de l'exécution des machines-outils, mais ils peuvent être sensiblement améliorés aussi au cours de leur exploitation.

La nature de la vibration, les caractéristiques des personnes exposées et les effets des vibrations peuvent varier beaucoup d'un environnement à un autre.

Les vibrations transmises à la main doivent être mesurées et rapportées dans les trois directions d'un système orthogonal de coordonnées, avec l'origine dans le point où l'on considère que les vibrations entrent dans le corps.

## CHAPITRE 4

### NOTIONS DE BASE CONCERNANT LA MESURE OPTIQUE DES VIBRATIONS

La mesure de la forme d'un objet présente un grand intérêt, autant dans l'ingénierie que dans d'autres domaines (la médecine, la topographie, l'art, le contrôle de la qualité, la fabrication etc.).

#### 4.1. La méthode Moiré de projection

##### 4.1.1. Généralités

Le phénomène Moiré est utilisé pour mesurer le relief sur une surface bien déterminée. Il existe beaucoup de variantes de la méthode Moiré:

- **Le Moiré géométrique:** est la méthode conformément à laquelle les franges apparaissent grâce à la superposition du réseau témoin sur le réseau déformé collé directement sur la pièce;
- **Le Moiré de projection:** est la méthode conformément à laquelle les franges apparaissent grâce à la superposition de l'image projetée sur l'objet et à celle projetée sur une surface plane;
- **Le Moiré d'ombre:** les franges apparaissent grâce à la superposition entre les lignes du réseau et leur ombre qui se trouve sur l'objet;
- **Le Moiré par réflexion:** les franges apparaissent grâce à la superposition des lignes du réseau témoin avec celles obtenues par leur réflexion sur la surface réfléchissante de l'objet étudié.

Les techniques Moiré sont développées pour la mesure des déformations dans le plan ou hors-plan d'un objet.

Le phénomène de Moiré consiste dans l'apparition des franges d'interférence représentant le lieu géométrique des points d'égal déplacement de l'objet, qui apparaissent à la superposition optique ou mécanique de deux réseaux de lignes ou points, qui ne coïncident pas en orientation, forme ou distance entre lignes.

Dans la littérature, on peut trouver de nombreux articles utilisant le phénomène Moiré.

Cette méthode de mesure 3D est composée de deux étapes. Dans la première étape, le phénomène Moiré consiste dans l'apparition d'un troisième réseau en superposant les deux réseaux de lignes. La deuxième étape, appelée la méthode du décalage de phase, consiste dans la détermination d'un champ de phases à partir d'un certain nombre d'images décalées entre elles d'un déphasage  $\varphi$  quelconque. Ce champ de phases permet la caractérisation d'un réseau de franges.

##### 4.1.2. Le principe du phénomène Moiré

Le principe du Moiré est basé sur un phénomène optique. Ce phénomène se produit lorsque deux réseaux sont superposés. Le phénomène Moiré est la superposition de deux réseaux physiques faisant apparaître un troisième réseau visible

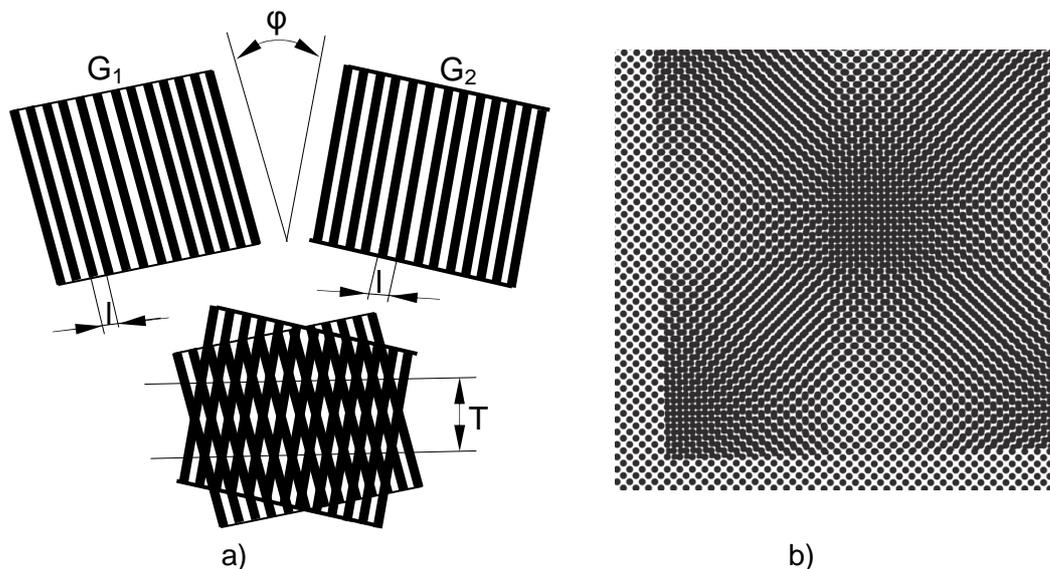
qui est fonction des deux premiers. Les réseaux peuvent être de différentes natures, ils peuvent être constitués géométriquement de lignes, de lignes croisées, de cercles, d'ellipses etc.

Le plus simple phénomène Moiré qui peut être rencontré est celui qui consiste dans la superposition de deux réseaux de lignes identiques avec un décalage angulaire (Fig. 4.1.).

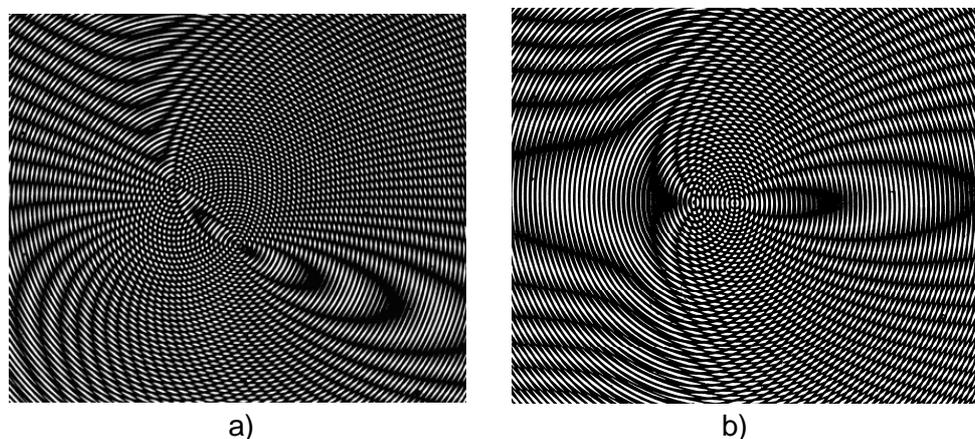
Par effet Moiré on comprend un tableau de franges d'interférence représentant le lieu géométrique des points ou lignes d'égal déplacement  $i$ , qui apparaissent à la superposition optique (sans contact) ou mécanique (avec contact) des deux réseaux de lignes  $G_1$  et  $G_2$  ou des points comme ceux dans la figure 4.1b. Quand les deux réseaux de lignes sont parallèles (l'angle  $\varphi$  est nul) on n'observe pas le champ de franges (seulement sombres ou lumineuses). Quand les réseaux de lignes sont en rotation d'un angle  $\varphi$ , on observe les franges Moiré de période similaire  $T$ , comme dans la figure 4.1 a.

La période  $T$  a l'expression [RUN 08d]:

$$T = \frac{l}{2 \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (4.1)$$

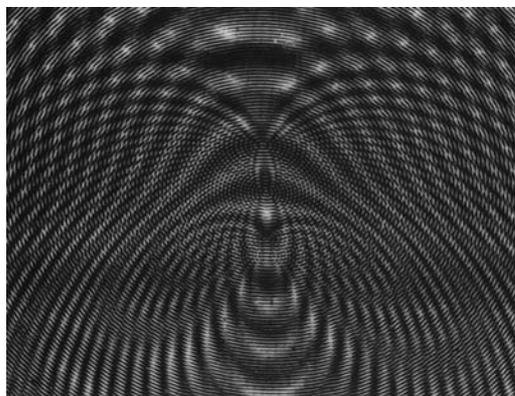


**Fig. 4.1** Le principe de la superposition des deux réseaux pour obtenir des franges Moiré avec un décalage angulaire entre les deux réseaux, a) deux réseaux de lignes; et b) deux réseaux de points



**Fig. 4.2.** Les franges Moirés formées: a) d'un réseau circulaire et d'un réseau elliptique; b) des réseaux elliptiques excentrés [RUN 08b]

Le phénomène peut devenir plus complexe, lorsqu'un réseau circulaire est superposé à un réseau elliptique (selon la Fig. 4.2. a) et encore plus, lorsque les deux réseaux sont elliptiques (selon la Fig. 4.2. b), [BRE 02]. Ce phénomène peut aussi s'étendre à la superposition de trois réseaux ou plus, par exemple, la superposition de quatre réseaux elliptiques, appelés le Moiré de Moiré, (selon la Fig. 4.3.).



**Fig. 4.3.** Les franges Moiré formées par la superposition de quatre réseaux elliptiques excentrés, appelées aussi Moiré de Moiré

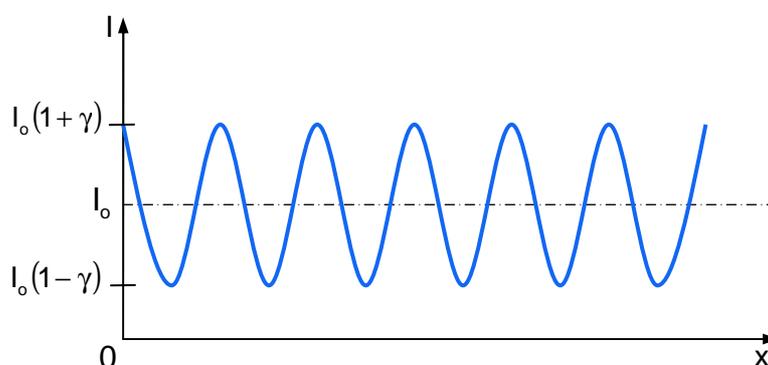
#### 4.1.3. Le principe de la méthode Moiré de projection

La méthode Moiré de projection est une méthode optique qui consiste dans la projection d'un réseau de franges à l'aide d'un projecteur sur la surface d'un corps. Quand le réseau de franges rencontre la surface du corps à mesurer, le réseau est déformé par la forme de la surface et l'image est enregistrée par une caméra CCD.

La géométrie de la surface est obtenue par le traitement d'images numérisées. Si la surface est parfaitement plane, l'intensité des franges projetées alternativement lumineuses et sombres, de manière régulière, espacées d'un pas «p» est donnée par la relation (4.2), en supposant que les franges sont alignées suivant l'axe y [MAR 04].

$$I(x,y) = I_0 \left[ 1 + \gamma \cos\left(\frac{2\pi x}{p}\right) \right] \quad (4.2)$$

où:  $I_0$  - est l'intensité moyenne,  
 $\gamma$  - est le contraste (Fig. 4.4.).



**Fig. 4.4.** Le profil de l'intensité d'un système régulier de franges projetées dans un cas idéal [RUN 08c]

Le principe de cette méthode consiste dans la superposition des deux images du réseau sur la même plaque photographique en double exposition. La première image

contient l'observation de la projection d'un réseau sur un plan de référence et la deuxième image correspond au réseau projeté sur l'objet.

Dans la Fig. 4.5. on présente la visualisation du principe de cette méthode, [RUN 08d], [PER 09].

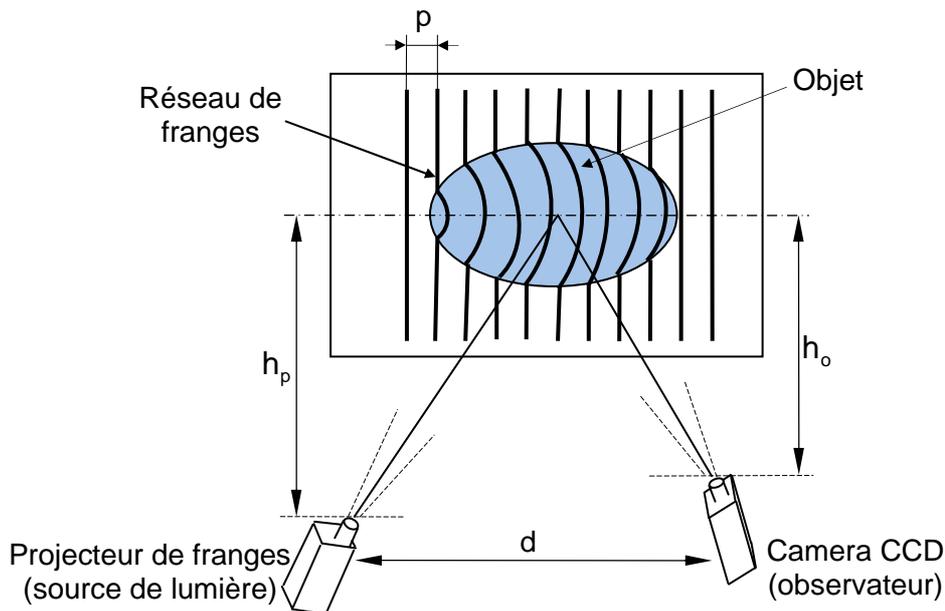


Fig. 4.5. La méthode Moiré de projection [RUN 08d].

où :  $d$  – représente la distance entre l'observateur et le projecteur;

$h_p$  – est la distance projecteur – réseau;

$h_o$  – est la distance caméra – réseau;

$p$  – le pas du réseau de franges.

Si dans la méthode Moiré d'ombre, l'introduction du déphasage est assez difficile à réaliser, pour la méthode Moiré de projection il suffit de déplacer le réseau physique dans son plan.

Si l'hypothèse des faisceaux parallèles est conservée, le relief est alors proportionnel à la différence de phase entre le réseau de référence et le réseau objet.

La précision des mesures est améliorée lorsqu'on utilise la procédure du décalage de phase. Elle permet l'analyse du réseau de franges, en transformant celui-ci dans un champ de phases  $\varphi$ . La précision obtenue avec cette technique est d'environ  $10 \mu\text{m}$ .

Le principe Moiré de projection en lumière cohérente avec un décalage de phase temporel permet la mesure en temps réel des champs avec de très grandes amplitudes de vibrations. Ces champs d'amplitudes peuvent être mesurés soit directement sur la surface d'une partie du corps humain, soit sur la surface de la structure mécanique en interaction avec l'être humain.

#### 4.1.4. La mesure du relief d'un objet par projection de franges avec décalage de phase

La méthode de décalage de phase permet l'analyse d'un réseau de franges. Le nombre d'images nécessaires pour la détermination de la phase est de minimum trois.

Le schéma géométrique de la méthode Moiré de projection est considéré dans le plan  $O, \bar{x}, \bar{z}$ . L'objet est considéré dans un repère  $O, \bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ . La surface de cet objet est définie par un nuage de points de coordonnées  $M(x, y, z)$ .

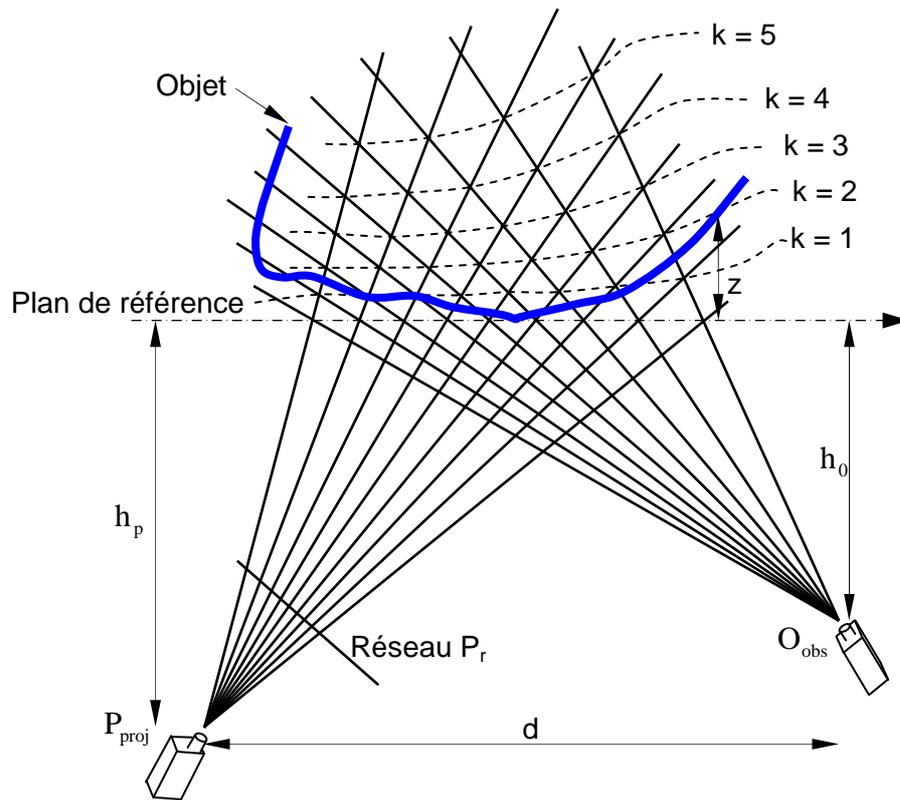


Fig. 4.6. Le schéma du principe Moiré de projection

Avec un projecteur on projète un réseau de lignes parallèles d'un pas «p» (Fig. 4.6.) et d'orientation  $Oy$  sur l'objet. Le réseau projeté est observé avec une caméra CCD située à une distance  $h$  du plan de référence, (Fig. 4.7), [BOR 01].

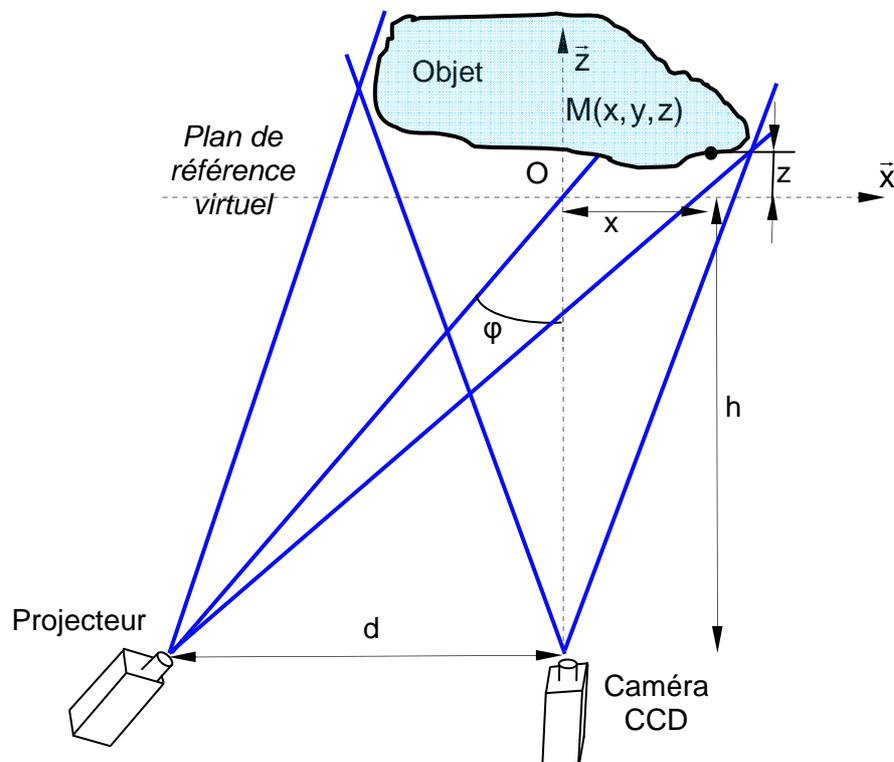


Fig. 4.7. Modélisation géométrique du montage pour Moiré de projection

Une image acquise par la caméra CCD peut être décrite par l'expression:

$$I(x, y) = I_o(x, y)[1 + C(x, y)\cos(\varphi(x, y) + \alpha)] \quad (4.3)$$

où :

$I(x, y)$  – est l'intensité lumineuse dans le plan de l'image de l'objet éclairé par les franges;

$I_o(x, y)$  – est l'intensité lumineuse dans le plan de l'image de l'objet;

$C(x, y)$  – est le contraste locale de l'image;

$\varphi(x, y)$  – est la phase spatiale d'un point de l'objet;

$\alpha$  – est une phase spatiale supplémentaire.

Pour mesurer la phase  $\varphi(x, y)$ , on éclaire successivement l'objet par quatre réseaux de franges déphasées avec  $\alpha = i\frac{\pi}{2}$ ,  $i = 0, 1, 2, 3$ . On obtient les images [BOR 01], [RUN 08e]:

$$I_1(x, y) = I_o(x, y)[1 + C(x, y)\cos\varphi(x, y)] \quad (4.4)$$

$$I_2(x, y) = I_o(x, y)[1 - C(x, y)\sin\varphi(x, y)] \quad (4.5)$$

$$I_3(x, y) = I_o(x, y)[1 - C(x, y)\cos\varphi(x, y)] \quad (4.6)$$

$$I_4(x, y) = I_o(x, y)[1 + C(x, y)\sin\varphi(x, y)] \quad (4.7)$$

La phase spatiale est obtenue à partir de l'expression:

$$\varphi = \arctg \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad (4.8)$$

En calculant la différence de phase  $\Delta\varphi$  entre la phase de l'objet et la phase qui correspond au plan de référence, on peut obtenir le relief de l'objet.

Si par „p” est noté le pas du réseau de référence, on peut écrire, en utilisant la figure 4.5.:

$$p = P_r \frac{h_p^2 + d \cdot x + d^2}{f \cdot h_o} \quad (4.9)$$

où:

$h_p$  – est la distance projecteur – objet;

$h_o$  – est la distance caméra – objet;

$d$  – la distance projecteur – caméra;

$P_r$  – est le pas du réseau de diapositives;

$f$  – est la distance focale du projecteur;

$x$  – est la coordonnée dans le plan de la figure (vertical).

La relation qui lie le relief  $z$  à la différence de phase spatiale  $\Delta\varphi$  entre deux images est donnée par la formule suivante [BRE 99], [RUN 08b]:

$$z = \frac{p h_o h_p}{h_2 \left( d + x - p \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) - x h_p} \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \quad (4.10)$$

Le calcul la différence de phase  $\Delta\varphi$  s'effectue par la méthode du décalage de phase. Dans la première étape sont enregistrées trois images du réseau de référence projetées sur le plan. Les décalages de phase sont introduits par le déplacement des diapositives dans le plan du projecteur. Ce déplacement doit être situé dans le plan du réseau pour ne pas introduire des erreurs. Son amplitude doit être approximativement trois fois le pas  $P_r$ . Ensuite, les trois images de l'objet ou du plan déformé sont enregistrées dans les mêmes conditions [RUN 08d].

Dans le cas des faisceaux parallèles, c'est-à-dire quand la distance  $h_o = h_p$  peut être considérée égale à  $z$  et la distance  $d$  grande en comparaison avec  $x$ , la relation (4.10) devient:

$$z = \frac{P h \Delta\varphi}{d 2\pi} \quad (4.11)$$

avec  $h = h_o = h_p$  et  $P = \frac{P_r}{\cos\alpha}$  parce que  $f = \infty$

où:

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{obj}} - \varphi_{\text{ref}} ; \quad \varphi_{\text{obj}} = \frac{2\pi(x + z \text{tg } \varphi)}{p} ; \quad \varphi_{\text{ref}} = \frac{2\pi x}{p} ; \quad \text{tg } \varphi = \frac{d}{h}$$

et  $x, z$  – sont les coordonnées dans le plan de la figure (vertical);

$\varphi$  – est l'angle de projection;

$p$  – est le pas du réseau projeté.

Pour  $x = 0$ ,

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{obj}} - \varphi_{\text{ref}} = \frac{2\pi z \text{tg } \varphi}{p} \quad (4.12)$$

## 4.2. L'interférométrie speckle

Le phénomène du speckle en lumière laser est un effet d'interférence optique. Cet effet est d'un aspect granulaire, présentant des «taches» claires et sombres, causées, respectivement, par les interférences constructives et destructives de la lumière laser diffusée.

### 4.2.1. Le principe général de la méthode

Une surface optiquement rugueuse, éclairée par un laser, génère ce qu'on appelle l'effet speckle. Dans le cas où la surface de l'objet est rugueuse, la lumière est réfléchiée dans un large éventail d'angles, comme le montre la figure 4.8.a et une partie arrive dans le plan de l'image. Si la lumière est diffusée à partir de deux points A et B de l'objet, comme on indique dans la figure 4.8, les faisceaux réfléchis interfèrent quand ils arrivent au même point du plan de l'image. Si les deux faisceaux sont en phase, l'interférence est constructive et on obtient un point lumineux et s'ils sont en opposition de phase, le point est sombre. Ayant en vue la variabilité de la surface de l'objet, l'image finale, due à la superposition de tous les faisceaux en provenance de la surface, donne comme résultat une image de speckle pointue, montrée dans la figure. 4.8.b. La dimension typique des grains de speckle varie plus ou moins entre 5 et 50  $\mu\text{m}$ .

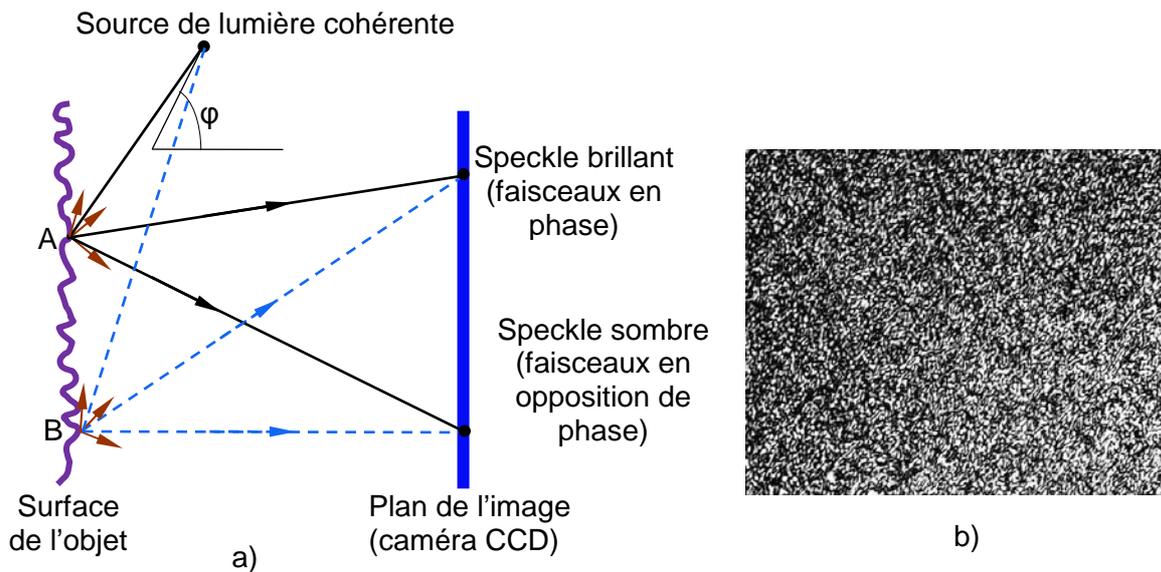


Fig. 4.8. a) Le principe de la formation du speckle; b) l'image speckle [RUN 08e]

#### 4.2.2. La mesures des déplacements hors plan

La technique d'interférométrie speckle, notée ci-après ESPI (Electronic Speckle Pattern Interferometry - interférométrie électronique de speckles), permet la mesure du déplacement d'une surface par rapport à une autre considéré comme référence pour une direction donnée. En combinant des mesures simultanées selon les trois directions principales, il est possible de reconstruire le champ tridimensionnel des déplacements de la surface étudiée.

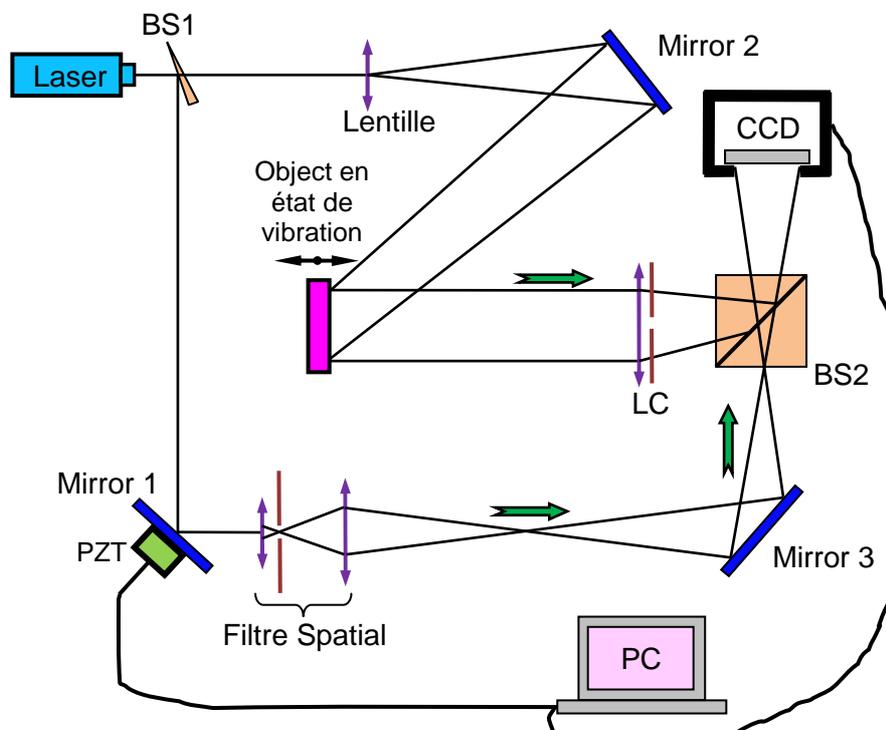


Fig. 4.9. La configuration du déplacement dans le plan

La figure 4.9. montre une configuration typique d'ESPI pour mesurer la composante du déplacement hors-plan de l'objet sur la direction z normale à la surface.

Le faisceau qui sort du laser est séparé en deux parties, grâce à un diviseur de faisceau. Le premier faisceau est utilisé pour éclairer la surface de l'objet et le deuxième faisceau est utilisé comme faisceau de référence. Les deux champs se superposent à la surface de la caméra CCD, où le champ speckle en provenance de l'objet est observé à travers un objectif et il est superposé au champ de référence.

On enregistre l'interférogramme de l'objet au repos. L'intensité d'une image acquise est donnée par l'expression [RUN 08b]:

$$I = I_o \left[ 1 + m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}}) \right] \quad (4.13)$$

dans laquelle:

$I$  – est l'intensité de l'image acquise;

$I_o$  – est l'intensité de fond dans le plan de l'image acquise;

$m$  – est la modulation de la frange;

$\varphi_{\text{speck}}$  – est la phase aléatoire du speckle pour l'objet non déformé (Fig. 4.8.a.).

Cette image de l'objet,  $I_o$ , est "couverte" par des speckles de grand contraste produits par les variations aléatoires de la différence de phase locale entre l'onde-objet et l'onde de référence.

Si la géométrie de l'objet présente des variations temporelles qui produisent une variation supplémentaire de la phase pendant la durée de l'acquisition d'images (en général 0,040 s), alors on a:

$$I = I_o \left( 1 + m \cdot \cos \left( \varphi_{\text{speck}} + \frac{1}{T} \int_0^T \Delta\varphi_o(t) dt \right) \right) \quad (4.14)$$

$\Delta\varphi_o$  - étant la différence de phase due au déplacement hors plan.

Si on obtient deux images successives de ce type, qui correspondent à deux états différents d'un objet [BOR 01], [RUN 08b]:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_o \left[ 1 + m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}} + \varphi_o) \right] \\ \text{et} \\ I_2 &= I_o \left[ 1 + m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}} + \varphi_o + \Delta\varphi_o) \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

où:

$\varphi_{\text{speck}}$  – est la phase aléatoire du speckle pour l'objet indéformé;

$\varphi_o$  – est la phase aléatoire du speckle pour l'objet déformé;

$\Delta\varphi_o$  – est la différence de phase due au déplacement hors plan.

La différence entre ces images aura l'expression:

$$I_1 - I_2 = 2I_o m \sin \frac{\Delta\varphi_o}{2} \sin \left( \varphi_{\text{speck}} + \varphi_o + \frac{\Delta\varphi_o}{2} \right) \quad (4.16)$$

L'image de l'objet sera couverte par des franges d'interférence données par le facteur  $\sin \frac{\Delta\varphi_o}{2}$ .

Cette frange a une visibilité très faible à cause de la présence simultanée dans les expressions (4.15) du deuxième facteur, qui est lié aux différences de phase entre l'onde-objet et l'onde de référence qui produit des variations rapides et aléatoires de l'intensité.

Si la variation de phase de l'objet correspond à un état de vibration harmonique permanente de fréquence supérieure à 25 Hz, alors l'image obtenue sera donnée par la fonction Bessel  $J_0$  [RUN 08b], [RUN 08c].

$$I = I_o [1 + m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o)] \quad (4.17)$$

#### 4.2.3. L'interférométrie speckle pour l'analyse des vibrations d'une surface

Par l'utilisation des algorithmes différents déphasés (décalage de phase), on peut obtenir un nombre d'images speckle (d'habitude, 3, 4 ou 5), qui génèrent en temps réel l'image caractérisée par la même distribution des intensités d'images reconstruites par l'interférogramme holographique. Le décalage de phase peut être mis en application en utilisant un actionneur piézo-électrique interposé sur le chemin de l'onde de référence ou de l'onde-objet. Un tel dispositif introduit une différence de phase supplémentaire entre l'onde-objet et l'onde de référence, notée  $\Delta\varphi_{\text{speck}}$ .

La technique ESPI peut être utilisée pour analyser les vibrations stationnaires d'une surface.

Dans le cas d'un objet en état de vibration harmonique stationnaire, l'expression (4.17) devient:

$$I = I_o [1 + m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}} + \Delta\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o)] \quad (4.18)$$

En développant l'expression (4.18), on obtient:

$$\begin{aligned} I = I_o + I_o \cdot m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}}) \cdot \cos(\Delta\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \\ - I_o \cdot m \cdot \sin(\varphi_{\text{speck}}) \cdot \sin(\Delta\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \end{aligned} \quad (4.19)$$

On note:

$$\begin{aligned} a_o &= I_o \\ a_1 &= I_o \cdot m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}}) \cdot \cos(\Delta\varphi_{\text{speck}}) \\ a_2 &= I_o \cdot m \cdot \sin(\varphi_{\text{speck}}) \cdot \sin(\Delta\varphi_{\text{speck}}) \end{aligned} \quad (4.20)$$

L'expression (4.17) avec des notations (4.20) se transforme en:

$$I = a_o + a_1 \cdot J_0(\Delta\varphi_o) - a_2 \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \quad (4.21)$$

En faisant l'acquisition de quatre images successives, avec les déphasages:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{\text{speck}} = 0 &\Rightarrow \begin{cases} \sin(\Delta\varphi_{\text{speck}}) = 0 \\ \cos(\Delta\varphi_{\text{speck}}) = 1 \end{cases} & I_1 = a_o + a_1 \\ \Delta\varphi_{\text{speck}} = \frac{\pi}{2} &\Rightarrow \begin{cases} \sin(\Delta\varphi_{\text{speck}}) = 1 \\ \cos(\Delta\varphi_{\text{speck}}) = 0 \end{cases} & I_2 = a_o - a_2 \end{aligned} \quad (4.22a)$$

$$\Delta\varphi_{\text{speck}} = \pi \Rightarrow \begin{cases} \sin(\Delta\varphi_{\text{speck}}) = 0 \\ \cos(\Delta\varphi_{\text{speck}}) = -1 \end{cases} \quad I_3 = a_o - a_1 \quad (4.22b)$$

$$\Delta\varphi_{\text{speck}} = \frac{3\pi}{2} \Rightarrow \begin{cases} \sin(\Delta\varphi_{\text{speck}}) = -1 \\ \cos(\Delta\varphi_{\text{speck}}) = 0 \end{cases} \quad I_4 = a_o + a_2$$

on obtient les expressions:

$$\begin{aligned} I_1 &= I_o + I_o \cdot m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \\ I_2 &= I_o - I_o \cdot m \cdot \sin(\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \\ I_3 &= I_o - I_o \cdot m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \\ I_4 &= I_o + I_o \cdot m \cdot \sin(\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \end{aligned} \quad (4.23)$$

Le processeur calcule et affiche sur l'écran du moniteur une cinquième image, dont l'expression est:

$$I = \sqrt{(I_1 - I_3)^2 + (I_4 - I_2)^2} \quad (4.24)$$

où:

$$I_1 - I_3 = 2a_1 = 2 \cdot I_o \cdot m \cdot \cos(\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \quad (4.25)$$

$$I_4 - I_2 = 2a_2 = 2 \cdot I_o \cdot m \cdot \sin(\varphi_{\text{speck}}) \cdot J_0(\Delta\varphi_o) \quad (4.26)$$

En effectuant les calculs, on obtient:

$$I = 2mI_o |J_0(\Delta\varphi_o)| \quad (4.27)$$

#### 4.2.4. Les avantages et les inconvénients

Le principal avantage de cette méthode d'interférométrie de speckle est qu'on peut accéder aux trois composantes du déplacement d'une surface, ce que peu de méthodes proposent. De plus, la préparation de la surface est souvent simple, voire inexistante (toute surface non optique et non polie permet la diffusion de la lumière et l'obtention d'une figure de speckle; toutefois, une émulsion de poudre éparpillée est parfois appliquée sur la surface pour garantir l'observabilité du phénomène et, surtout, son homogénéité spatiale).

Les résolutions spatiales et le déplacement dépendent essentiellement de la grandeur du grain de speckle (si la longueur d'onde de la lumière et la grandeur caractéristique des discontinuités de la surface étudiée ont la même taille) ainsi que l'ouverture optique du système d'acquisition.

L'inconvénient principal de cette technique est son caractère interférométrique qui restitue très sensiblement les vibrations extérieures (un montage sur la table optique est souvent souhaitable).

### 4.3. Conclusions

Par la **méthode du Moiré de projection** on peut mesurer le relief d'un objet, avec des résultats sous la forme d'un nuage de points. Elle peut être appliquée aux objets de quelques centimètres carrés jusqu'aux plusieurs mètres carrés.

Le temps d'acquisition et de calcul pour mesurer le relief sur tout un champ est de quelques minutes, comparé aux machines de mesure tridimensionnelle qui peuvent aller jusqu'aux plusieurs heures d'acquisition.

La reconstruction peut être faite sur toute la surface du corps humain ou sur des parties: la main, le bras, la colonne, la tête, les pieds etc.

Avec l'**Interférométrie speckle** on peut obtenir un champ de déformations, qui peut être interpolé et qui peut redonner la surface de l'objet ou de l'opérateur humain.

Pour appliquer cette technique, l'objet doit être d'une couleur claire et préférablement uniforme.

Avec cette technique on peut mesurer des déplacements et des amplitudes des vibrations, avec un enregistrement de minimum 16 cadres par seconde. On peut mesurer avec une précision de 1%, des déplacements, des déformations et des vibrations comme c'est le cas des vibrations des parties de l'organisme humain.

Contrairement à l'interférométrie holographique classique, l'interférométrie speckle permet l'utilisation des caméras CCD pour le calcul et la visualisation du champ de déplacements d'un objet déformé.

## CHAPITRE 5

### LA METHODOLOGIE D'EXPERIMENTATION

#### 5.1. Généralités

Il y a beaucoup de méthodes par lesquelles on peut mesurer une caractéristique d'un mouvement oscillatoire. Si le mouvement est de grande amplitude et de basse fréquence, on peut déterminer l'amplitude du déplacement de crête en crête (peak-to-peak). Mais si la fréquence est plus grande, il est difficile de mesurer le déplacement. La caractéristique de l'oscillation peut être définie aussi par la vitesse. Le plus convenable à l'heure actuelle est l'appareillage pour la mesure de l'accélération.

La caractéristique cinématique principale dans la mesure des vibrations est représentée par l'accélération. L'accélération de translation s'exprime en mètres par seconde au carré ( $m/s^2$ ) et l'accélération de rotation s'exprime en radian par seconde au carré ( $rad/s^2$ ). Les valeurs peuvent être données comme des valeurs moyennes quadratiques (R.M.S.) s'il n'est pas précisé autrement [TRU 09].

#### 5.2. Le logiciel „Projet” pour la mesure des vibrations par la méthode Moiré de projection

Le logiciel „Projet” a été créé par J.C. Dupré, V. Valle et F. Brémand de l'Université de Poitiers, Laboratoire de Mécanique des Solides. Il travaille avec les relations de calcul présentées dans le Chapitre 4 et il permet le calcul du relief et aussi la déformation d'une pièce par la méthode Moiré de projection, associée à une technique de décalage de phase de trois images. Pour obtenir le relief, la méthode nécessite deux séries d'images: la première avec un plan de référence et l'autre, avec l'objet étudié (donc six images). Le logiciel a été développé sous Windows 3.11 et il est compatible Win95.

Le logiciel se compose de plusieurs parties:

➤ L'acquisition des images;

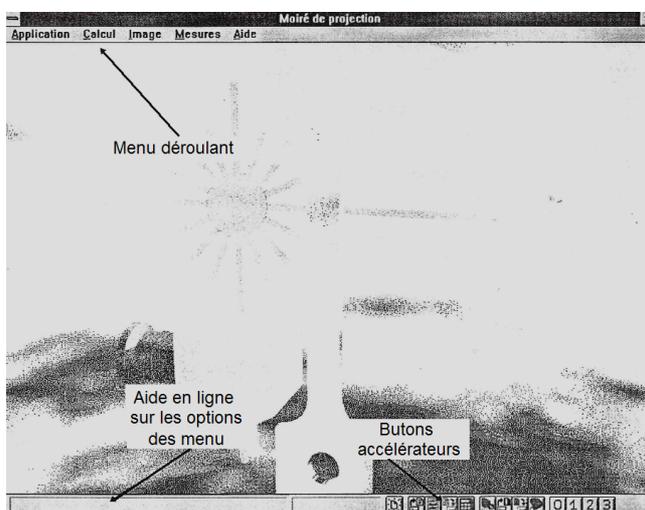


Fig. 5.1. La fenêtre principale

➤ L'analyse des images;  
 ➤ La lecture sur disque des images, des palettes de couleurs, l'enregistrement d'images et extraction des profils en niveaux de gris.

Les deux premières parties sont liées au calcul. La troisième partie est plus générale et peut servir à tout moment.

Dans la Figure 5.1. est donnée l'interface graphique de la fenêtre principale du logiciel „Project”.

La plupart des fonctions du menu déroulant se retrouve aux

boutons accélérateurs.

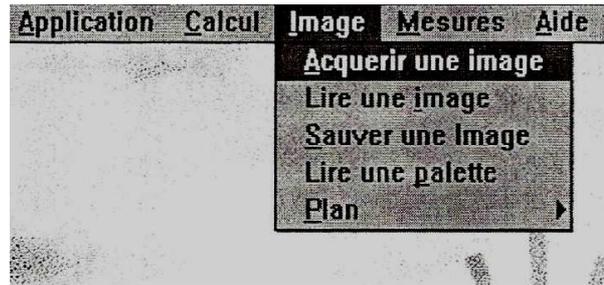


Fig. 5.2. L'option du menu Image

Le menu montré dans la Figure 5.2. permet le lancement de la fenêtre d'acquisition d'images par laquelle on écrit l'image sur le disque en format BMP, mais on peut calculer et visualiser aussi le relief et la déformation, appliquer une palette de couleurs et choisir le plan de visualisation (la carte PIP 1024 contient 4 plans de 512 par 512 pixels, voir la partie droite inférieure de la Figure 5.3).

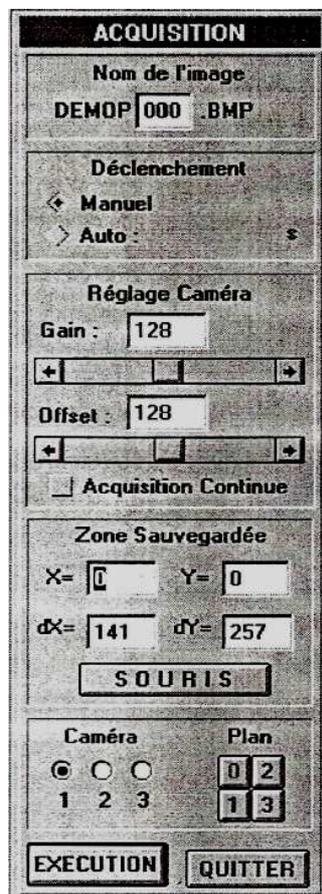


Fig. 5.3. La fenêtre d'acquisition des images



Fig. 5.4. La fenêtre profil

Dans la Figure 5.3. est donnée l'interface graphique qui contient tous les paramètres pour l'acquisition des images. Elle contient:

- Le nom de l'image;
- La sélection du mode de déclenchement de l'acquisition de l'image: manuel (en cliquant sur EXECUTION à chaque fois) ou automatique, par la définition d'un intervalle de temps entre deux acquisitions d'images (en cliquant sur EXECUTION, on lance, pour l'arrêter il faut cliquer sur QUITTER);

- Le réglage de la caméra vidéo. Si l'on coche *Acquisition Continue*, la caméra acquiert en mode continu des images statiques;
- *Zone Sauvegardée*: permet la sélection de la position et de la taille de la zone d'image à sauvegarder. Cette zone est définie, soit en tapant sa position (au coin supérieur gauche) et sa dimension au clavier, soit avec la souris;
- Bouton: EXECUTION: Lance l'acquisition.

Le menu *Mesures* dans la fenêtre principale (Fig. 5.1.) permet d'accéder à la fenêtre profil de la Figure 5.4.

La fenêtre profil dans la Figure 5.4 permet d'observer les niveaux de gris d'une ligne, d'une colonne ou d'un segment d'image affiché, soit en tapant les coordonnées, soit à l'aide de la souris.

En cliquant sur TRACE, on peut visualiser le profil des niveaux de gris recherché.

**Modifier l'Application**

**DEPHASAGES ENTRE IMAGES**

Calcul des décalages de phase       Filtre de Hanning utilisé

Définition de la fenêtre analysée par FFT      **SOURIS**

Position horizontale = 17 pixels      Position verticale = 66 pixels

Taille horizontale = 64 pixels      Taille verticale = 64 pixels

---

**DEFINITION DE LA ZONE TRAITEE**      **SOURIS**

Position horizontale = 0 pixels      Position verticale = 0 pixels

Taille horizontale = 147 pixels      Taille verticale = 260 pixels

---

**CARACTERISTIQUES DU MASQUE**

Seuil du masque = 15 Niv. Gris      Seuil discontinuité = 1

---

**POINT DE REFERENCE, PHASE INITIALE = 0 degrés**

Position horizontale = 65 pixels      Position verticale = 129 pixels      **SOURIS**

---

**CARACTERISTIQUES DU MONTAGE OPTIQUE**

Distance:

projecteur-épreuve = 1000 mm      Pas du réseau = 0.1 mm

caméra-projecteur = 100 mm      Focale = 100 mm

caméra-épreuve = 1000 mm      Grandissement (mm/pixel) = 1

Hauteur / largeur des pixels = 0.73      **Cancel**      **OK**

Fig. 5.5. La fenêtre de modification des paramètres de calcul de l'application

Dans la Figure 5.5. on montre l'interface graphique du traitement des données acquises, cette interface contient toutes les données nécessaires au calcul présenté dans le Chapitre 4.

**Définition de la zone traitée:** c'est la zone intérieure où seront effectués les calculs du relief. Elle peut être définie (de max. 512x512 pixels) en tapant le contenu dans la mini fenêtre correspondante.

**Caractéristiques du masque:** ces données permettent au logiciel de chercher la forme de la pièce.

**Point de référence:** c'est le point de départ des calculs en vue de l'estimation de la phase. Il est possible de taper une valeur initiale de la phase (en général, elle est 0).

Il existe aussi un point de référence dans le cas où le relief n'est pas modifié entre deux états de déformation (pour le calcul de la déformation). Ce point doit être dans la zone de calcul.

**Caractéristiques du montage optique:** ces grandeurs sont nécessaires pour le calcul du relief et de la déformation de la pièce.

Les distances entre projecteur-pièce, caméra-projecteur et caméra-pièce sont introduites sous forme numérique.

**Hauteur/largeur des pixels:** le rapport entre la hauteur et la largeur des pixels, fourni par le constructeur de la caméra utilisée.

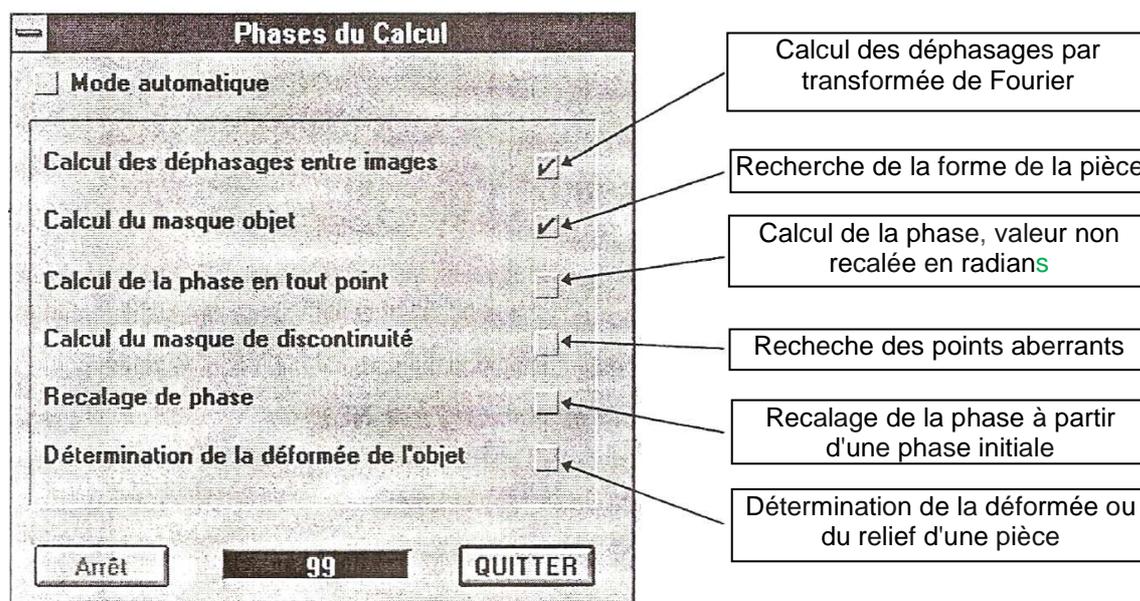


Fig. 5.6. les phases de calcul

Dans la Figure 5.6. est donnée l'interface graphique avec les phases de calcul dans l'ordre de leur effectuation. En sélectionnant le mode automatique, toutes les étapes de calcul sont réalisées séquentiellement.

Le premier pas est le calcul des déphasages par la transformée de Fourier, le deuxième pas est la recherche de la forme de la pièce, le troisième pas est le calcul de la phase dans toutes des points, le quatrième pas est le calcul des points discontinus. Le cinquième pas change la phase, en partant de la phase initiale et dans le dernier pas on détermine la déformation ou le relief de la pièce.

### 5.3. L'analyseur de vibrations SVAN 958 et le logiciel pour la mesure des vibrations

L'appareil SVAN 958 (Fig. 5.7.) est un analyseur des vibrations numérique à quatre canaux, qui mesure et analyse les sons et les vibrations dans le domaine de 0,5 – 20 Hz. Il est spécialement conçu pour la mesure des signaux vibratoires dans l'organisme humain en concordance avec SR ISO 2631/1, 2, 5 et SR ISO 5349/1, 2. L'appareil utilise des capteurs mono-axiaux ou triaxiaux et chacun des quatre canaux peut traiter simultanément les données, ayant des réglages indépendants pour chaque canal (par ex. le type des capteurs, les filtres et les constants de temps du capteur r. m. s.), [CRI 09]. L'appareil est spécialisé pour la mesure des vibrations qui agissent sur l'organisme humaine, avec la différenciation entre les deux systèmes normalisés: le system humain main-bras et le system du corps humain entier.

L'appareil peut effectuer des mesures en temps réel [SVA 07]:

- sur 4 canaux en bande de fréquence de 1/1 octave, 15 filtres avec le centre de fréquence entre 1Hz et 16Hz (Type 1, IEC 61260) et en bandes de fréquence de 1/3 octave, 45 filtres avec le centre de fréquence entre 0,8Hz et 20Hz (Type 1, IEC 61260), qui comprennent l'analyse statique des canaux;
- sur 4 canaux FFT, qui comprennent l'analyse spectrale croisée jusqu'à 1600 lignes;
- l'intensité acoustique, en fonction du mode de sélection choisi.



**Fig. 5.7.** L'appareil SVAN 958 pour la mesure des vibrations et des bruits:  
a) L'appareil; b) Le menu principal de l'appareil

Dans la Figure 5.7. b sont présentés les boutons de commande du panneau frontal.

Sur le panneau frontal sont affectés les boutons de commande suivants (Fig. 5.7. b):

1. <ENTER>? (<MENU>), [<SAVE>]
2. <ESC>, (<CAL>), [<PAUSE>]
3. <SHIFT> [Markers]
4. <ALT>, [Markers]
5. <▲>
6. <◀>
7. <▶>
8. <▼>
9. <START / STOP>

Pour actionner la commande écrite entre les crochets est nécessaire la pression simultanée ou séquentielle de la commande et de la touche SHIFT ou ALT.

La précision de l'appareil est conforme à SR ISO 8041/2005.

Cet appareil (Fig. 5.7. a) est un analyseur de tip modulaire et il a les caractéristiques techniques de base suivantes [SVA 07]:

- Entrées: de type IEPE (Integrated Electronics Piezo Electric)–4 canaux, le connecteur LEMO 4 pins, le connecteur TNC;
- Le domaine dynamique: 100dB, 4x20bits, le convertisseur A/D;
- Le domaine de fréquence: 0,5Hz – 20kHz, le taux d'échantillonnage de 48kHz;
- Ecran: LCD 128x64 pixels, avec la fonction d'éclairage;
- Enregistrement: l'enregistrement des amplitudes globales dans le temps, dans la mémoire interne ou dans une mémoire externe;

- Les mémoires: interne– de type flash non-volatile de 32Mb, externe – la mémoire stick USB;
- L'interface: 2 USB, RS 232–optionnelle, IrDA–optionnel; analogique I/O en tension AC (1 pic); digital I/O – pour des mesures de phase et de vitesse–impulsions;
- L'alimentation: - 4 piles alcalines avec temps d'opération au-delà de 10 heures (6.0V/1.6Ah):
  - 4 accumulateurs avec temps d'opération au-delà de 14 heures (4.8V/2.6Ah);
  - externe: 6Vdc–15 Vdc (1.5W);
  - interface USB 500mA HUB;
- Conditions d'environnement: - Température: de -10°C au +50°C,
  - Humidité 90%RH;
- Dimensions: 140x82x42mm;
- Masse: 510 grammes avec piles.

Le mode d'analyse et les niveaux globaux des vibrations pour les mesures sur le corps humain entier et le system main-bras contient:

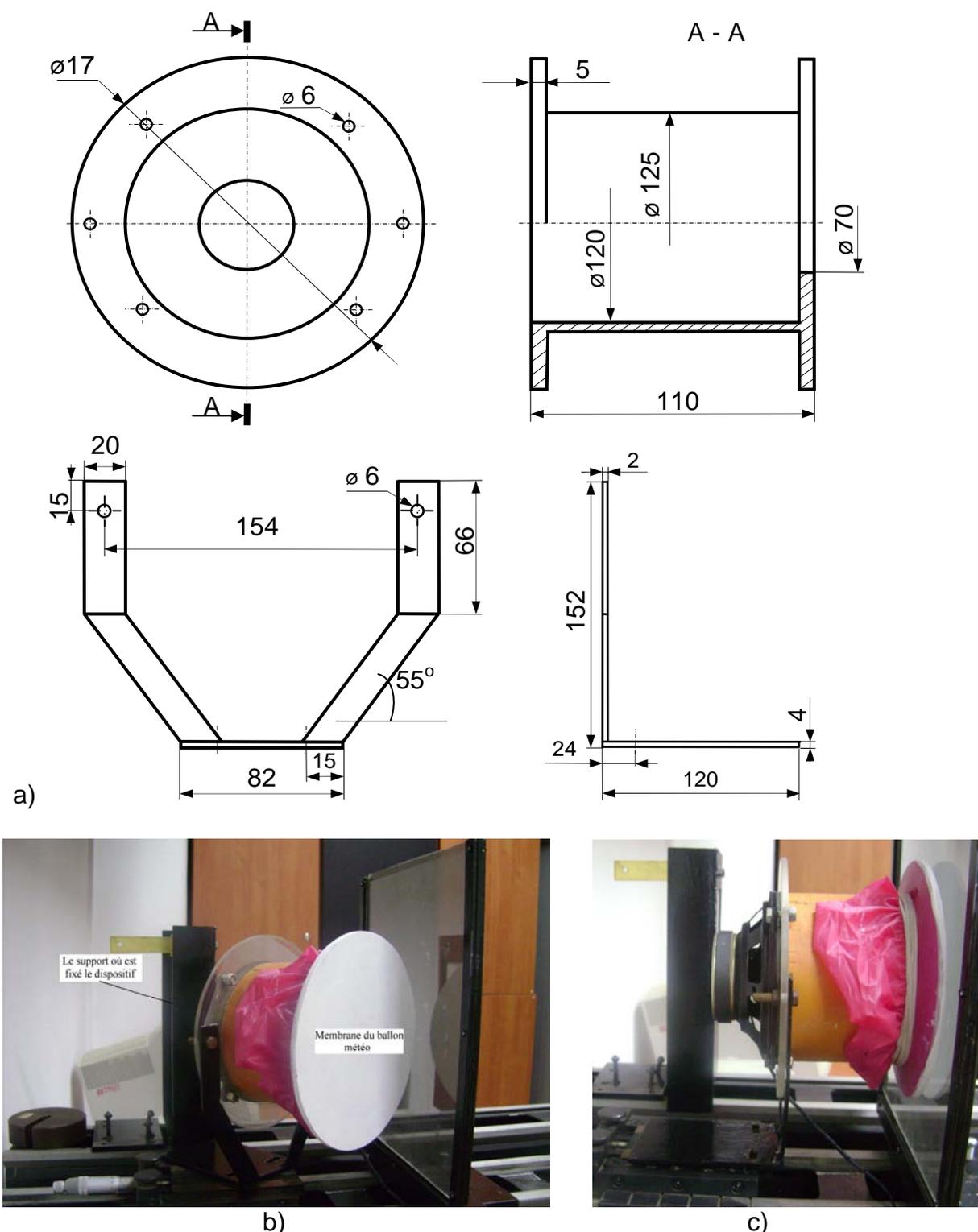
- Mesures selon le standard: ISO 8041:2005
- Valeurs: efficace-RMS, VDV, MTVV ou MAXPic, Pic-Pic; mesures simultanées des vibrations sur les 4 canaux avec sélections indépendantes des filtres et constantes de détection;
- Filtres: - selon le standard ISO 2631–Wd, Wk, Wc, Wj, Wm, Wb, Wg et
  - selon le standard ISO 5349–Wh, HP1, HP3, HP10, Vel1, Vel3, Vel 10, VelMF, Dil1, Dil3, Dil10, KB;
- Détections RMS & RMQ: détection numérique, pic, résolution de 0,1dB, constantes de temps: 100ms–10s;
- Accéléromètres: SV 39A/L (la sensibilité 100mV/g) pour les mesures sur le corps entier et SV 50 (la sensibilité 10mV/g) pour les mesures sur le system main-bras; accepte d'autres types de capteurs de vibrations type IEPE;
- Le domaine de mesure: 0,003m/s<sup>2</sup> RMS–500m/s<sup>2</sup> Pic;
- Le domaine de fréquence: sélectionné entre 0,5Hz–20kHz et en fonction du type de capteur;
- Le temps d'enregistrement: programmable jusqu'à 24 heures;
- Logiciel pour PC, d'analyse et de traitement de données SvanPC+;
- Câblés pour la connexion des capteurs et pour la communication avec le PC;
- Accessoire SV 50 pour les mesures des vibrations pour le corps entier et le system main-bras, incluant l'accéléromètre triaxial avec connecteurs, câble et adaptateurs pour le system main-bras.

#### 5.4. Le dispositif et l'installation de mesure des vibrations de calibrage

Les mesures des vibrations mécaniques sur le dispositif de mesure des vibrations ont été faites avec:

- L'appareil de mesure des bruits et vibrations SVAN 958, appareil auquel on a branché un capteur triaxial K3. Il à été fixé avec une vis sur un support métallique léger, après on a collé avec une bande double adhésive sur la membrane sur laquelle on a effectué les mesures expérimentales;
- Avec la méthode Moiré de projection, par la projection des grilles de projection déphasées entre elles de 120°. Ensuite, à l'aide du logiciel Project,

on a effectué les calculs afférents pour l'établissement de l'amplitude maximale.



**Fig. 5.8.** Le dispositif d'essai pour la mesure des vibrations [RUN 09b]:  
 a) la schéma du dispositif; b) l'aspect du dispositif; c) le dispositif d'essai posé sur le support

Le dispositif d'essai pour la mesure des vibrations est présenté dans la Figure 5.8. et il est composé de deux brides rondes, collées aux extrémités d'un tube, un diffuseur de 8 $\Omega$  et 5W fixé par quatre vis sur une bride et sur l'autre bride est fixée une membrane de ballon météo, préalablement peinte en blanc, pour pouvoir visualiser aussi bien que possible les franges Moiré.

Le dispositif de la Figure 5.8. est fixé sur un support par deux vis. Le support est fixé sur une table antivibratoire (Fig. 5.9.) [RUN 09b].



Fig. 5.9. L'emplacement du dispositif, de l'amplificateur et du générateur de signaux [RUN 09b]

La caméra CCD acquiert 15 cadres par seconde.



Fig. 5.10 Caméra CCD utilise [RUN 09]



Fig. 5.11. Le rétroprojecteur



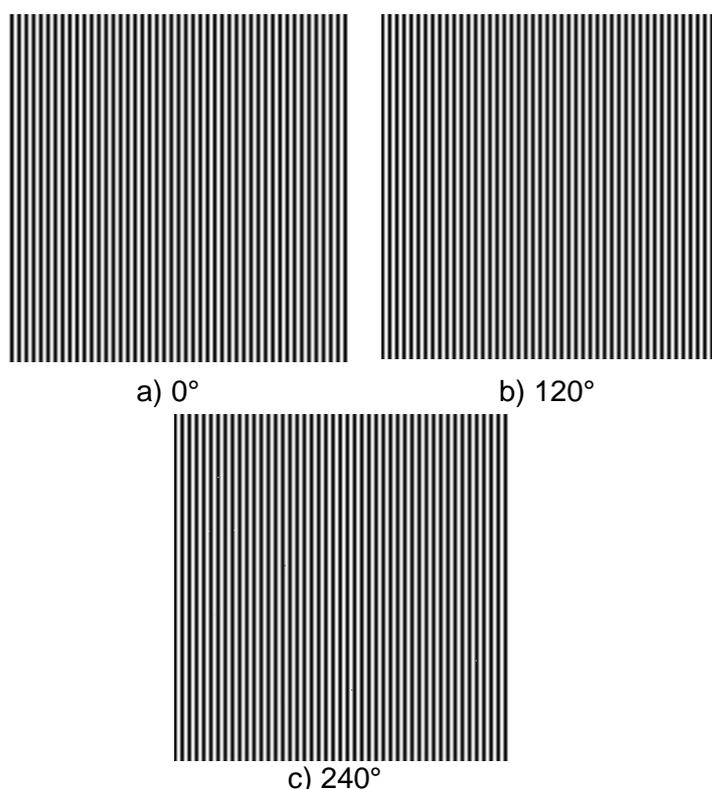
Fig. 5.12. Le système d'acquisition et traitement des données

Les composantes de l'installation de mesure sont les suivantes:

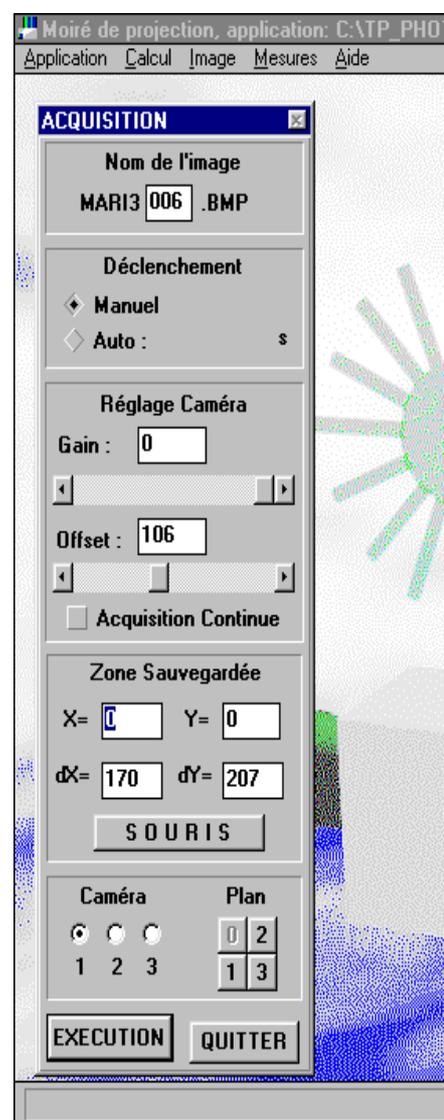
- une table antivibratoire;
- le dispositif d'essai (Fig. 5.8.);
- une grille de projection (Fig. 5.13.);
- un générateur de signaux (Fig. 5.9.);
- l'amplificateur de signaux de 15W (Fig. 5.9.);
- une caméra CCD (Fig. 5.10.);
- un rétroprojecteur (Fig. 5.11.),
- un ordinateur, d'où l'on projète les grilles sur la membrane;
- un écran sur lequel on peut observer l'objet sur lequel sont projetées les grilles;
- l'ordinateur pour l'acquisition et le traitement de données (Fig. 5.12.).

## 5.5. La mesure des vibrations par la méthode Moiré de projection

La mesure des vibrations a été effectuée sur le dispositif d'essai illustré dans la Figure 5.8., à l'aide d'un générateur de signal qui produit le signal appliqué à l'amplificateur, puis à l'haut-parleur. À l'aide d'un rétroprojecteur (Fig. 5.11.) on a éclairé la membrane au-dessus du dispositif pour pouvoir visualiser les franges Moiré. On a projeté, sur la membrane, trois grilles de projection déphasées entre elles de  $120^\circ$  (Fig. 5.13.), pour pouvoir mesurer l'amplitude des vibrations. Pour l'acquisition des données on a utilisé un système d'acquisition des données (Fig. 5.8.).



**Fig. 5.13.** Les grilles de projection décalées entre elles de  $120^\circ$



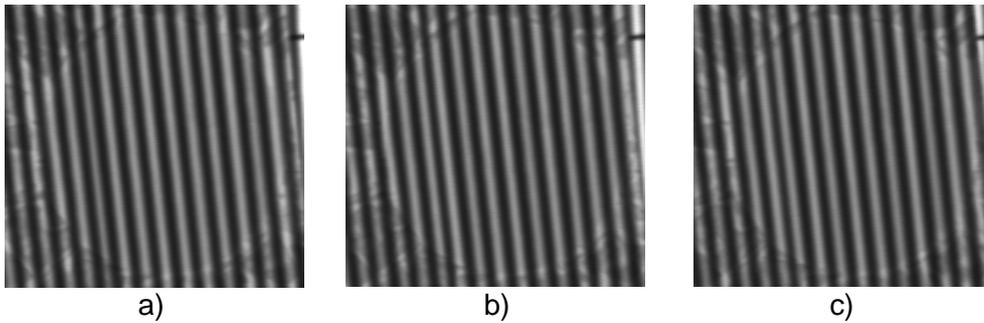
**Fig. 5.14** L'interface de l'acquisition des images

Pour le traitement des résultats on a utilisé le logiciel „Project”, qui a été présenté dans le Chapitre 5.2.

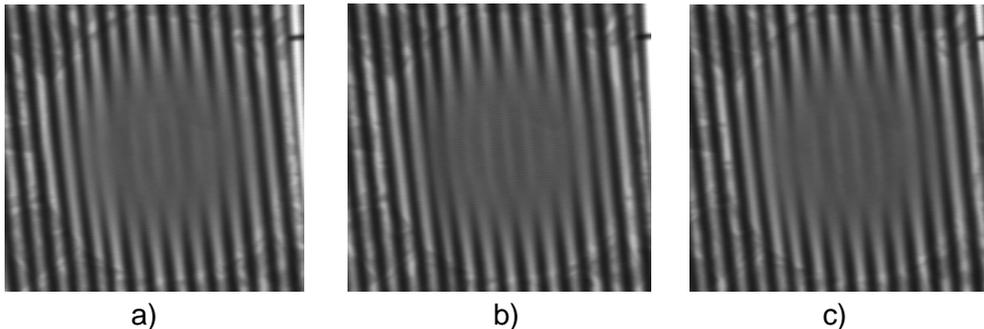
Pour le traitement des résultats il a été nécessaire d'acquérir trois images avec l'objet en état statique, qui ont été déphasées entre elles de  $120^\circ$  et trois images avec l'objet en état de vibration, déphasées aussi entre elles de  $120^\circ$ . Pour l'acquisition des images a été utilisée une caméra CCD, comme en Figure 5.10.

L'acquisition des images a été réalisée en mode manuel, la qualité de la caméra a été réglée pour le gris 0 et pour offset sur 120. La zone de sauvetage a été choisie pour dX de 170 et pour dY de 207.

Les images de référence acquises, décalées de  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, sont montrées dans la Figure 5.15. Les images acquises en état de vibration, décalées de  $120^\circ$  l'une par rapport à l'autre, sont montrées dans la Figure 5.16.

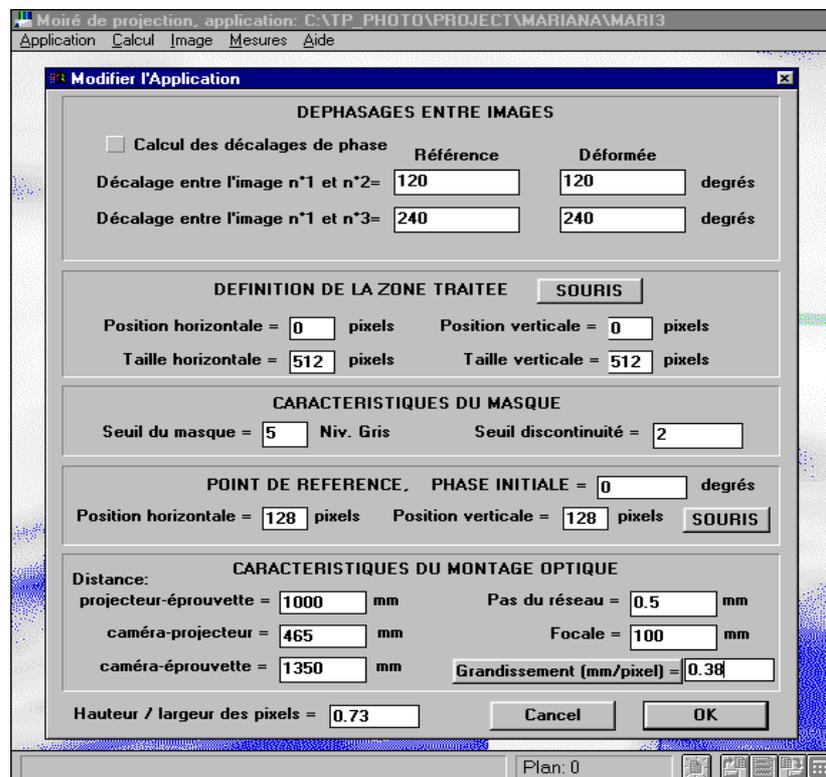


**Fig. 5.15.** Les images de référence pour calibrage, déphasées entre elles de: a) 0°, b) 120° et c) 240°



**Fig. 5.16.** Les images en état de vibration, déphasées entre elles de: a) 0°, b) 120° et c) avec 240°

Dans la Figure 5.17. est montrée l'interface graphique du traitement des données acquises.



**Fig. 5.17.** L'interface graphique du traitement des données

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale de 512 pixels et sur la verticale de 512 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le niveau de gris: le seuil du masque de 5 et le seuil discontinu de 2.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 128 pixels et sur la verticale est aussi de 128 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont:

- Les distances entre: – Projecteur–Dispositif=1000 mm;
- Caméra CCD–Projecteur=465 mm;
- Caméra CCD–Dispositif=1350 mm.

- Le pas du réseau des lignes est de 0,5 mm.

- La distance focale est de 100 mm.

Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0.38mm/pixels.

Les distances entre projecteur-dispositif, caméra–projecteur et caméra–dispositif ont été mesurées avec un mètre.

Le rapport entre la hauteur et la largeur des pixels (0,73) est fourni par le producteur de la caméra.

Dans la Figure 5.18. est montrée l'interface graphique avec toutes les phases de calcul, dans l'ordre de leur effectuation. Pour obtenir le relief on a parcouru cinq pas.

Le premier pas à été la recherche de la forme de la pièce, au deuxième pas on a calculé la phase dans tous les points, le troisième pas a été le calcul des points discontinus. Le quatrième pas change la phase, en partant de la phase initiale et dans le cinquième pas on détermine la déformation ou le relief de la pièce.

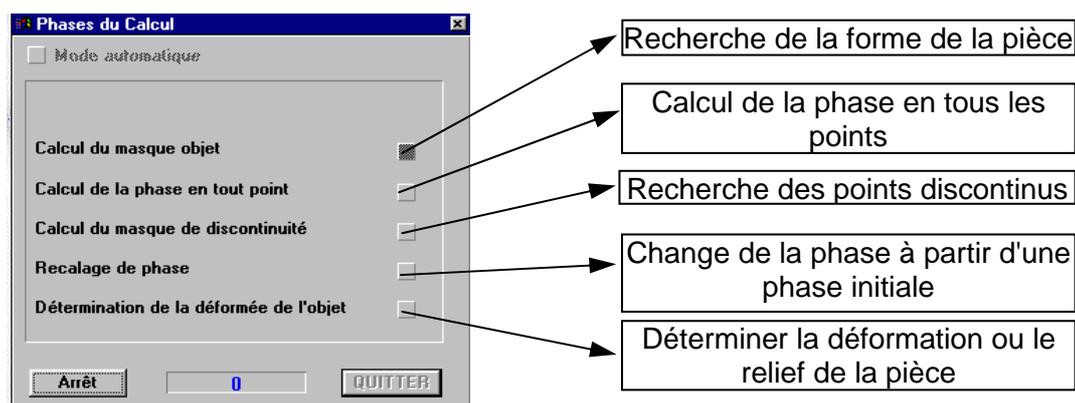


Fig. 5.18. L'interface graphique avec les phases de calcul

Dans la Figure 5.19. est montré le relief de la pièce.

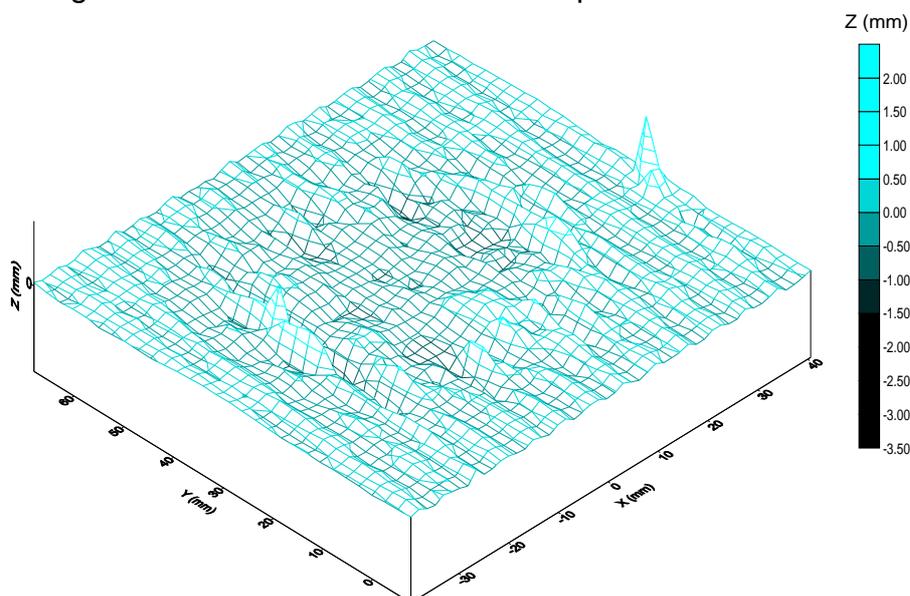
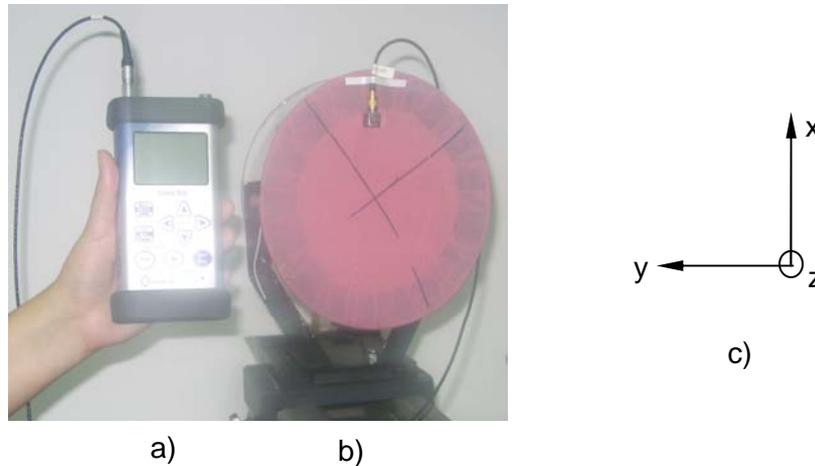


Fig. 5.19. Le relief de la pièce

### 5.6. La mesure des vibrations avec l'appareil SVAN 958 et l'interprétation des résultats

Le montage pour la mesure des vibrations utilisé dans le cadre de cette expérience est présenté dans la Figure 5.20.



**Fig. 5.20.** a) Le vibromètre SVAN 958; b) L'accéléromètre monté sur le dispositif; c) Les directions des axes

L'appareil de mesure a été choisi pour mesurer les vibrations mécaniques d'après les trois directions du système anatomique Ox, Oy et Oz (Fig. 1.19., Chapitre 1), avec le filtre correspondant pour l'organisme humain (ANNEXE A3).

Les mesures ont été effectuées avec une durée de 10 secondes chacune. Les valeurs qui ont résulté après les mesures avec l'appareil SVAN 958 sont données dans les Tableaux 5.1., 5.2. et 5.3. Les valeurs sont obtenues après avoir effectué les mesures à l'aide du dispositif de la Figure 5.8. On a donné les résultats des mesures effectuées sur chaque canal (l'axe Ox–le canal 1, l'axe Oy–le canal 2 et l'axe Oz–le canal 3).

**Tableau 5.1.**

Les valeurs obtenues pour les mesures sur le canal 1

Canal 1 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.026	0.047	0.011	0.008	0.019
2	0.029	0.051	0.012	0.009	0.02
3	0.033	0.057	0.015	0.009	0.022
4	0.023	0.036	0.013	0.011	0.014

**Tableau 5.2.**

Les valeurs obtenues pour les mesures sur le canal 2

Canal 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.077	0.148	0.031	0.03	0.064
2	0.078	0.149	0.031	0.03	0.064
3	0.076	0.151	0.037	0.03	0.065
4	0.04	0.056	0.03	0.023	0.022

Tableau 5.3.

Les valeurs obtenues pour les mesures sur le canal 3

Canal 3 (VLM)					
No.	P1 (Wd, 1 s) Peak [m/s <sup>2</sup> ]	P1 (Wd, 1 s) PP [m/s <sup>2</sup> ]	P1 (Wd, 1 s) Max [m/s <sup>2</sup> ]	P1 (Wd, 1 s) RMS [m/s <sup>2</sup> ]	P1 (Wd, 1 s) VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.218	0.431	0.136	0.135	0.268
2	0.223	0.444	0.136	0.135	0.267
3	0.226	0.447	0.136	0.131	0.256
4	0.054	0.088	0.078	0.053	0.026

Dans les Figures 5.21., 5.22. et 5.23. sont donnés les spectres d'accélération d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux de l'appareil. La fréquence à laquelle ont été effectuées les mesures, est de 100 Hz. On a effectué plusieurs mesures et on a fait leur moyenne.

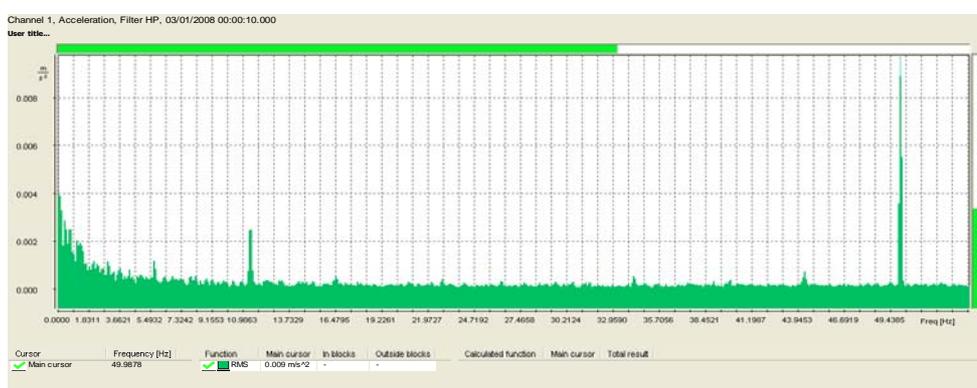


Fig. 5.21. Le spectre d'accélération d'après l'axe Ox, à la fréquence de 100 Hz

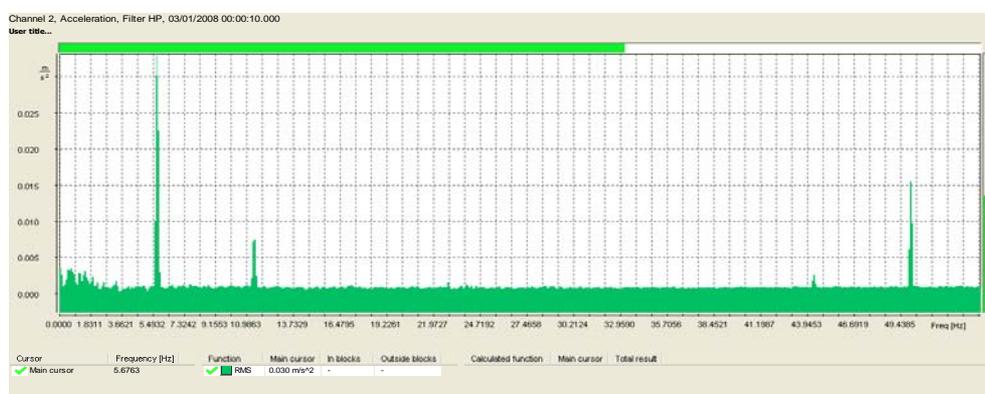


Fig. 5.22. Le spectre d'accélération d'après l'axe Oy, à la fréquence de 100 Hz

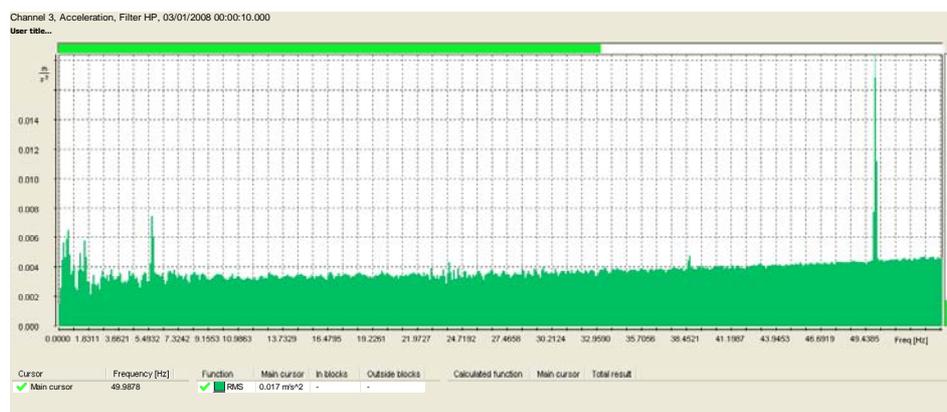


Fig. 5.23. Le spectre d'accélération d'après l'axe Oz, à la fréquence de 100 Hz

Dans les Figures 5.24., 5.25. et 5.26. sont montrés les spectres des vitesses d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux de l'appareil. La fréquence à laquelle on a effectué les mesures est de 100 Hz. On a effectué plusieurs mesures et on a fait leur moyenne.

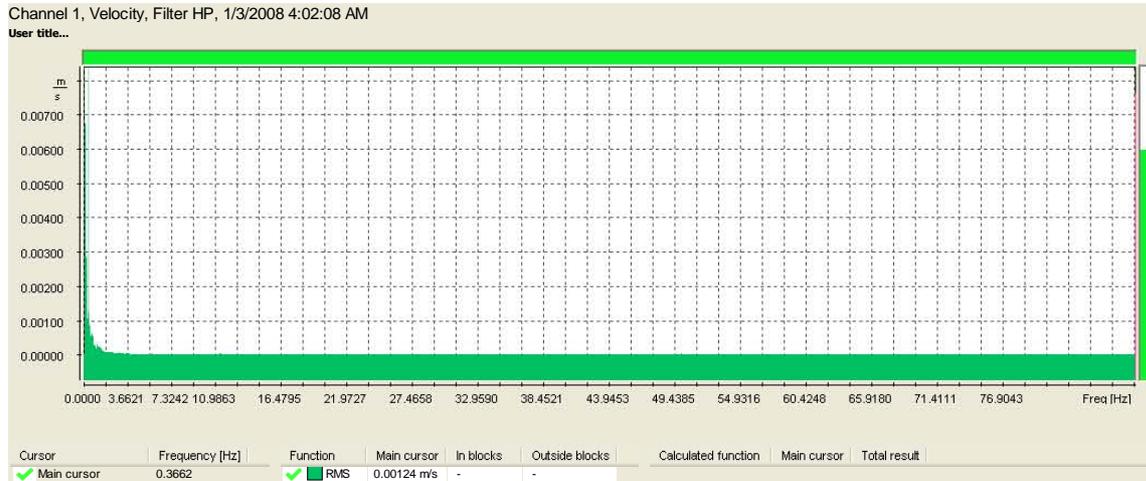


Fig. 5.24. Le spectre des vitesses d'après l'axe Ox, à la fréquence de 100 Hz

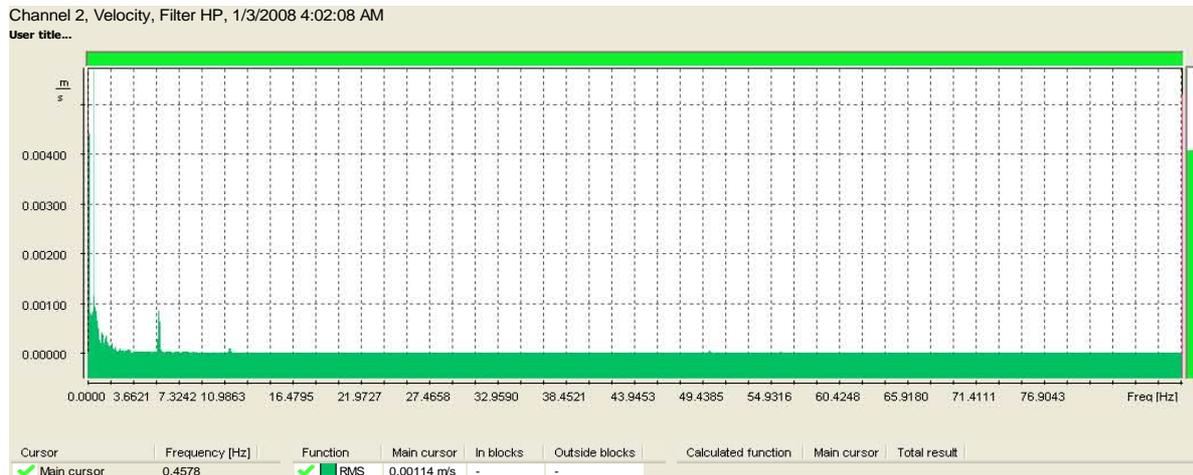


Fig. 5.25. Le spectre des vitesses d'après l'axe Oy, à la fréquence de 100 Hz

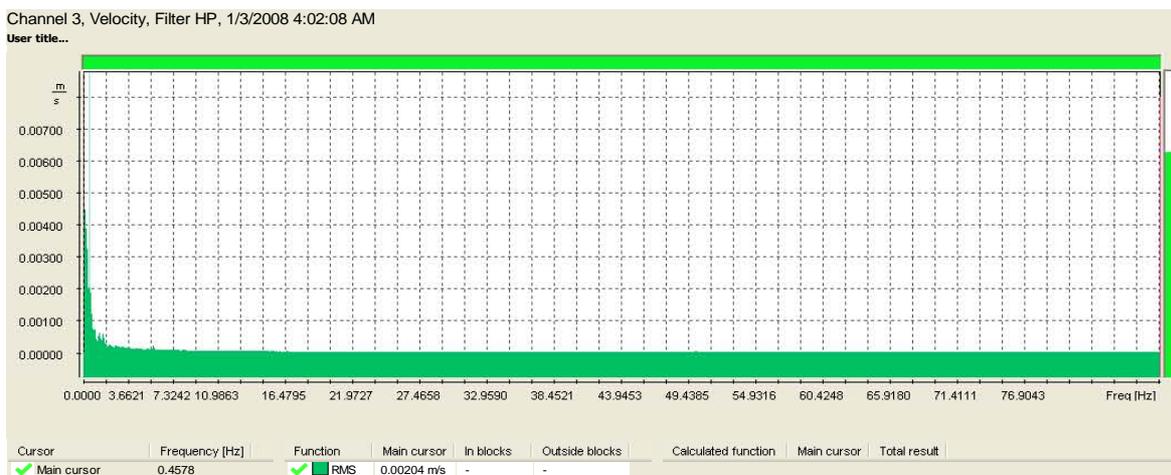


Fig. 5.26. Le spectre des vitesses d'après l'axe Oz, à la fréquence de 100 Hz

Dans les Figures 5.27., 5.28. et 5.29. sont donnés les spectres des déplacements d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux de l'appareil. La fréquence à laquelle on a effectué les mesures est de 100 Hz. On a effectué plusieurs mesures et on a fait leur moyenne.

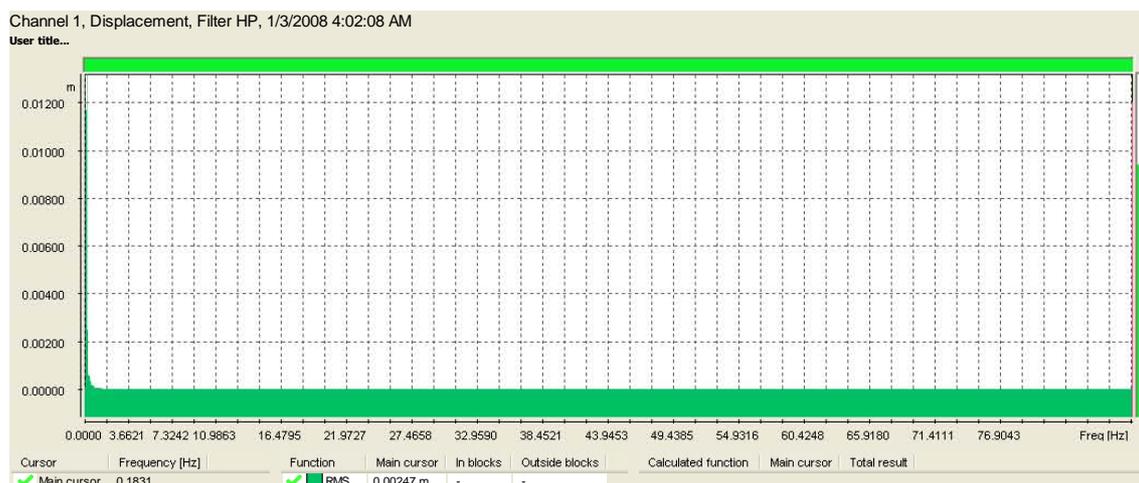


Fig. 5.27. Le spectre des déplacements d'après l'axe Ox, à la fréquence de 100 Hz

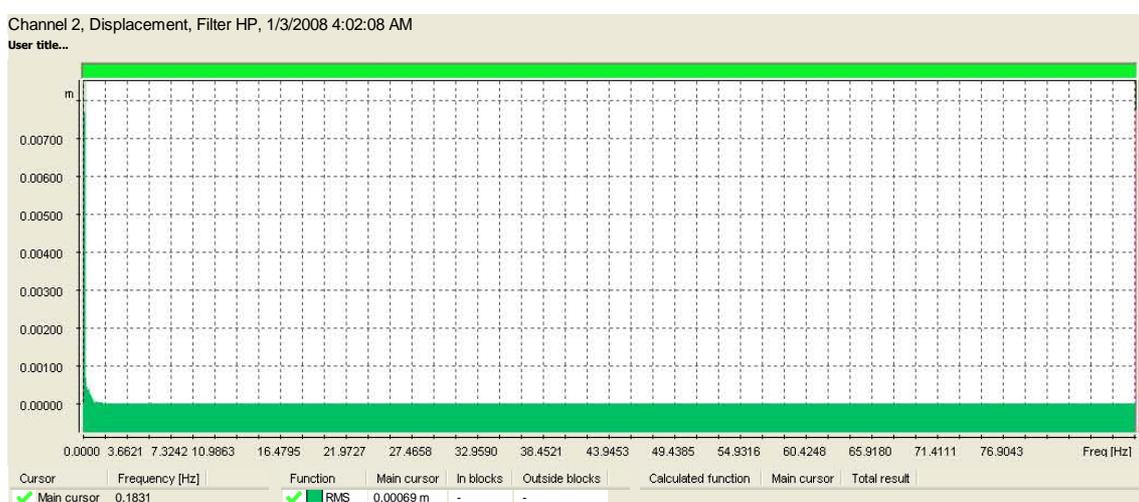


Fig. 5.28. Le spectre des déplacements d'après l'axe Oy, à la fréquence de 100 Hz

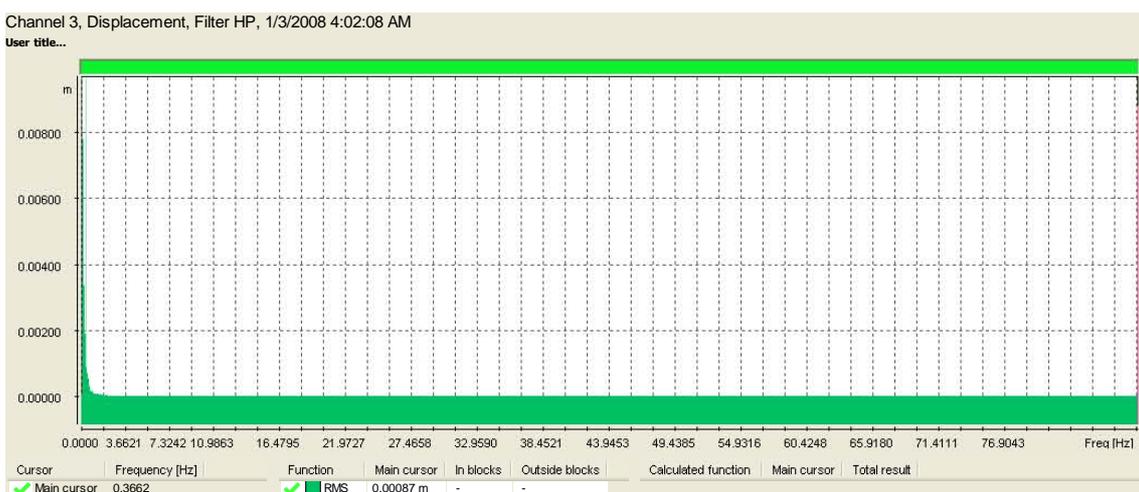
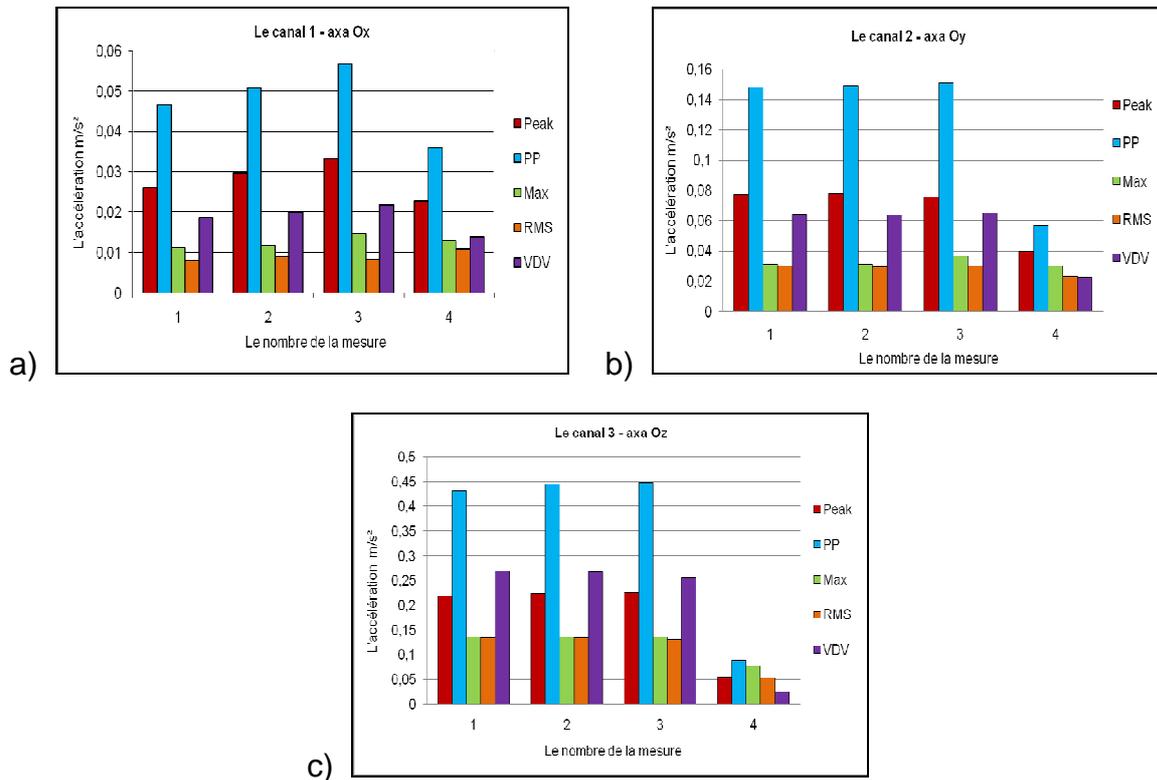


Fig. 5.29. Le spectre des déplacements d'après l'axe Oz, à la fréquence de 100 Hz

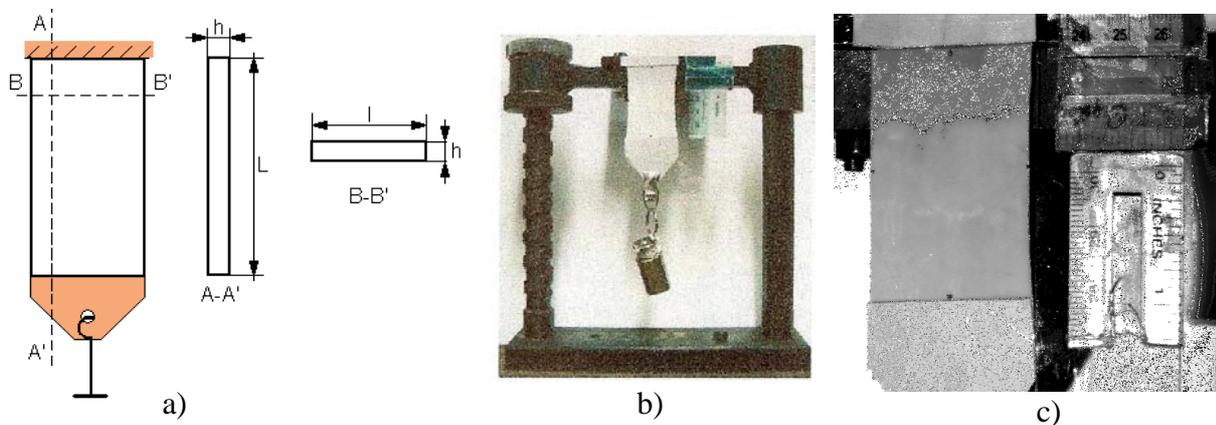
Si on compare les résultats d'après les trois directions de propagation Ox, Oy et Oz, on peut observer dans les Figures 5.30., 5.31. et 5.32., réalisées à l'aide des valeurs des Tableaux 5.1., 5.2. et 5.3., on observe que d'après la direction Oz est la plus grande amplitude, c'est-à-dire, les vibrations transmises se ressentent le plus fortement d'après la direction Oz.



**Fig. 5.30.** Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [ $m/s^2$ ] et VDV [ $m/s^{1.75}$ ] pour la fréquence de 100 Hz, correspondantes aux mesures effectuées d'après les axes:

a) Ox; b) Oy et c) Oz

### 5.7. L'étalonnage du matériel de la membrane par la méthode optique



**Fig. 5.31.** a) La géométrie de l'éprouvette de détermination des constantes élastiques de la membrane; b) Le dispositif expérimental utilisé pour la détermination des constantes  $E$  et  $\mu$ ; c) La visualisation des quatre points de repère sur l'éprouvette

Par analogie avec la membrane, on a utilisé une membrane d'un ballon météo qui à été tendue sur la bride du dispositif de la Figure 5.8. La détermination des constantes élastiques a été réalisée avec une éprouvette du même matériel que celui utilisé pour la membrane, avec la géométrie montrée dans la Figure 5.31. a et le dispositif de la Figure 5.31. b. La détermination de la constante élastique a été faite d'après la relation du module de Young et la relation pour le coefficient de Poisson qui se trouvent dans la littérature de spécialité. Les allongements sur l'horizontale et la verticale sont mesurés entre les quatre points du repère marqué sur éprouvette, comme dans la Figure 5.31. c [BAD 07]. Les valeurs obtenues pour les différents essais se

trouvent dans le Tableau 5.4., pour la membrane est sans teinture et dans le Tableau 5.5., pour la membrane teintée.

**Tableau 5.4.**

La détermination des constants élastiques du matériel de la membrane sans teinture

No. crt.	m [g]	l [mm]	Δl [mm]	L [mm]	ΔL [mm]	E [N/m <sup>2</sup> ]	$\bar{E}$ [N/m <sup>2</sup> ]	μ [-]	$\bar{\mu}$ [-]
0	0	36,382	-	50,882	-	0	1,267	0	0,311
1	20	36,032	0,350	51,115	0,233	2,944		0,502	
2	50	36,023	0,359	52,106	1,224	1,401		0,293	
3	70	36,015	0,367	53,127	2,245	1,069		0,163	
4	100	35,353	1,029	53,623	2,741	1,251		0,375	
5	120	35,344	1,038	54,102	3,220	1,278		0,322	
6	150	34,997	1,385	54,845	3,963	1,298		0,349	
7	200	34,644	1,738	56,347	5,465	1,255		0,318	
8	250	34,335	2,047	58,632	7,750	1,106		0,264	
9	300	34,307	2,075	59,335	8,453	1,217		0,245	
10	400	32,978	3,404	63,130	12,248	1,120	0,278		

**Tableau 5.5.**

La détermination des constants élastiques du matériel de la membrane avec teinture

No. crt.	m [g]	l [mm]	Δl [mm]	L [mm]	ΔL [mm]	E [N/m <sup>2</sup> ]	$\bar{E}$ [N/m <sup>2</sup> ]	μ [-]	$\bar{\mu}$ [-]
0	0	29,217	-	52,354	-	0	1,734	0	1,003
1	20	28,229	0,988	52,849	0,495	1,426		1,996	
2	50	28,243	0,974	52,863	0,509	3,467		1,914	
3	70	28,417	0,800	53,607	1,253	1,972		0,638	
4	100	26,872	2,345	54,102	1,748	2,019		1,342	
5	120	26,548	2,669	54,845	2,491	1,700		1,071	
6	150	26,533	2,684	55,108	2,754	1,922		0,975	
7	200	26,510	2,707	56,813	4,459	1,583		0,607	
8	250	25,831	3,386	57,805	5,451	1,619		0,621	
9	300	25,842	3,375	58,861	6,507	1,627		0,868	

L'aire de la section transversale a été calculée avec la formule  $S = h \cdot l_0$  [mm<sup>2</sup>]  
 $S = 0,4 \cdot 36,3824 = 14,553$  mm<sup>2</sup>, où  $h = 0,4$  mm représente l'épaisseur de la membrane,  $l_0 = 36,3824$  mm est la largeur initiale de l'éprouvette et  $L_0 = 50,882$  mm est la longueur initiale de l'éprouvette. La détermination de l'allongement a été réalisée à l'aide du programme DEFTAC, existant dans le cadre de la Chaire de Résistance des Matériaux, utilisant les images captées par une caméra CCD.

La détermination du module de Young a été effectuée avec la relation:

$$E = \frac{m \cdot g \cdot L_0}{S \cdot \Delta L} \left[ \frac{N}{m^2} \right]; \quad (5.1)$$

avec:

$$\Delta L = L_i - L_0 \quad i = 0, \dots, 10 \quad (5.2)$$

où:

- E – est le module de Young (le module d'élasticité longitudinale), [N/m<sup>2</sup>];
- m – est la masse avec laquelle on charge l'éprouvette, [Kg];
- g – l'accélération gravitationnelle, [m/s<sup>2</sup>];
- L<sub>0</sub> – la longueur en état non déformé de l'éprouvette mesurée entre deux points situés sur la même verticale, pour la sollicitation de l'éprouvette avec 0 g, [m];

S – est l'aire de la section transversale de l'éprouvette, [m<sup>2</sup>];

$\Delta L$  – l'allongement absolu en direction verticale, [m];

La détermination du coefficient de Poisson „ $\mu$ ” a été effectuée avec la relation:

$$\mu = \frac{\Delta l}{\Delta L} \quad (5.3)$$

où:

$$\Delta l = l_0 - l_i \quad i = 0, \dots, 9 \quad (5.4)$$

**Hypothèse simplificatrice.** Il a été considéré que le matériau de la membrane, le caoutchouc, obéit à la loi de Hooke. Le module d'élasticité et le coefficient de Poisson ont été calculés comme valeurs moyennes des déterminations et ont été considérés constants.

## 5.8. Applications expérimentales de la mesure des vibrations et des déformations par les méthodes optiques étudiées

### 5.8.1. Application de la mesure des déformations par la méthode de la lumière structurée avec le code Gray

La Figure 5.32. présente un exemple de projection de lumière structurée par code Gray, qui est de plus en plus fréquent pour la mesure des déformations [BOR 01], [RUN 08c].

Le système de mesure est capable de détecter les changements de niveau de la pièce, ainsi que les déformations locales du matériau utilisé dans la réalisation de la pièce.

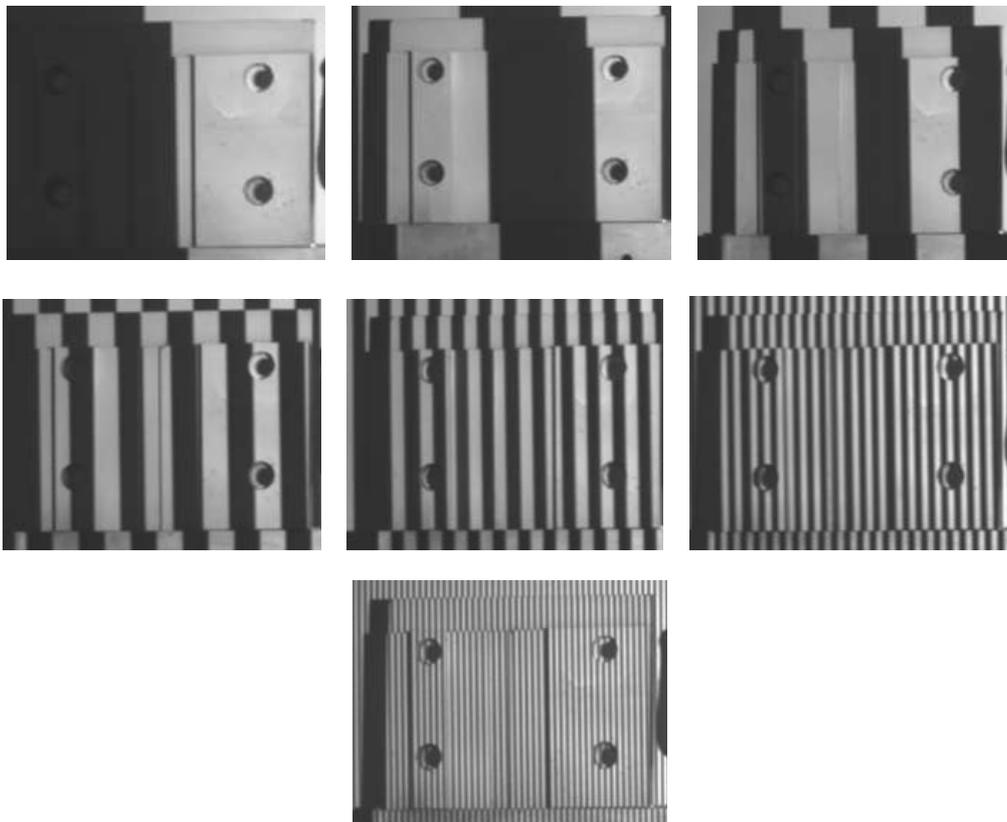
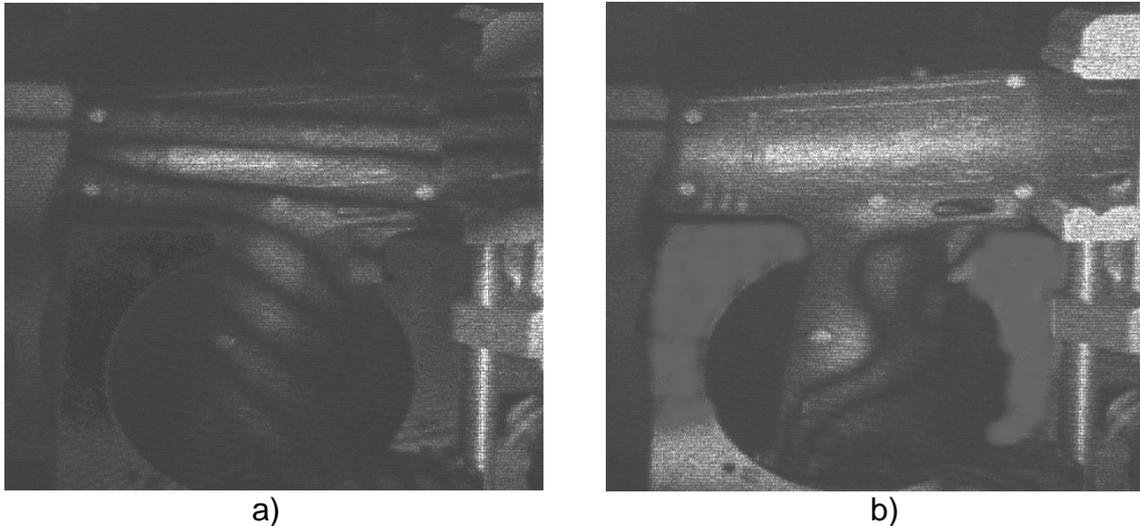


Fig. 5.32. Un exemple de projection de codes Gray

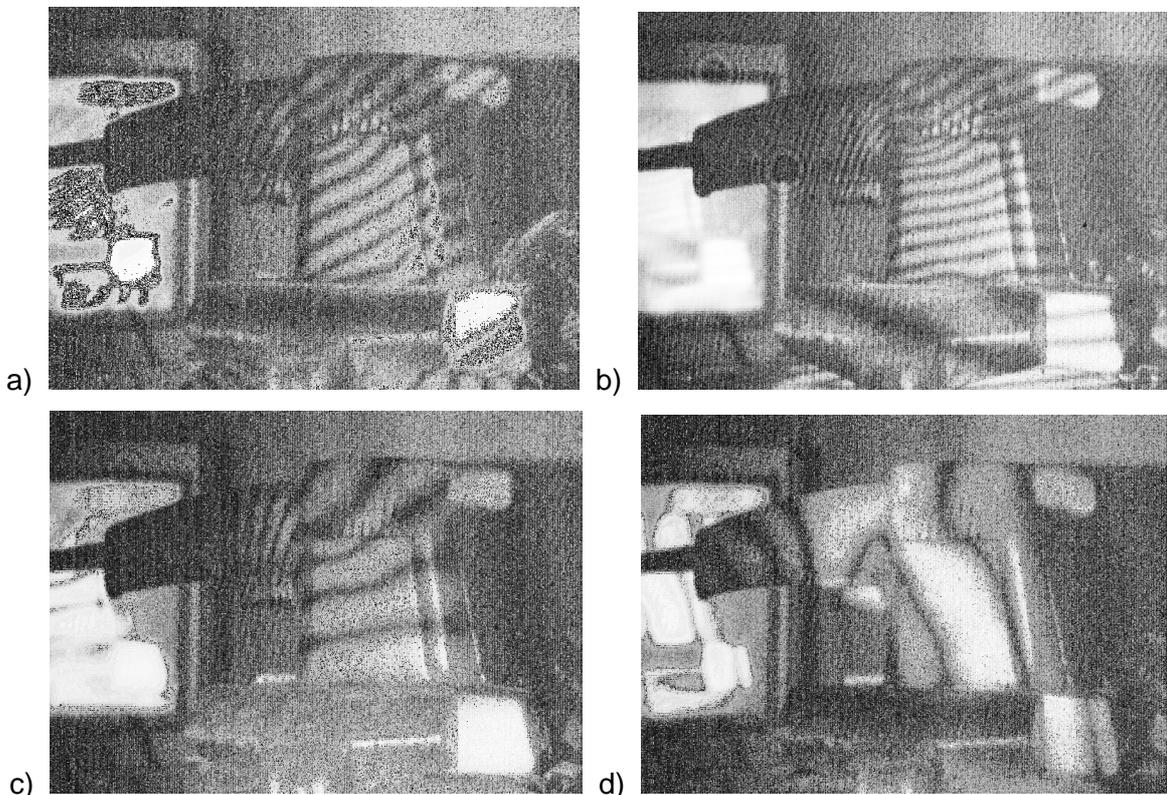
### 5.8.2. Applications expérimentales par la méthode de l'interférométrie de Speckles

Un premier exemple de visualisation des vibrations est effectué sur un outil à main (une perceuse). Dans les images présentées en Figure 5.33 on voit l'image de la poignée, couverte de franges d'interférence, obtenue par l'interférométrie de speckles [RUN 08e]. Ces mesures ont été effectuées au Laboratoire de Photomécanique de l'INSA de Rouen.



**Fig. 5.33.** Les exemples de visualisation des vibrations de la machine portable, concernant la poignée: a)  $f=214\text{Hz}$ ; b)  $f=1001\text{Hz}$  [RUN08b], [RUN 08e]

Le deuxième exemple de mesure des vibrations des outils portables concerne aussi la poignée des outils à main.



**Fig.5.34.** Les exemples de visualisation des vibrations des outils à main, concernant la poignée: a)  $f = 122\text{Hz}$ , b)  $f = 141\text{Hz}$ , c)  $f = 174\text{ Hz}$ , d)  $f = 365\text{ Hz}$  [RUN 08b]

La Figure 5.33. a, représente la vibration du corps rigide de l'outil à une fréquence de 214Hz, autour d'un axe horizontal orienté approximativement de gauche à droite (l'axe de l'outil). La poignée exécute une vibration hors plan, avec une amplitude de plus en plus grande, vers la partie située à la base de l'image.

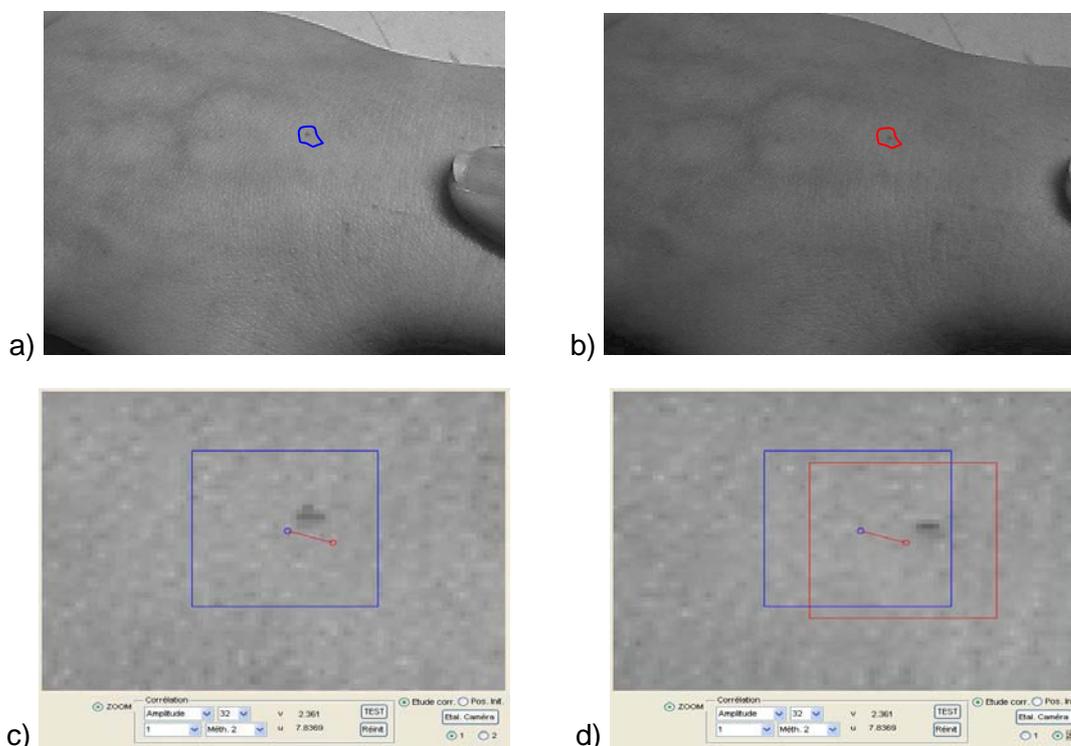
La Figure 5.33. b représente le mode de vibration local de la poignée de l'outil à une fréquence de 1001Hz, avec des amplitudes croissantes vers la partie située à droite de l'image (cette partie concerne donc la partie d'avant de la poignée, celle qui est en contact avec les doigts de l'opérateur).

La Figure 5.34 représente la vibration de corps rigide de l'outil (l'outil est fixé en étau), effectuée par interférométrie speckles, à une fréquence de 122Hz à 365Hz. La ponceuse exécute une vibration hors plan, avec une amplitude de plus en plus grande, vers le corps de l'outil portable.

On peut noter qu'avec la croissance de la fréquence, l'amplitude baisse. Les Figures 5.34. a et 5.34. b représentent le mode de vibration local (la plaque avec laquelle on travaille, celle qui est en contact avec le mur), dans la partie située à la base de l'image [RUN 08e].

### 5.8.3. Applications expérimentales par la méthode de la corrélation d'images numériques

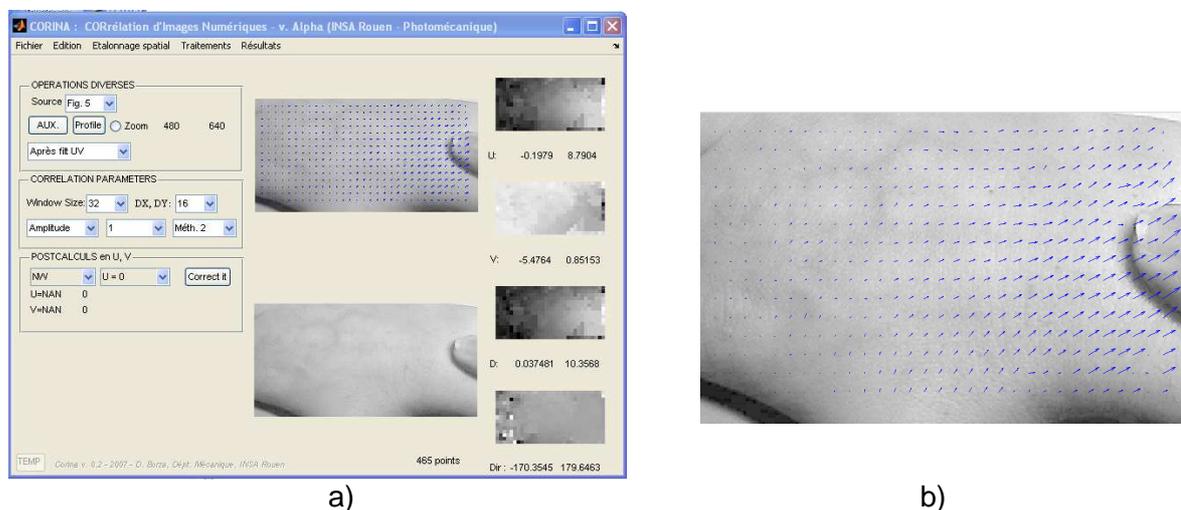
L'expérimentation représente une déformation de la peau de la main réalisée au Laboratoire de Mécanique de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen. La Figure 5.35. a représente l'état initial. Comme point de repère on a pris la verrue sur la main et dans la Figure 5.35. b est représentée la main après la modification de la longueur de la peau dans la zone visualisée. Dans la Figure 5.38. est donné le champ complet de déplacements à la surface de la partie de la main cadrée. [RUN 09a].



**Fig. 5.35.** Le déplacement de la verrue, a) et c) l'état initial, b) et d) l'état finale [RUN09a]

Dans la Figure 5.37. est montré le champ de déplacements global obtenu par la corrélation entre les deux images (Fig. 5.37. a). Le logiciel de corrélation utilisé, CORINA, élaboré à l'INSA de Rouen, s'exécute dans l'interface montrée dans la Figure

5.37 a. La Figure 5.37. b montre le résultat final. Le logiciel utilise une première corrélation, montrée dans la Figure 5.37 b, où le pic est décalé de  $[u v] = [8 2]$  pixels. Dans la deuxième corrélation entre les deux zones d'images décalées de  $[8 2]$  pixels et montrée dans la Figure 5.37. c on voit que le pic est centré en  $[u v] = [0 0]$  pixels. Enfin, dans la Figure 5.37. d, on peut observer la position du pic, obtenue en interpolant le champ des valeurs autour du pic de corrélation, dans la Figure 5.37. c.



a) L'interface avec le champ de déplacement global et les projections en direction horizontale et verticale; b) Le champ de déplacements

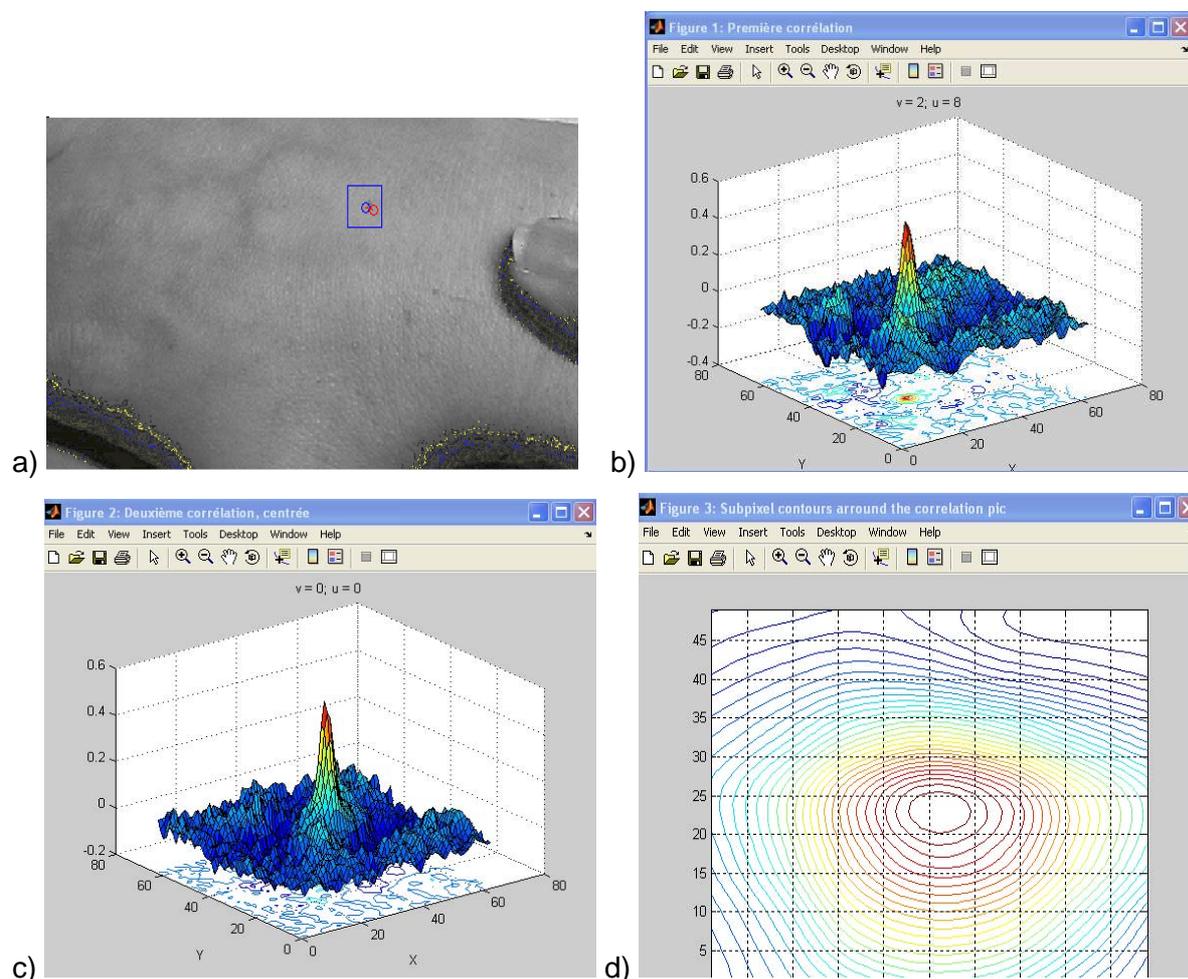


Fig. 5.37. La corrélation des images [RUN 09a]

## 5.9. Les expériences au lieu de travail

Les mesures expérimentales ont été faites dans les conditions de travail des ateliers de l'Université Technique de Cluj-Napoca, sur un tour SNA 500x1000 et sur une machine à percer verticale Mx750. Les mesures avec le vibromètre SVAN 958 et avec la méthode Moiré de projection et leur interprétation seront présentées dans le Chapitre 6. Dans ce qui suit, on présentera le montage réalisé pour les deux machines-outils.

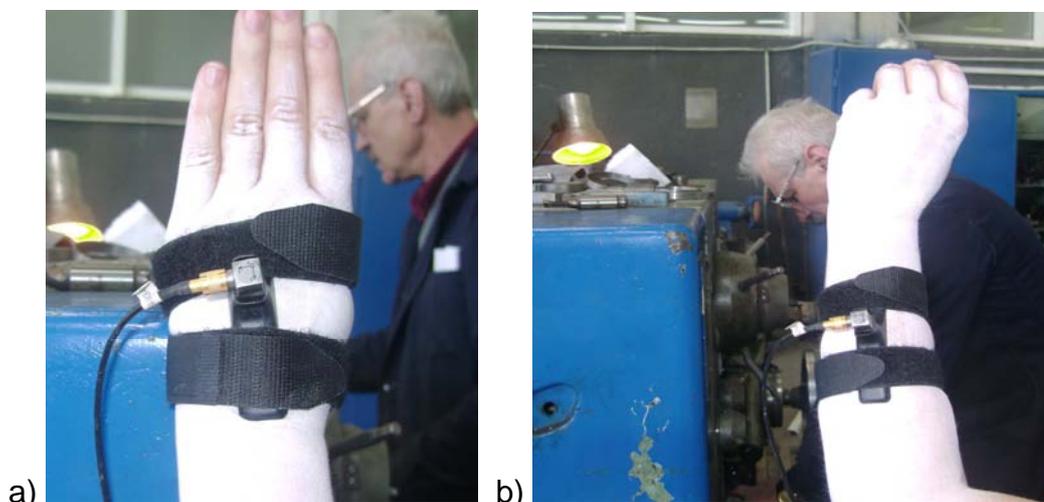
### 5.9.1. Le montage pour la mesure des vibrations sur le tour SNA 500x1000

Les mesures sur le tour SNA 500x1000 ont été réalisées sur un opérateur humain en position statique debout. On a effectué des mesures pour une seule vitesse de la machine-outil, la vitesse de 800 rot/min, en deux points du système humain main-bras.

Le volontaire, soumis aux expériences, a été informé sur les conditions liées aux détails de l'expérimentation et sur les risques auxquels il est soumis par l'application des vibrations produites par la machine-outil sur le corps humain. On a choisi un sujet de sexe féminin, à l'âge de 27 ans, en bonne santé physique.

L'appareil utilisé pour les mesures et son mode d'application, est décrit ci-dessous. Il y a eu deux séries de mesures avec le vibromètre SVAN PC++ et avec la méthode Moiré de projection.

Pour la première série de mesures on a utilisé l'appareil de mesure des bruits et des vibrations SVAN 958, appareil auquel a été connecté un capteur triaxial K3, il a été fixé avec une vis sur un support métallique léger. L'accéléromètre avec son support a été monté sur le corps humain à l'aide des bandes bien serrées autour des locations anatomiques à mesurer (Fig. 5.38.).



**Fig. 5.38.** La fixation de l'accéléromètre avec son support pour la réalisation des mesures sur le système main-bras: a) sur la main), b) sur l'avant-bras

Pendant la durée des mesures, l'opérateur a tenu la main, respectivement l'avant-bras, fermement collée à la poupée fixe du tour SNA 500x1000.

La deuxième série de mesures a été effectuée par la méthode Moiré de projection, pour laquelle on a eu besoin de plusieurs appareils.

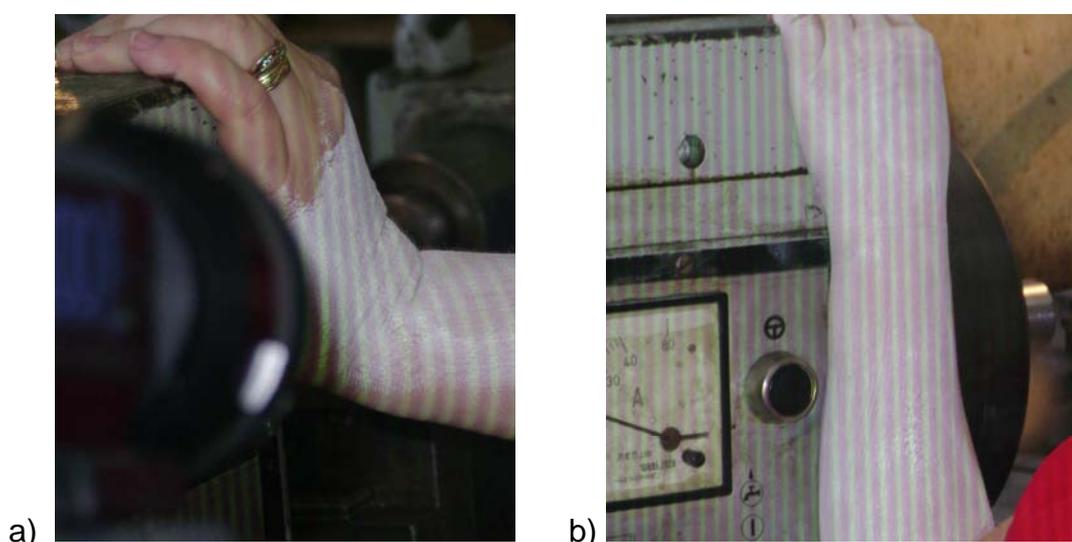
Les appareils nécessaires pour la réalisation des mesures sont: une caméra CCD, un projecteur, un ordinateur avec lequel on acquiert et on traite les données obtenues, un autre ordinateur d'où l'on projette les grilles de projection (en nombre de trois) et un autre écran, sur lequel on peut observer les Moirés qui apparaissent sur la surface à mesurer après la projection des grilles.

Dans la Figure 5.39. on peut observé l'emplacement des appareils pour la réalisation des mesures par la méthode de Moiré de projection au tour SNA 500x1000.



**Fig. 5.39.** L'emplacement des appareils pour la réalisation des mesures par la méthode Moiré de projection

Dans la Figure 5.40. on montre la projection d'une grille de projection sur la main (Fig.5.40. a) et sur l'avant-bras (Fig. 5.40. b).



**Fig. 5.40.** La projection des grilles de projection: a) sur la main; b) sur l'avant-bras

### 5.9.2. Le montage pour la mesure des vibrations sur la machine à percer verticale Mx750

Les mesures effectuées sur la machine de percer verticale Mx750 ont été réalisées par un opérateur humain en position debout. Les mesures ont été effectuées pour deux vitesses de la machine à percer verticale à 180 rot/min et 355rot/min, en deux points du système humain main-bras.

On a pris les mêmes précautions et on a utilisé la même instrumentation que celles décrites au 5.9.1

Pendant la durée des mesures, l'opérateur a tenu la main, respectivement l'avant-bras fermement collé sur la colonne fixe de la machine de percer vertical MAx750.

La deuxième série de mesures a été effectuée par la méthode Moiré de projection.



**Fig. 5.41.** La fixation de l'accéléromètre avec son support fixé sur avant-bras



**Fig. 5.42.** L'emplacement de la caméra CCD et du projecteur pour la réalisation des mesures par la méthode Moiré de projection

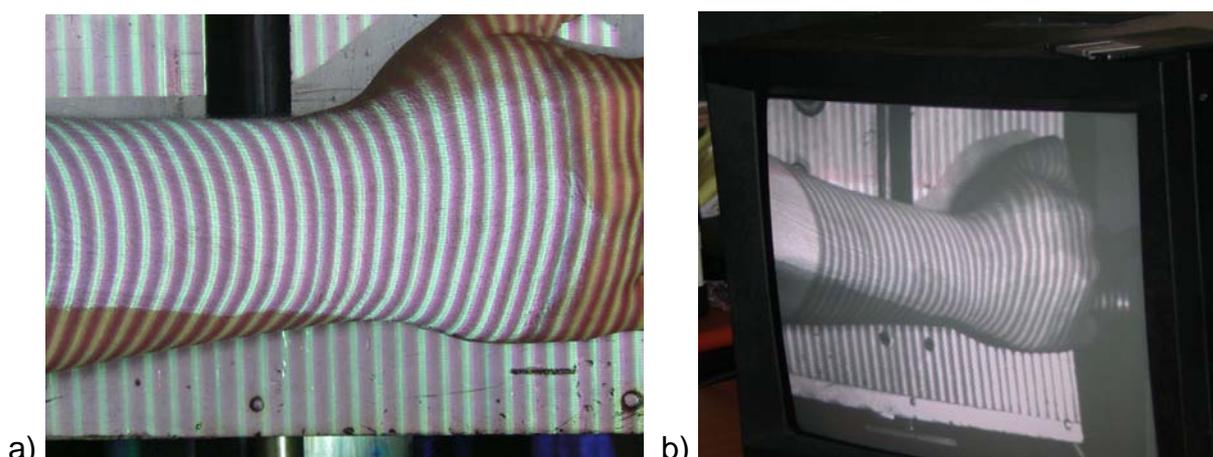
Dans la Figure 5.42. est donné l'emplacement de la caméra CCD et du projecteur pour la réalisation des mesures.

La Figure 5.43. présente le système d'acquisition de données. Il comprend un ordinateur, avec lequel on acquiert et on traite les données obtenues, un ordinateur d'où on projète les grilles de projection (en nombre de trois) et un autre écran sur lequel on peut voir les Moirés qui apparaissent sur la surface à mesurer pendant la projection des grilles.



**Fig. 5.43.** Le system pour l'acquisition et de traitement des données obtenues par la méthode Moiré de projection

Dans la Figure 5.46. a peut observer la grille projetée sur le système main-bras et dans la Figure 5.44. b, la visualisation de Moiré sur l'écran.



**Fig. 5.44.** L'observation des Moirés pour le système main-bras:  
a) la grille projetée sur l'avant-bras; b) la visualisation des Moirés sur l'écran.

## 5.10. Conclusions

Dans ce chapitre, on a présenté en détail le logiciel „Projet”, nécessaire pour la représentation des mesures effectuées par la méthode Moiré de projection, le logiciel "SvanPC+", nécessaire pour la représentation des mesures effectuées à l'aide du vibromètre SVAN 958 et le dispositif d'essais utilisé.

La mesure des vibrations dans la thèse de doctorat a été effectuée avec l'analyseur de vibrations SVAN 958, pour lequel on a présenté l'interface, le menu principal, les fonctions de l'appareil, le logiciel nécessaire pour le traitement et l'interface de traitement des résultats. La mesure des vibrations a été faite et par la méthode Moiré de projection, pour laquelle on a présenté tous les dispositifs nécessaires, leur mode d'emplacement et le logiciel utilisé pour le traitement des résultats.

La partie expérimentale de la thèse de doctorat a été faite dans deux conditions différentes:

1. Dans des conditions de laboratoire, pour lesquelles on a créé et réalisé un dispositif et une installation de mesure des vibrations (le Chapitre. 5.4.),
2. Dans les conditions de travail des ateliers de l'UTC-N, sur un tour SNA 500x1000 et une machine de percer vertical Mx750, pour lesquels les mesures et leur interprétation, tant avec le vibromètre SVAN 958 qu'avec la méthode Moiré de projection, seront présentés dans le Chapitre 6.

Les mesures effectuées au Laboratoire de Mécanique de l'INSA de Rouen par la méthode d'interférométrie Speckles montrent qu'avec la croissance de la fréquence, l'amplitude baisse, comme on le voit dans les Figures 5.33. et 5.34.

La corrélation d'images numériques, méthode appliquée aussi à l'INSA de Rouen, permet la détermination par post-traitement des mesures pour les essais mécaniques. Elles permettent de mesurer les valeurs locales des propriétés élastiques des matériaux

Les vibrations mécaniques sont transmises de la machine-outil à la main de l'opérateur humain, d'après toutes les trois directions de la coordination anatomique du système humain, de façon plus ou moins élevée, en fonction de l'état d'usure des machines-outils utilisées et de temps d'utilisation.

## CHAPITRE 6

### LA MESURE DES VIBRATIONS DU SYSTEME MAIN-BRAS

#### 6.1. Les notions générales et les définitions

*Le capteur* est le dispositif qui convertit un signal optique ou mécanique qui apparaît dans un choc ou un mouvement vibratoire dans un signal électrique, d'habitude proportionnel.

*Le traducteur* est la partie du capteur dans lequel la transformation effective du signal mécanique en signal électrique a lieu.

*La chaîne de mesure* est l'ensemble des dispositifs qui transforment le mouvement produit par choc ou par vibration dans un signal mesurable, directement proportionnel à l'un des paramètres du mouvement. Il consiste dans un capteur avec un élément traducteur, un conditionneur (le plus souvent un amplificateur) et un dispositif d'observation ou d'enregistrement du signal. Un appareil de mesure des vibrations comprend tous ces éléments dans une seule unité, tandis qu'un montage utilise plusieurs unités séparées.

*L'accéléromètre* est un capteur, pour lequel le signal électrique de sortie est proportionnel à l'accélération (mécanique) qui représente le signal d'entrée [HAR 02].

#### 6.2. L'opérateur humain

Les mesures de cette étude ont été effectuées sur deux opérateurs humains situés en position statique debout, l'un pour les mesures effectuées sur le tour SNA 500x1000 et l'autre, pour les mesures effectuées sur la machine de percer vertical MAX750.

Pour le tour on a effectué des mesures pour une seule vitesse de la machine-outil, en deux points du système humain main-bras. Les vibrations produites par une excitation appliquée à la main, ont été mesurées dans un système de coordonnées décrit dans les chapitres précédents.

Les mesures de sécurité ont déjà été décrites au chapitre 5.



**Fig. 6.1.** L'accéléromètre tridimensionnel utilisé pour l'acquisition des données des mesures

##### 6.2.1. La méthode de travail pour les mesures effectuées sur le tour

L'appareil utilisé pour les mesures et son mode d'application est décrit ci-dessous. On a utilisé l'appareil SVAN 958, pour mesurer des bruits et les vibrations, appareil auquel on a connecté un capteur triaxial K3. Celui-ci a été fixé avec une vis sur

un support métallique léger (Fig. 6.1.) et, ainsi, la base de données résultée des mesures contient les données d'après les trois axes des coordonnées. L'accéléromètre, avec son support a été monté sur l'organisme humain à l'aide des bandes bien serrées autour des emplacements anatomiques à mesurer (Fig. 6.2. et Fig. 6.3.).

Les directions représentées sur l'accéléromètre représentent aussi les trois canaux sur lesquels on a fait l'acquisition de données. Dans le cas de la mesure sur la main, comme se voit dans le montage de la Figure 6.2., la direction "1" représente l'axe Ox de l'organisme humain, selon le système d'axes décrit dans le Chapitre 3. La direction "2" représente l'axe Oz dans le sens positif et la direction "3" représente l'axe Oy, toujours dans le sens positif de l'axe.



**Fig. 6.2.** L'accéléromètre monté sur la main



**Fig. 6.3** L'accéléromètre monté sur l'avant-bras

Les mesures ont été effectuées à l'Université Technique de Cluj-Napoca sur un tour SNA 500x1000, avec les caractéristiques suivantes: la puissance du moteur  $P=11$  kW, la sécurité de 35 A, pour la vitesse de 800 rot/min.

Les conditions dans lesquelles ont été exécutées les mesures sont les suivantes:

- L'opérateur humain a tenu la paume gauche sur la poupée fixe du tour;
- Les mesures ont été effectuées à midi (à 12h);
- Pendant les mesures, on a tourné une pièce cylindrique avec le diamètre de 25 mm, le tournage a été réalisé avec la vitesse d'avance  $a=0,7$ mm/rot et d'une profondeur de coupe de 3,8mm. Ces-ci constituent le régime de coupe pendant le fonctionnement en charge.
- L'appareil a été mesuré les vibrations mécaniques d'après les trois directions Ox, Oy et Oz, du système anatomique, sur les trois canaux des quatre canaux possibles de l'appareil et on a sélectionné pour la mesure le filtre correspondant à la transmission des vibrations du système main-bras (Annexe A3).
- Le fonctionnement au ralenti du régime de coupe a été sélectionnée seulement pour la vitesse de 800 rot/min.

### 6.3. La mesure des vibrations sur le tour avec le vibromètre SVAN 958

#### 6.3.1. La mesure des vibrations sur la main pendant le fonctionnement au ralenti et en charge du tour SNA 500x1000 avec le vibromètre SVAN 958

Pour l'acquisition des données, selon la norme SR ISO 2631-1, le filtre utilisé est Wd, correspondant à la position orthocentrique du corps humain. L'acquisition a été effectuée pendant 10 secondes, sur les trois canaux simultanément. On a mesuré l'accélération et on a gardé seulement les valeurs moyennes quadratiques des accélérations pour les trois axes de coordonnées.

La représentation spectrale obtenue pour chaque donnée acquise indique la valeur maximale des composantes des fréquences composées.

Les valeurs, qui ont résultées à la suite des mesures sur la main avec le vibromètre SVAN 958, sont indiquées dans les Tableaux 6.1., 6.2. et 6.3. On a donné les résultats des mesures effectuées sur chaque canal (l'axe Ox – sur le canal 1, l'axe Oy – sur le canal 3 et l'axe Oz – sur le canal 2).

**Tableau 6.1.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main d'après les mesures sur l'axe Ox

Canal 1 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.10740	0.17100	0.03292	0.02576	0.05546
2	0.02063	0.04116	0.01098	0.00829	0.01724
3	0.02851	0.04534	0.01230	0.00732	0.01813
4	0.02570	0.04498	0.00967	0.00763	0.01760
5	0.02729	0.05433	0.01233	0.00908	0.02021
6	0.02989	0.05029	0.01176	0.00805	0.01782

**Tableau 6.2.**

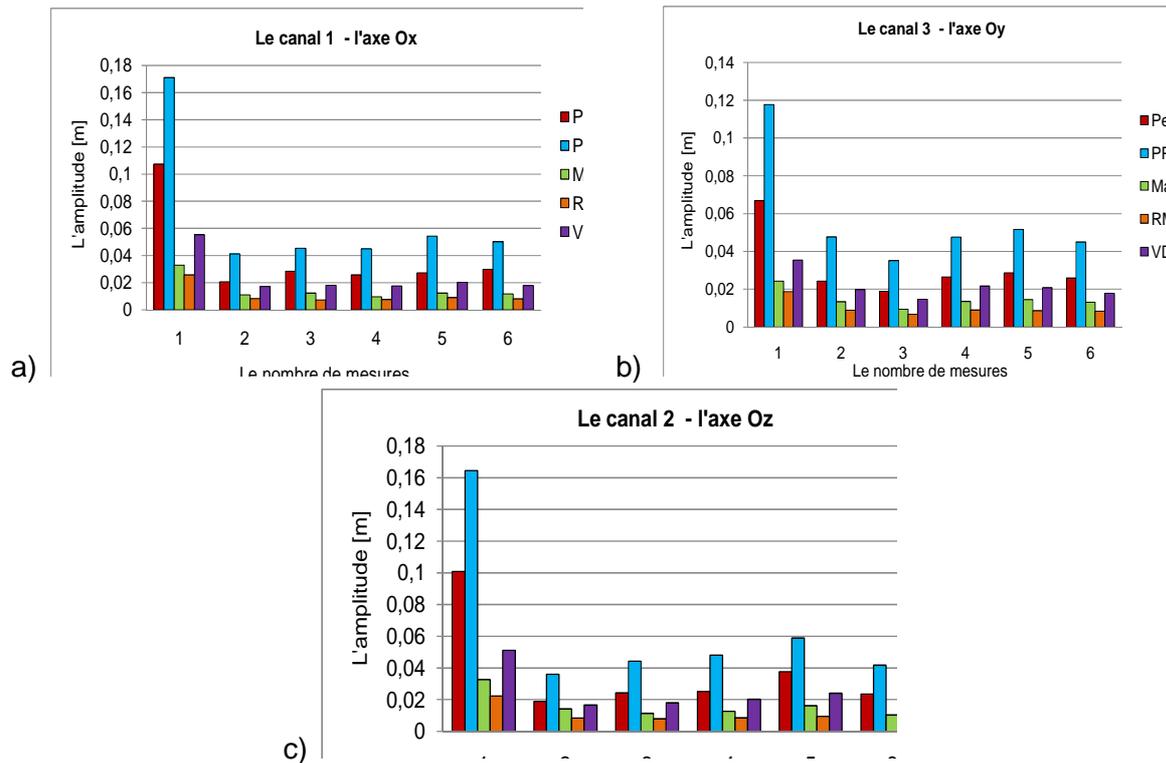
Les valeurs des accélérations obtenues sur la main d'après les mesures sur l'axe Oy

Canal 3 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.06691	0.11776	0.02432	0.01871	0.03544
2	0.02429	0.04770	0.01344	0.00893	0.01984
3	0.01890	0.03524	0.00945	0.00675	0.01471
4	0.02642	0.04759	0.01361	0.00906	0.02168
5	0.02871	0.05170	0.01455	0.00865	0.02084
6	0.02589	0.04503	0.01312	0.00841	0.01791

**Tableau 6.3.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main d'après les mesures sur l'axe Oz

Canal 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.10081	0.16444	0.03262	0.02231	0.05105
2	0.01886	0.03602	0.01416	0.00848	0.01663
3	0.02421	0.04431	0.01131	0.00793	0.01801
4	0.02512	0.04814	0.01268	0.00858	0.02021
5	0.03771	0.05882	0.01622	0.00942	0.02402
6	0.02355	0.04173	0.01036	0.00835	0.01631

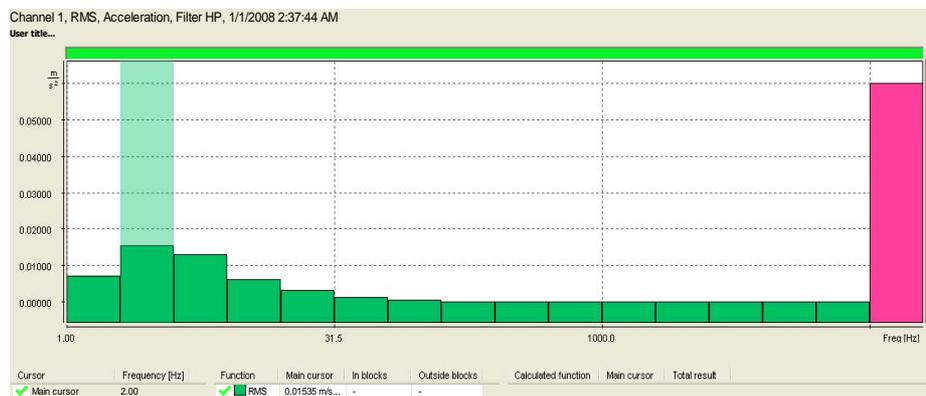


**Fig. 6.4.** Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [m/s<sup>2</sup>] et VDV [m/s<sup>2</sup>] correspondantes aux mesures effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les axes Ox, Oy et Oz

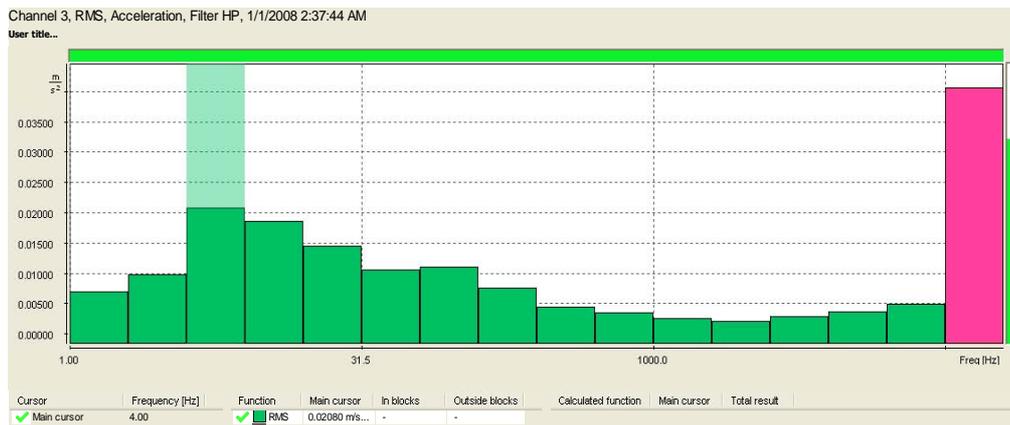
Les Figures 6.4. a, b, c présentent les mesures des vibrations mécaniques (les accélérations: Peak – l'amplitude mesurée de l'axe de symétrie au pic, Peak to Peak - l'amplitude mesurée du pic au pic, Max, RMS - Root Mean Square – la racine moyenne carrée et VDV – Vibration Dose Value – la Valeur du Dosage des Vibrations) effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les directions Ox (Fig. 6.4. a) Oy (Fig. 6.4. b) et Oz (Fig. 6.4. c).

Si on compare les résultats d'après trois directions de propagation Ox, Oy et Oz on peut observer des Figures 6.4. a, b et c, réalisées à l'aide les valeurs des Tableaux 6.1., 6.2. et 6.3., que sur la direction Ox est la plus grande amplitude, c'est-à-dire les vibrations transmises se ressentent le plus fort sur la direction Ox pour la marche au ralenti de la machine-outil.

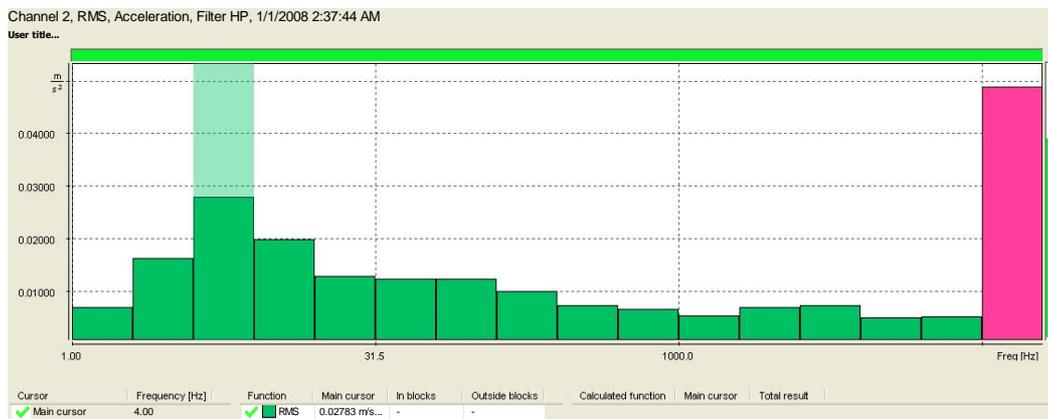
Dans les Figures 6.5., 6.6. et 6.7. sont donnés les spectres d'accélérations pour la mesure effectuée sur la main, au fonctionnement au ralenti avec la vitesse de rotation de l'axe principal de la machine-outil de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du l'appareil. La fréquence à laquelle ont été effectués les mesures est de 83,73 Hz. On a effectué plusieurs mesures et on a fait leur moyenne.



**Fig. 6.5.** Le spectre d'accélérations d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. 6.6.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min



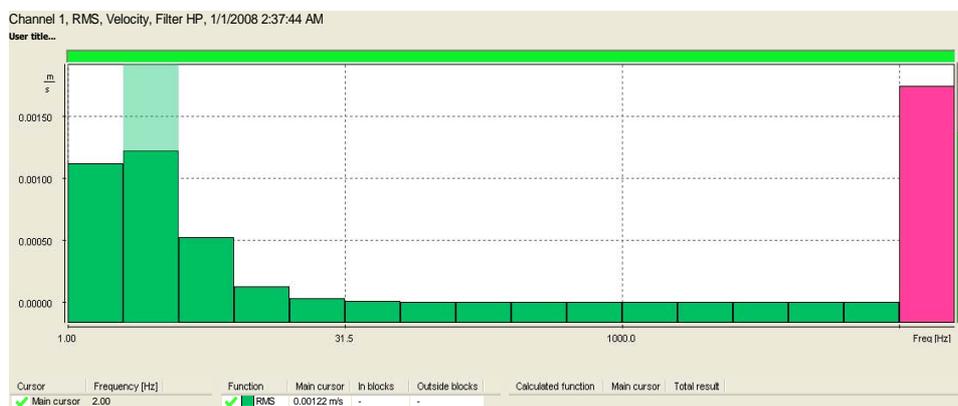
**Fig. 6.7.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Ox est de  $0,01535 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 2 Hz.

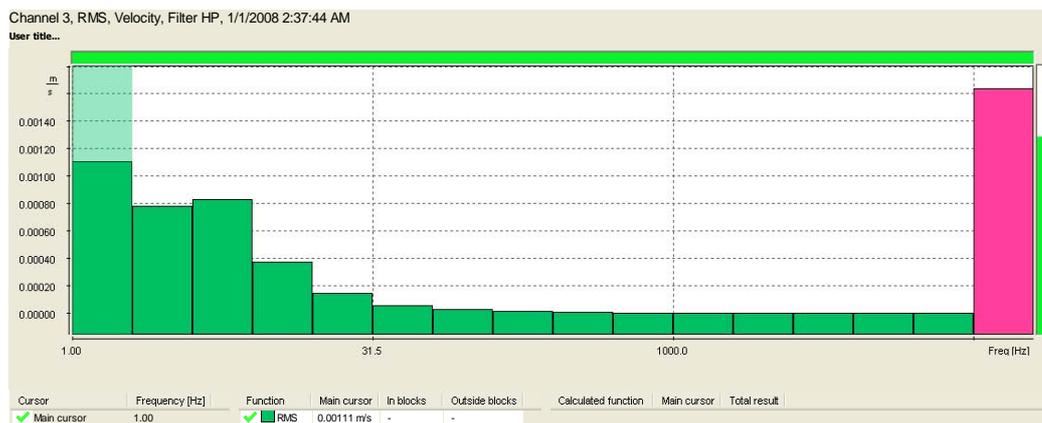
La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oy est de  $0,02080 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 4 Hz.

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oz est de  $0,02783 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 4 Hz.

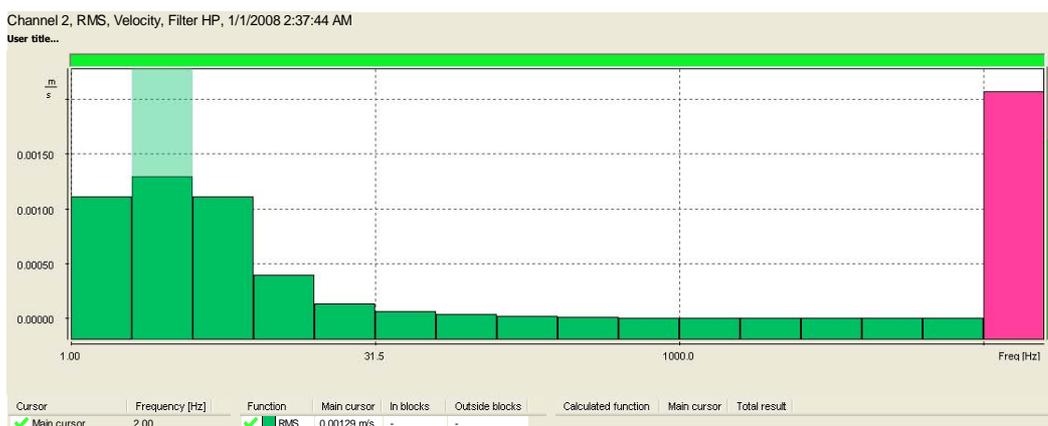
Dans les Figures 6.8., 6.9. et 6.10. sont montrés les spectres des vitesses pour les mesures effectuées sur la main, au fonctionnement au ralenti, avec la vitesse de rotation de l'axe principal de la machine-outil de 800 rot/min, d'après les trois directions Ox, Oy et Oz, aux trois canaux du l'appareil. Les vitesses ont été obtenues par l'intégration des accélérations.



**Fig. 6.8.** Le spectre de la vitesse d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. 6.9.** Le spectre de la vitesse d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min



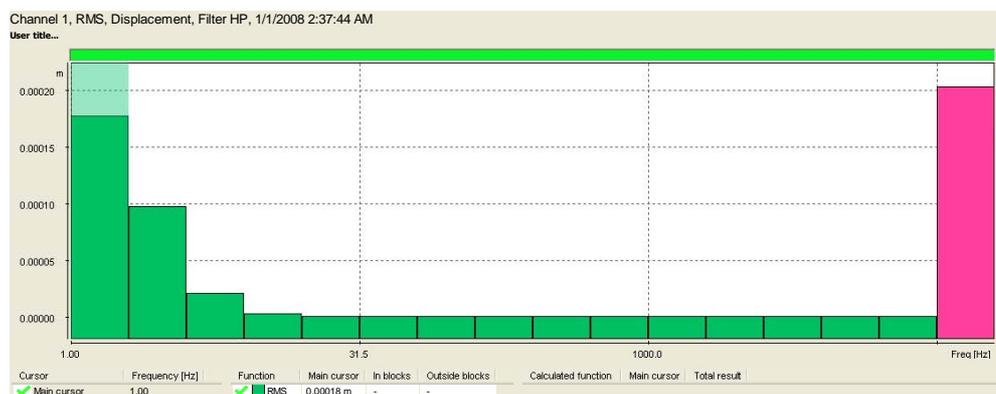
**Fig. 6.10.** Le spectre de la vitesse d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Ox est de 0,00122 m/s et on la trouve à la fréquence de 2 Hz.

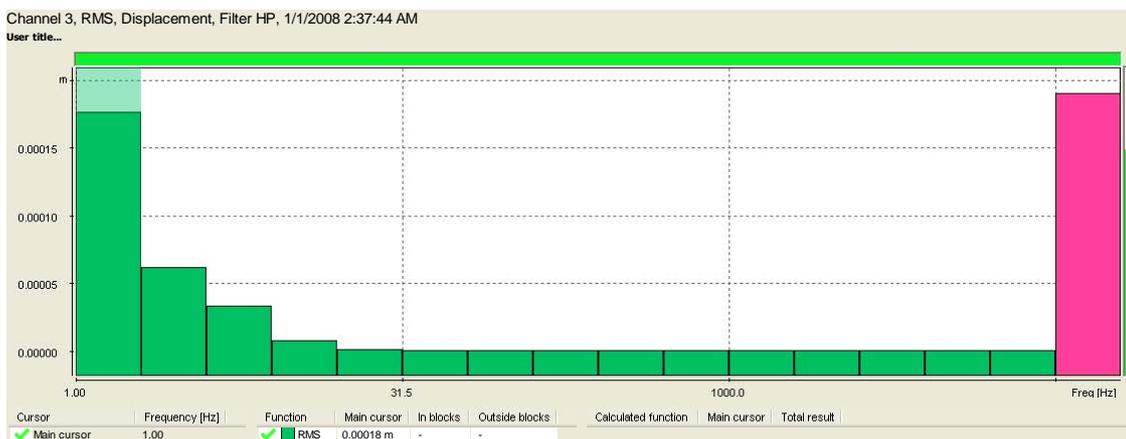
La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oy est de 0,00111 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oz est de 0,00129 m/s et on la trouve à la fréquence de 2 Hz.

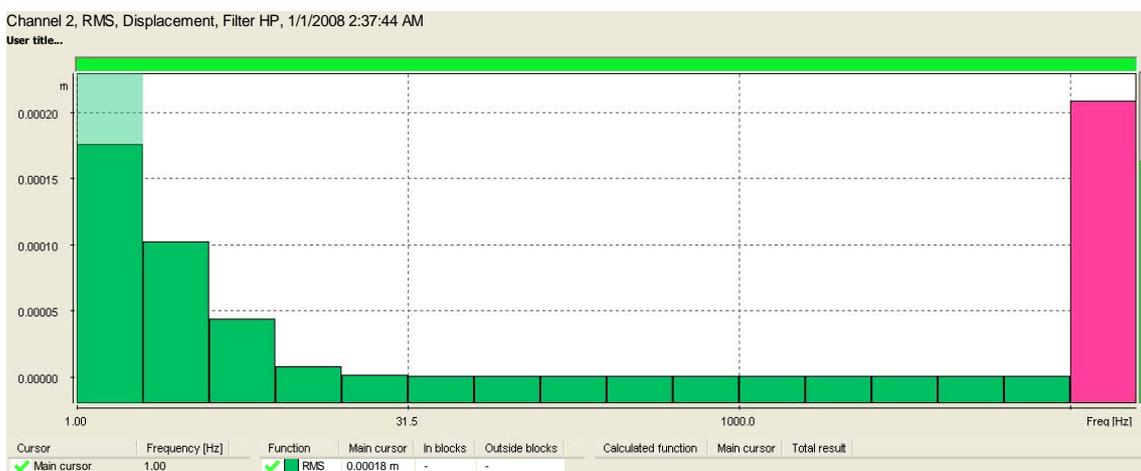
Dans les Figures 6.11., 6.12. et 6.13. sont montrés les spectres des déplacements pour la mesure effectuée sur la main, au fonctionnement au ralenti, à la vitesse de rotation de l'axe principal de la machine-outil de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, aus trois canaux de l'appareil. Les déplacements ont été obtenus par l'intégration de la vitesse.



**Fig. 6.11.** Le spectre de déplacements d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. 6.12.** Le spectre des déplacements d’après l’axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. 6.13.** Le spectre des déplacements sur l’axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale du déplacement d’après l’axe Ox est de 0,00018 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale du déplacement d’après l’axe Oy est de 0,00018 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale du déplacement d’après l’axe Oz est de 0,00018 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

Les valeurs qui ont résulté suite aux mesures avec le vibromètre SVAN 958 sur la main, au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, à la vitesse de rotation de 800 rot/min, sont données dans les Tableaux 6.4., 6.5. et 6.6, enregistrées pour chaque canal.

**Tableau 6.4.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main pour les mesures d’après l’axe Ox

Canal 1 (VLM)					
No.	P1 (Wd, 1 s) Peak [m/s <sup>2</sup> ]	P1 (Wd, 1 s) PP [m/s <sup>2</sup> ]	P1 (Wd, 1 s) Max [m/s <sup>2</sup> ]	P1 (Wd, 1 s) RMS [m/s <sup>2</sup> ]	P1 (Wd, 1 s) VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02246	0.04487	0.01239	0.00789	0.01754
2	0.01963	0.03495	0.00899	0.00546	0.01318
3	0.02082	0.04004	0.010667	0.00743	0.01738
4	0.02231	0.04135	0.01202	0.00795	0.01824
5	0.01766	0.03243	0.00838	0.00674	0.01038

Tableau 6.5.

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main pour les mesures d'après l'axe Oy

Canal 3 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02118	0.04232	0.01084	0.00763	0.01837
2	0.01914	0.03776	0.01117	0.00866	0.01809
3	0.02286	0.04539	0.01167	0.00869	0.02042
4	0.02864	0.05534	0.01449	0.01016	0.02377
5	0.02163	0.03877	0.01148	0.00917	0.01392

Tableau 6.6.

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main dans les mesures d'après l'axe Oz

Canal 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02673	0.05012	0.01419	0.01038	0.02262
2	0.01854	0.03388	0.00927	0.00632	0.01414
3	0.02200	0.03859	0.01050	0.00706	0.01552
4	0.03055	0.04966	0.01427	0.00908	0.02143
5	0.03137	0.05140	0.01290	0.00868	0.01854

Les Figures 6.14. a, b et c, présentent les mesures des vibrations mécaniques (effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les directions Ox (Fig. 6.14. a), Oy (Fig. 6.14. b) et Oz (Fig. 6.14. c).

Si on compare les résultats d'après les trois directions de propagation Ox, Oy et Oz, on peut observer dans les Figures 6. 14.a, b et c réalisées à l'aide des valeurs des Tableaux 6.4., 6.5. et 6.6., que sur la direction Oz est la plus grande amplitude, c'est-à-dire les vibrations transmises se ressentent le plus fort d'après la direction Oz, au fonctionnement en charge de la machine-outil.

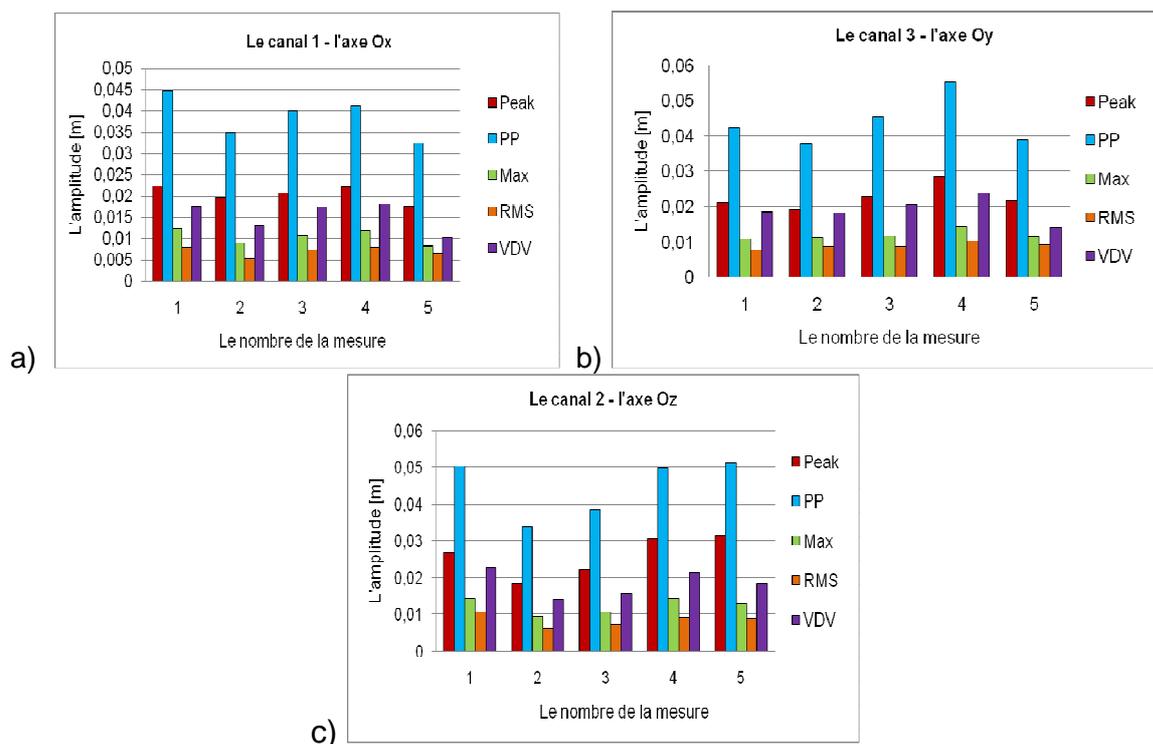
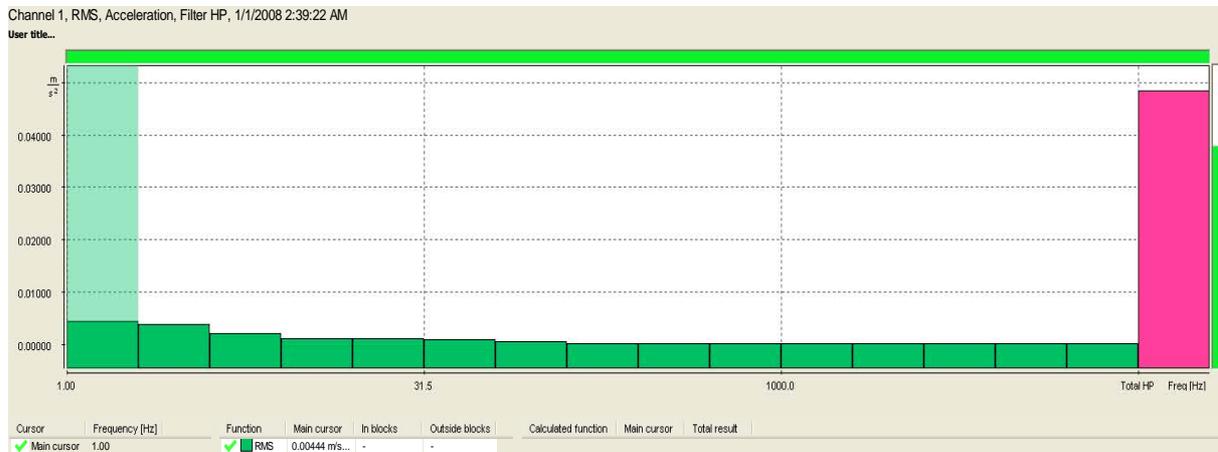
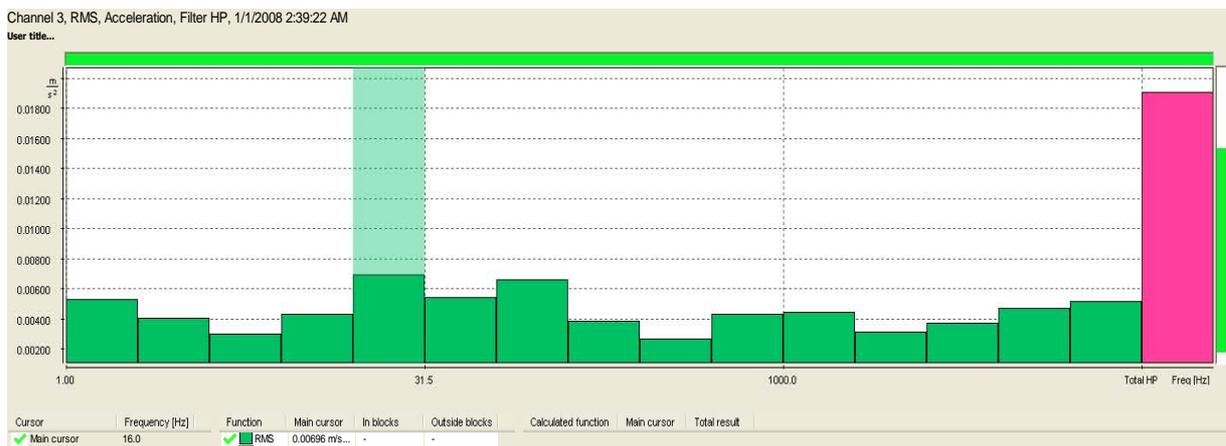


Fig. 6.14. Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [m/s<sup>2</sup>] et VDV [m/s<sup>2</sup>] correspondantes aux mesures effectuées au fonctionnement en charge de la machine-outil d'après les axes Ox, Oy et Oz

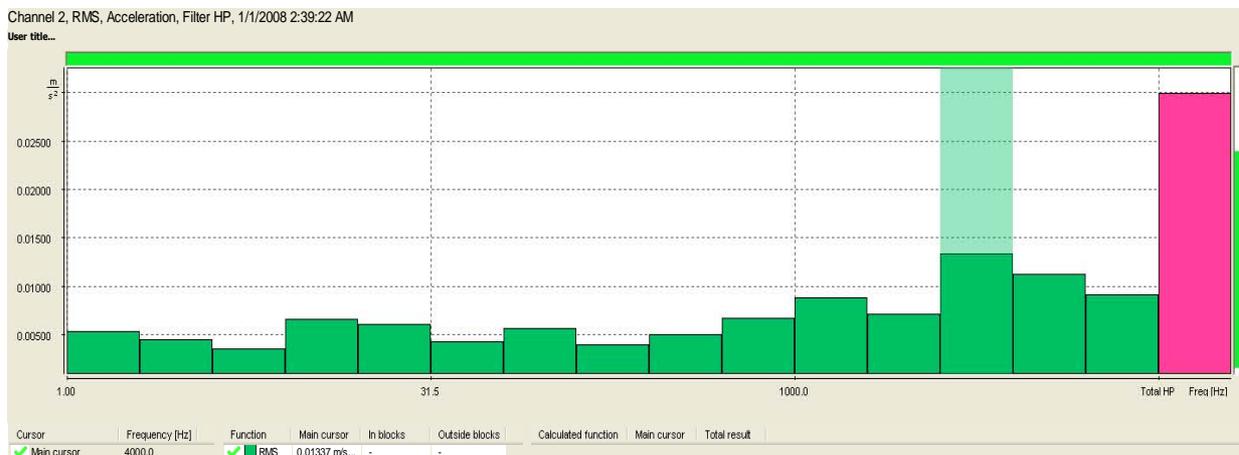
Dans les Figures 6.15., 6.16. et 6.17., sont donnés les spectres d'accélération pour les mesures effectuées sur la main, au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux du vibromètre SVAN 958.



**Fig. 6.15.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. 6.16.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



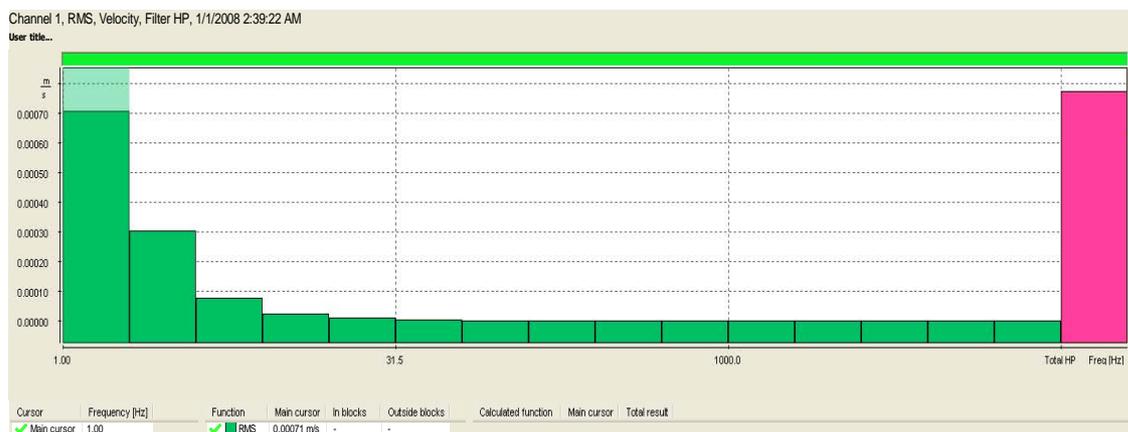
**Fig. 6.17.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Ox est de  $0,00444 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

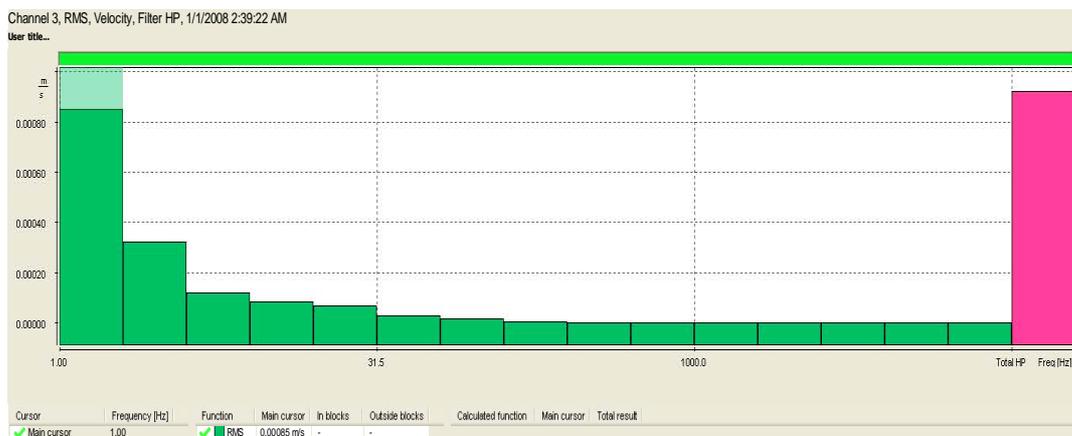
La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oy est de  $0,00696 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 16 Hz.

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oz est de  $0,01337 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 4000 Hz.

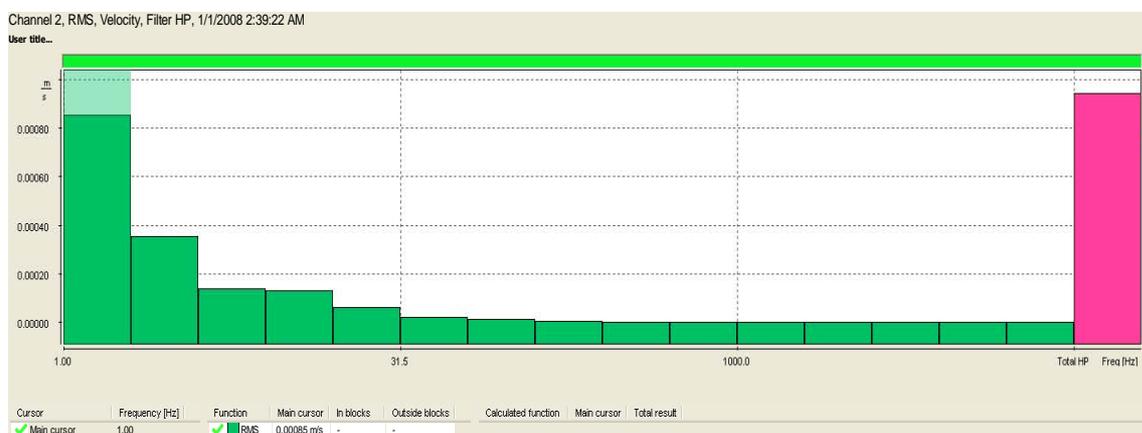
Dans les Figures 6.18., 6.19. et 6.20. sont données les spectres de vitesses pour les mesures effectuées sur la main, au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min d'après les axes Ox, Oy et Oz des trois canaux du l'appareil. Les vitesses ont été obtenues par l'intégration des accélérations.



**Fig. 6.18.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. 6.19.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil, avec la vitesse de 800 rot/min



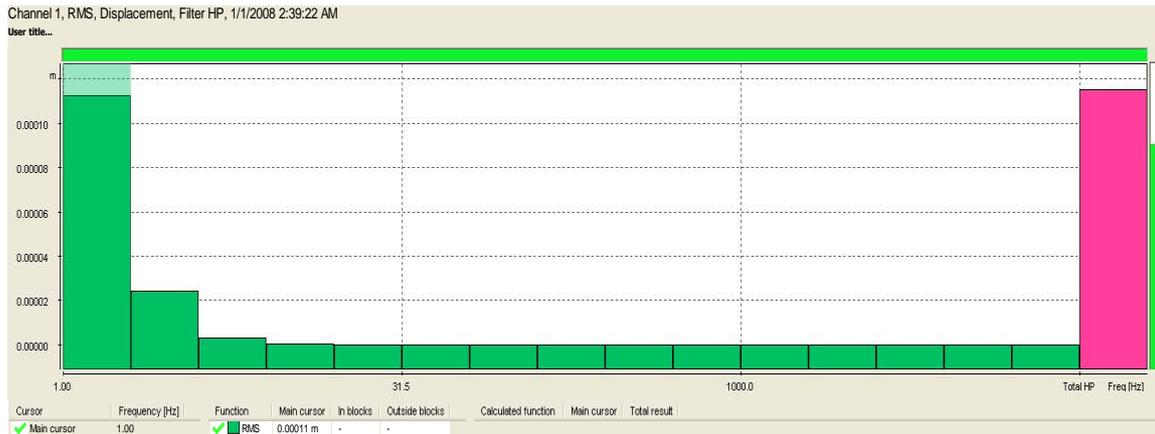
**Fig. 6.20.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Ox est de 0,00071 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

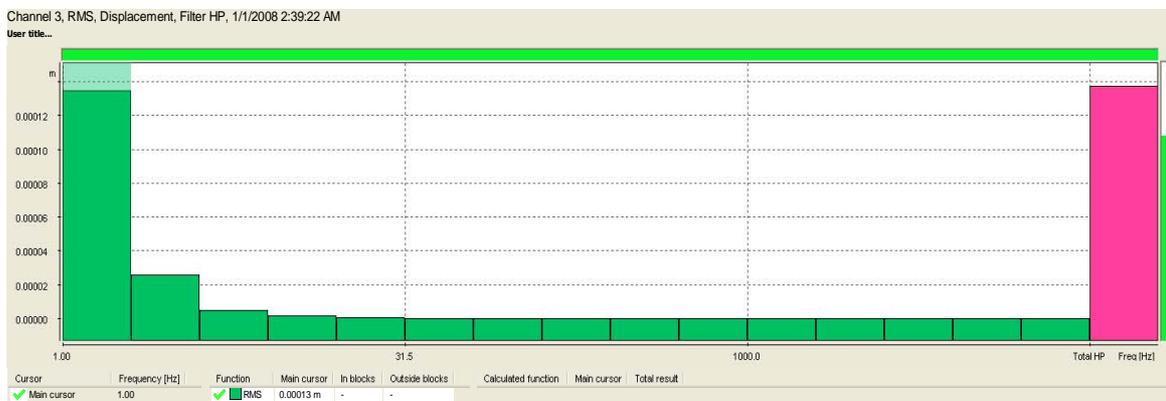
La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oy est de 0,00085 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oz est de 0,00085 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

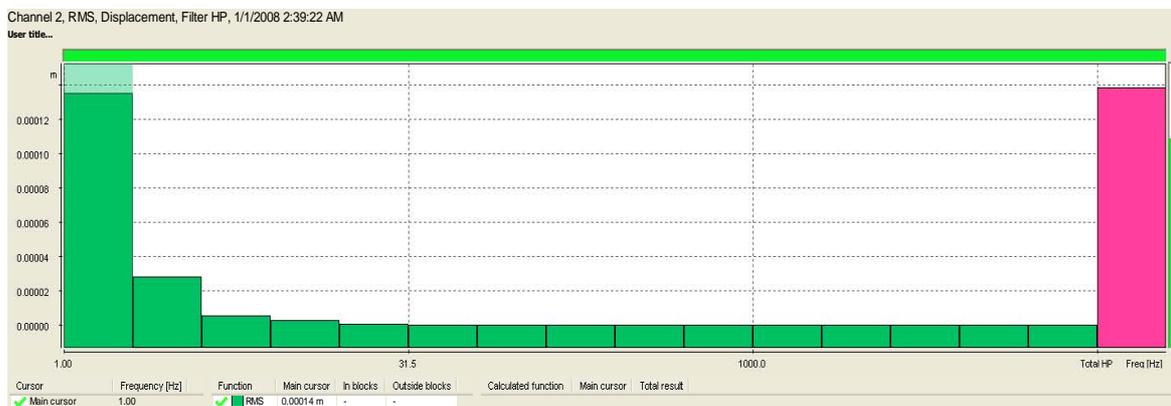
Dans les Figures 6.21., 6.22. et 6.23. sont données les spectres des déplacements pour les mesures effectuées sur la main, au fonctionnement en charge de la machine-outil, avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz , des trois canaux de l'appareil. Les vitesses ont été obtenues par l'intégration d'accéléérations.



**Fig. 6.21.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. 6.22.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. 6.23.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Ox est de 0,00011 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oy est de 0,00013 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oz est de 0,00014 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

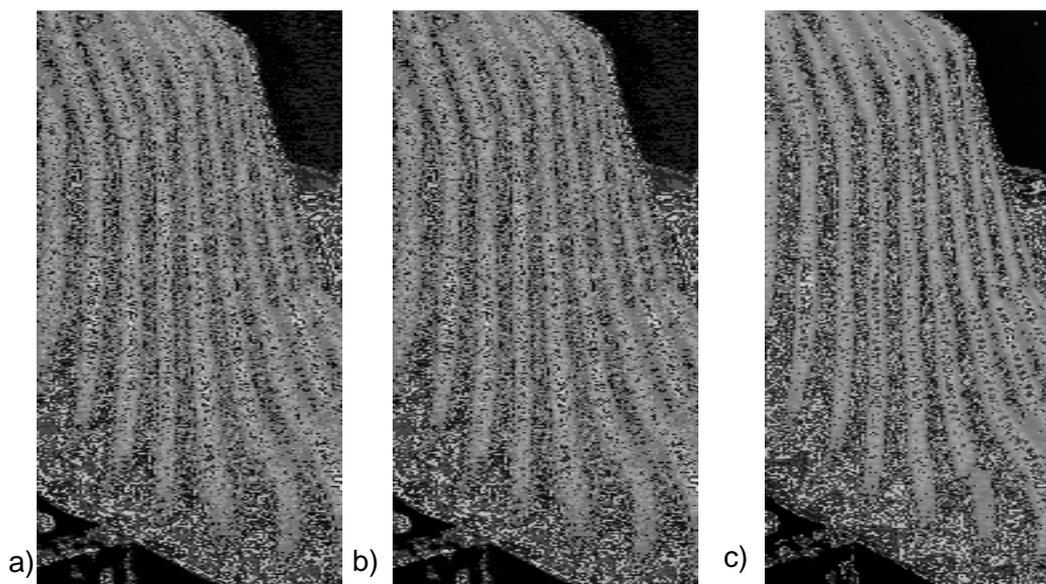
## 6.4. La mesure des vibrations sur le tour par la méthode Moiré de projection

### 6.4.1. La mesure des vibrations sur la main au fonctionnement au ralenti et en charge sur le tour SNA 500x1000 par la méthode Moiré de projection

La mesure des vibrations a été effectuée sur le tour SNA 500x1000 au fonctionnement au ralenti et en charge de l'axe principal de la machine-outil avec la vitesse de rotation de 800 rot/min. Les mesures ont été effectuées d'après la direction Oy. À l'aide d'un projecteur (Fig. 5.22.) on éclaire la partie de la main, sur laquelle on a effectué les mesures, pour pouvoir visualiser plus clairement les franges Moiré. On a projeté sur la main les trois grilles de projection déphasées entre elles de  $120^\circ$  (Fig. 5.24) pour pouvoir mesurer l'amplitude des vibrations. Le système d'acquisition de données a été présenté en Figure 5.23.

En vue du traitement des données on a acquis trois images déphasées dans l'état statique avec le tour arrêté (Fig. 6.24. a, b, et c), et trois images avec le tour fonctionnant au ralenti (Fig. 6.25. a, b, et c) déphasées également entre elles de  $120^\circ$ . La caméra CCD utilisée est montrée dans la Figure 5.21.

L'acquisition des images est commandée dans la fenêtre d'acquisition de l'image (Fig. 5.25.) du logiciel "Projet". L'acquisition de l'image a été réalisée manuellement, la clarté de la caméra doit être réglée au seuil de la sélection des nuances de gris 25 et pour le calcul du masque on prend la valeur 0. La zone de sauvegarde a été choisie pour dX 170 et pour dY 207.



**Fig. 6.24.** Les images de référence sur la main avec le tour arrêté, pour l'étalonnage, avec un déphasage l'une par rapport à l'autre de: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$

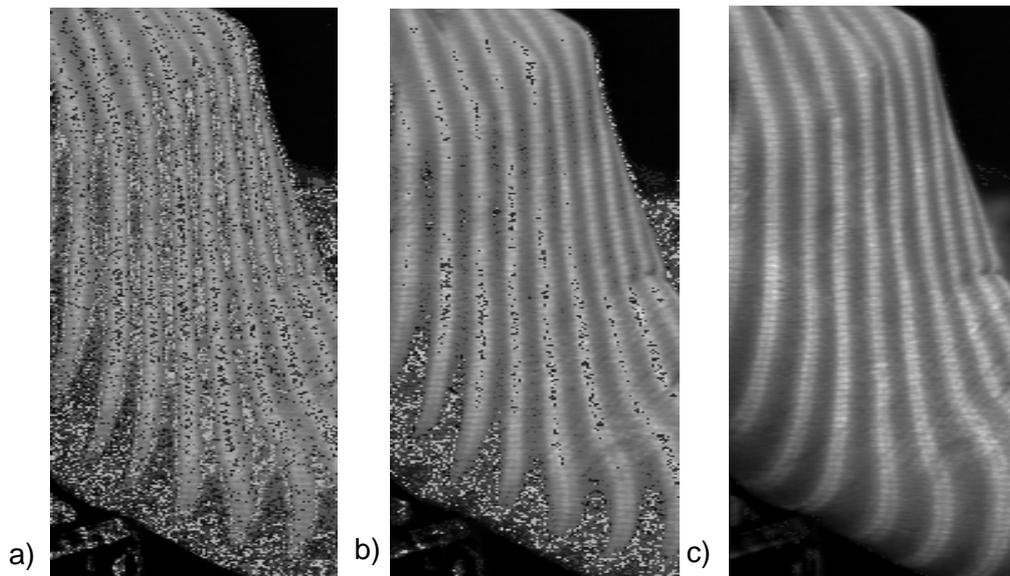


Fig. 6.25. Les images acquises sur la main avec le tour au fonctionnement au ralenti, avec un déphasage l'une par rapport à l'autre de: a) 0°, b) 120° et c) 240°

DEPHASAGES ENTRE IMAGES			
<input type="checkbox"/> Calcul des décalages de phase	Référence	Déformée	
Décalage entre l'image n°1 et n°2=	119.109	122.329	degrés
Décalage entre l'image n°1 et n°3=	-124.925	-120.738	degrés
DEFINITION DE LA ZONE TRAITEE <span style="float:right">SOURIS</span>			
Position horizontale =	0 pixels	Position verticale =	0 pixels
Taille horizontale =	113 pixels	Taille verticale =	351 pixels
CARACTERISTIQUES DU MASQUE			
Seuil du masque =	25 Niv. Gris	Seuil discontinuité =	1
POINT DE REFERENCE, PHASE INITIALE = 0 degrés			
Position horizontale =	22 pixels	Position verticale =	253 pixels <span style="float:right">SOURIS</span>
CARACTERISTIQUES DU MONTAGE OPTIQUE			
Distance: projecteur-épreuve =	1340 mm	Pas du réseau =	0.5 mm
caméra-projecteur =	860 mm	Focale =	100 mm
caméra-épreuve =	820 mm	Grandissement (mm/pixel) =	0.3
Hauteur / largeur des pixels =		0.73	<span style="float:right">Cancel</span> <span style="float:right">OK</span>

Fig. 6.26. La fenêtre des paramètres avec le déphasage calculé

Dans la Figure 6.26. est montrée l'interface graphique du traitement des données acquises, qui contient toutes les données utilisées pour le calcul des vibrations et des déplacements.

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale, de 113 pixels et sur la verticale, de 351 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le seuil de gris du masque de 25 et pour le seuil de discontinuité de 1.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 22 pixels et sur la verticale est de 253 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont:

- Les distances entre: – Projecteur – Objet = 1340 mm;

- Caméra CCD – Projecteur = 860 mm;
- Caméra CCD – Objet = 820 mm.
- Le pas du réseau de lignes est de 0,5 mm.
- La distance focale est de 100 mm.

Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0,3 mm/pixel.

Les distances entre le projecteur et l'objet, la caméra CCD et le projecteur et la caméra CCD et l'objet ont été mesurées avec un mètre. Le rapport entre la hauteur et la largeur des pixels est fourni par le producteur de la caméra, il a la valeur 0,73.

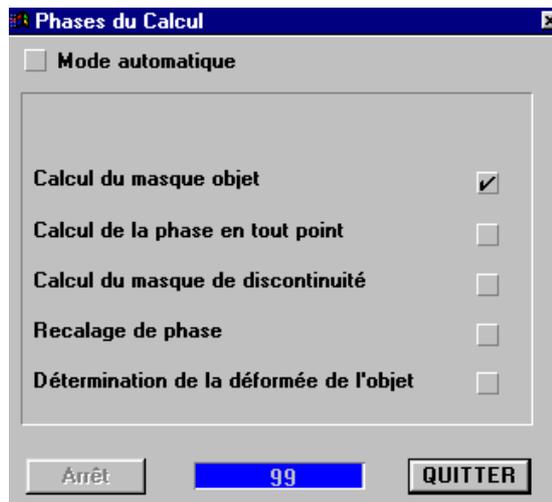


Fig. 6.27. La fenêtre avec les phases de calcul

Dans la Figure 6.27. est montrée l'interface graphique pour le calcul du déphasage et des déplacements (vibrations de la peau) sur l'axe perpendiculaire sur la main dans l'ordre de leur succession. La création du relief a été effectuée en cinq pas.

Le premier pas a été la recherche de la forme de la pièce, dans le deuxième pas on a calculé la phase dans tous les points, qui a été suivie par le troisième, celui du calcul des points discontinus. Le quatrième pas change la phase à partir de celle initiale et dans le dernier pas on détermine la déformation ou le relief de la pièce.

Dans la Figure 6.28 est donnée l'image en 3D avec le logiciel "Surfer".

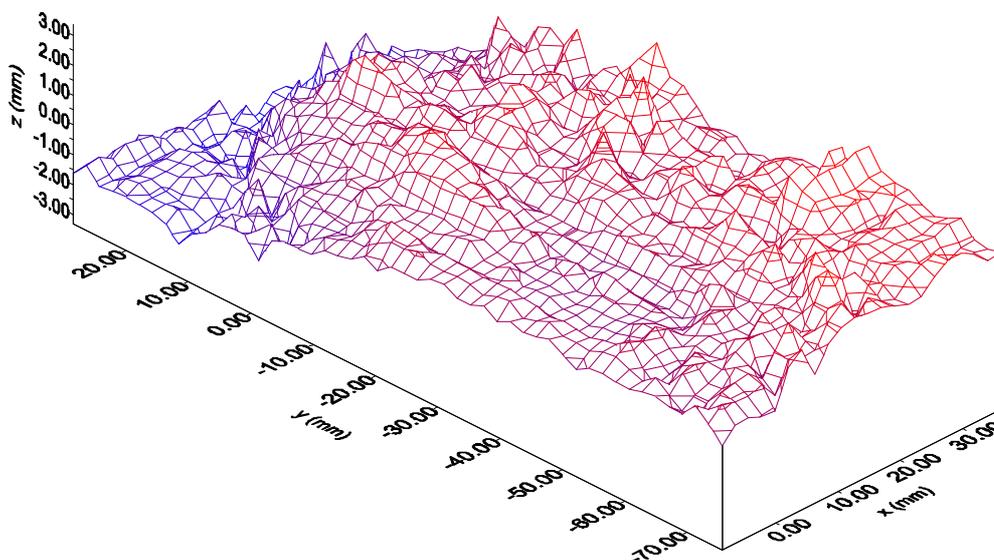


Fig. 6.28. L'image en 3D de la déformation

La Figure 6.29. donne la valeur de la déformation qui est de  $7.66 \times 10^{-1}$  mm.

## 6.5. La mesure des vibrations sur la machine à percer verticale avec le vibromètre SVAN 958

### 6.5.1. La mesure des vibrations sur la main au fonctionnement au ralenti et en charge de la machine à percer verticale Mx750, avec le vibromètre SVAN 958

Pour l'acquisition et le traitement des données on a procédé de la même manière que pour les mesures effectuées sur le tour.

Les mesures ont été effectuées à l'Université Technique de Cluj-Napoca sur une machine à percer verticale de type Mx750, avec les caractéristiques suivantes: puissance du moteur  $P=3$  KW, pour les vitesses de 180 rot/min et 335 rot/min.

Les conditions dans lesquelles ont été réalisées les mesures sont les suivantes:

- L'opérateur humain a tenu la paume gauche sur la colonne fixe de la machine à percer vertical;
- Les mesures ont été effectuées à 10h du matin;
- Pendant les mesures on a percé une pièce cylindrique avec le diamètre de 60 mm, le perçage a été réalisé avec une vitesse d'avance  $a=0,1$  mm/rot et  $a=0,16$  mm/rot avec une perceuse de  $\varnothing$  14 mm.
- Le vibromètre a été configuré pour mesurer les vibrations mécaniques d'après les trois directions  $O_x$ ,  $O_y$  et  $O_z$ , du système anatomique, sur les trois canaux des quatre possibles de l'appareil et on a sélectionné pour la mesure un filtre correspondant à la transmission des vibration du système main-bras (Annexe A3).

Les valeurs qui ont résulté suite aux mesures sur la main avec le vibromètre SVAN 958 sont données dans les Tableaux 6.7., 6.8. et 6.9. Les valeurs sont obtenues suite aux mesures sur la machine à percer verticale fonctionnant au ralenti avec la vitesse de rotation de 180 rot/min et avec la vitesse d'avance  $a=0,1$  mm/rot d'après les directions  $O_x$ ,  $O_y$  et  $O_z$ , des trois canaux de l'appareil. Les résultats des mesures effectuées sont données pour chaque canal (l'axe  $O_x$  – le canal 1, l'axe  $O_y$  – le canal 3 et l'axe  $O_z$  – le canal 2).

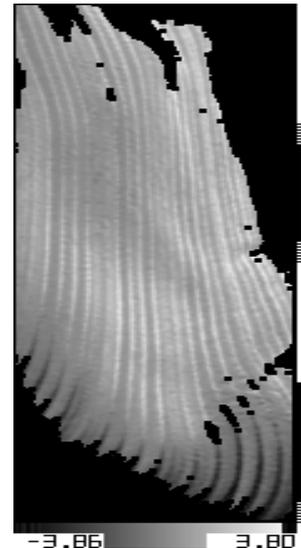


Fig. 6.29. La valeur de la déformation

Tableau 6.7.

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main pour les mesures d'après l'axe  $O_x$

Canal 1 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.01948	0.03771	0.01090	0.00745	0.01576
2	0.02286	0.03940	0.00956	0.00666	0.01598
3	0.02259	0.03656	0.00835	0.00617	0.01457
4	0.02208	0.04093	0.01100	0.00704	0.01540

Tableau 6.8.

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main pour les mesures d'après l'axe Oy

Canal 3 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.01780	0.03544	0.00852	0.00655	0.01495
2	0.02928	0.05389	0.01355	0.00879	0.02116
3	0.02521	0.04261	0.01140	0.00769	0.01791
4	0.02627	0.04207	0.01125	0.00829	0.01679

Tableau 6.9.

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main pour les mesures d'après l'axe Oz

Canalul 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
Nr.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02429	0.04164	0.01125	0.00908	0.02018
2	0.01764	0.03420	0.01128	0.00840	0.01756
3	0.03361	0.05882	0.01587	0.00979	0.02391
4	0.01683	0.03361	0.00862	0.00671	0.01303

Les données centralisées dans les Tableaux 6.7., 6.8. et 6.9. sont représentées dans la Figure 6.30. a, b et c, selon les spécifications de chaque représentation.

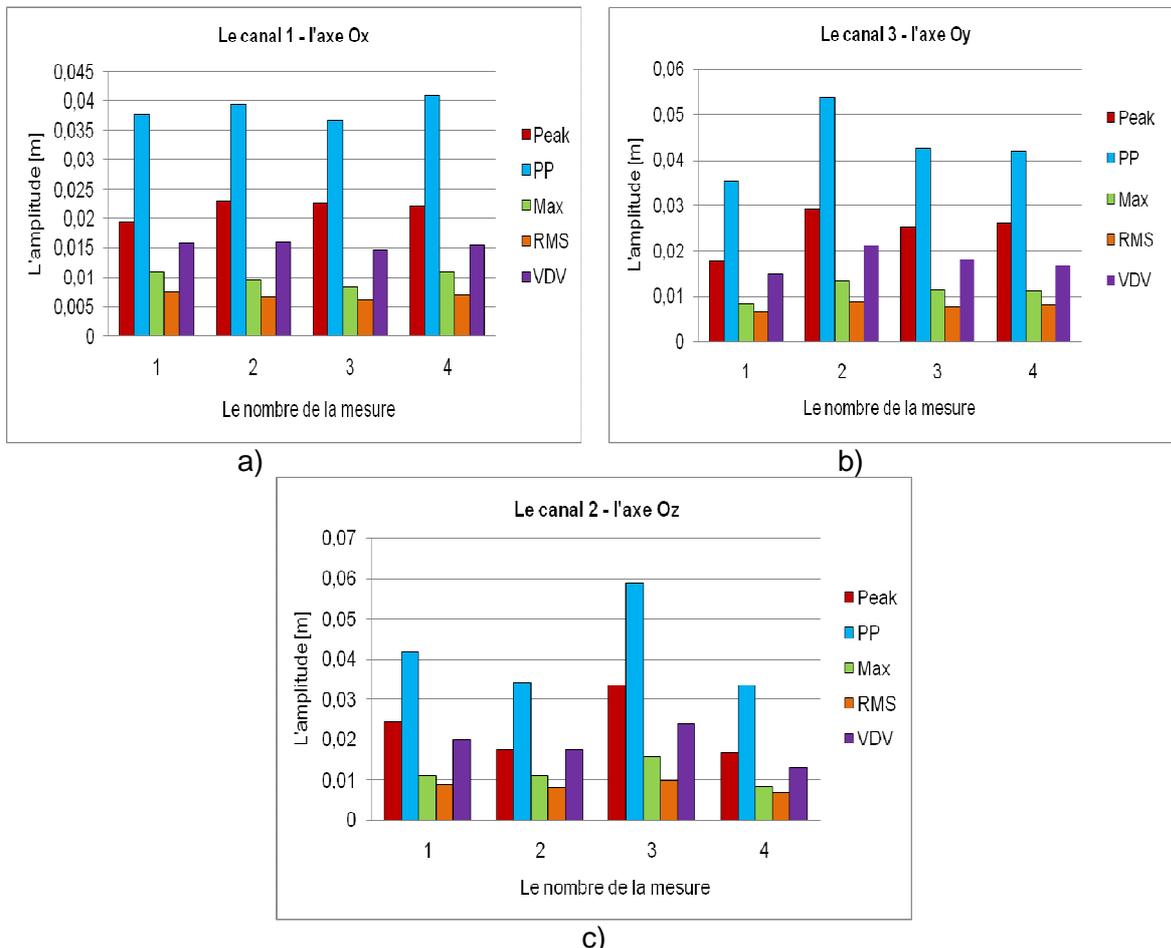
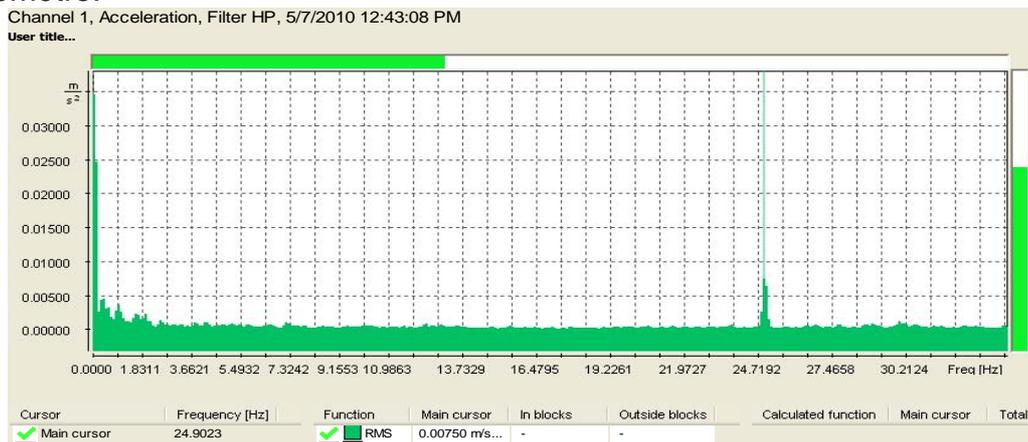


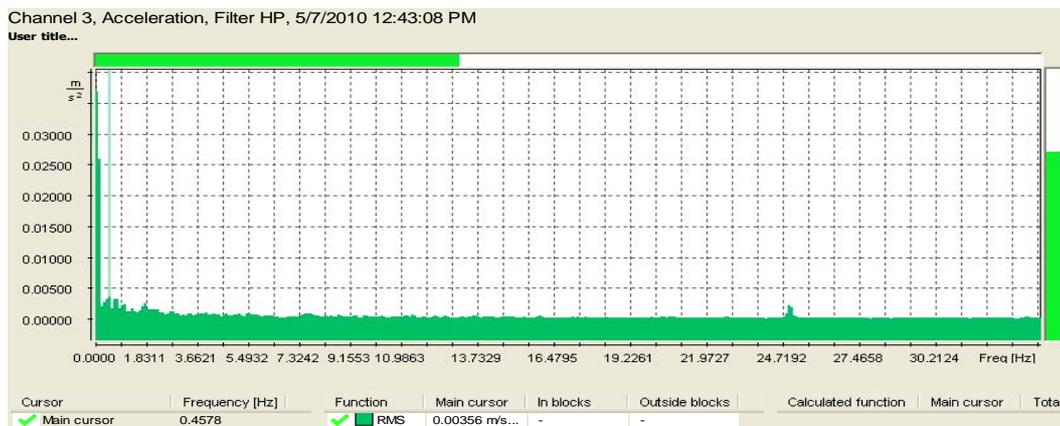
Fig. 6.30. Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [m/s<sup>2</sup>] et VDV [m/s<sup>2</sup>] correspondantes aux mesures effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les axes Ox, Oy et Oz

Si on compare les résultats d'après les trois directions de propagation Ox, Oy et Oz on peut observer dans les Figures 6.30. a, b et c, réalisées à l'aide des valeurs dans des Tableaux 6.7., 6.8. et 6.9., que d'après la direction Oz on a la plus grande amplitude, c'est-à-dire les vibrations transmises se ressentent le plus fort sur la direction Oz, au fonctionnement au ralenti de la machine-outil.

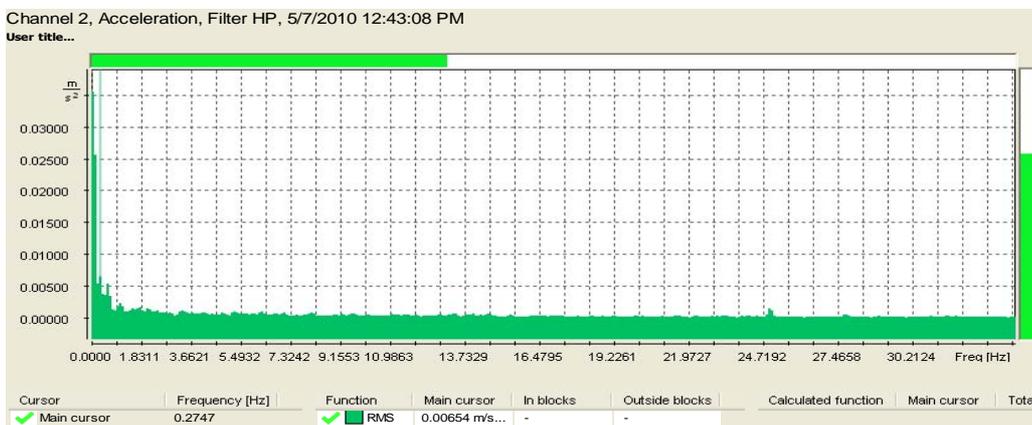
Dans les Figures 6.31., 6.32. et 6.33. sont donnés les spectres d'accélération pour les mesures effectuées sur la main, au fonctionnement au ralenti de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 180 rot/min, avec la vitesse d'avance  $a=0,1$  mm/rot, d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux du vibromètre.



**Fig. 6.31.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min



**Fig. 6.32.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min



**Fig. 6.33.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Ox est de  $0,00750 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $24,9023 \text{ Hz}$ .

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oy est de  $0,00356 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $0,4578 \text{ Hz}$ .

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oz est de  $0,00654 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $0,2747 \text{ Hz}$ .

Dans les Figures 6.34., 6.35. et 6.36., sont montrés les spectres des vitesses pour les mesures effectuées sur la main au fonctionnement au ralenti de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de  $180 \text{ rot/min}$  et la vitesse d'avance  $a=0,1 \text{ mm/rot}$ , avec les enregistrements d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux du vibromètre.

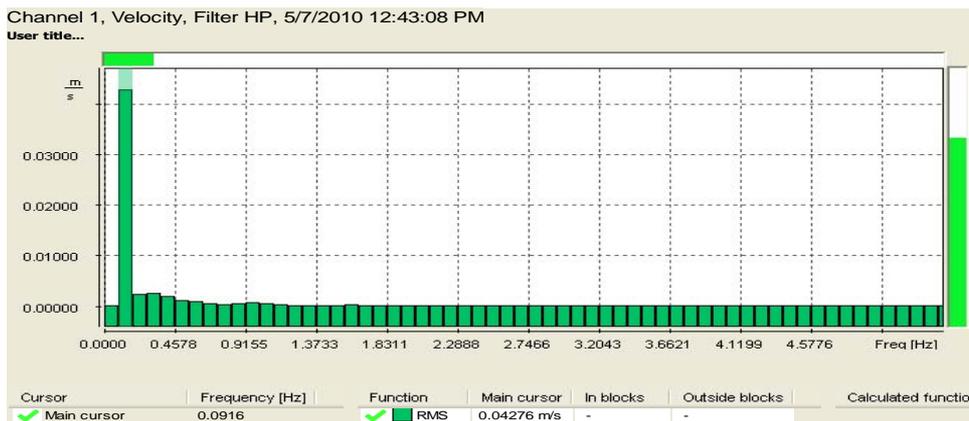


Fig. 6.34. Le spectre des vitesses d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de  $180 \text{ rot/min}$

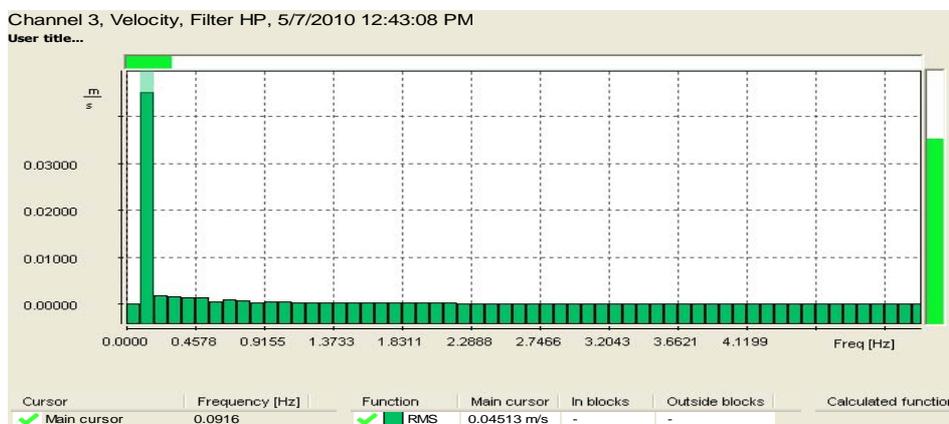


Fig. 6.35. Le spectre des vitesses d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de  $180 \text{ rot/min}$

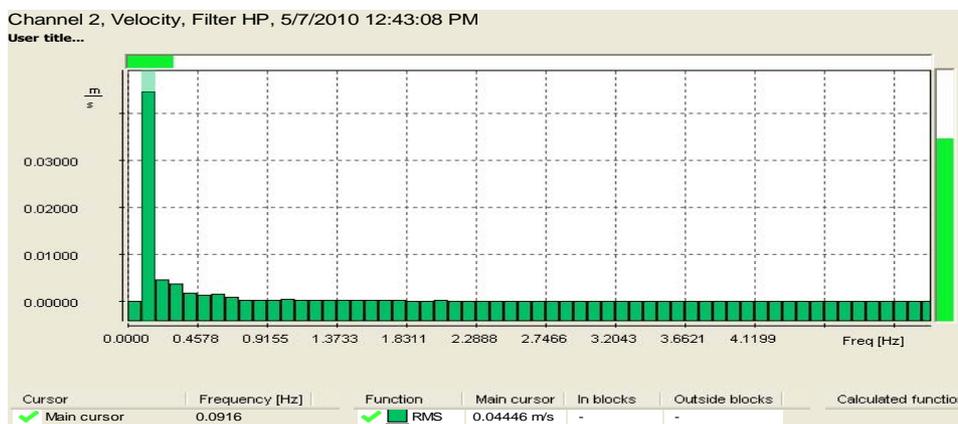


Fig. 6.36. Le spectre des vitesses d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de  $180 \text{ rot/min}$

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Ox est de  $0,04276 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $0,0916 \text{ Hz}$ .

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oy est de  $0,04513 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $0,0916 \text{ Hz}$ .

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oz est de  $0,04446 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $0,0916 \text{ Hz}$ .

Dans les Figures 6.37., 6.38. et 6.39. sont montrés les spectres des déplacements pour la mesure effectuée sur la main, au fonctionnement au ralenti de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de  $180 \text{ rot/min}$  et la vitesse d'avance  $a=0,1 \text{ mm/rot}$ , pour les enregistrements d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.

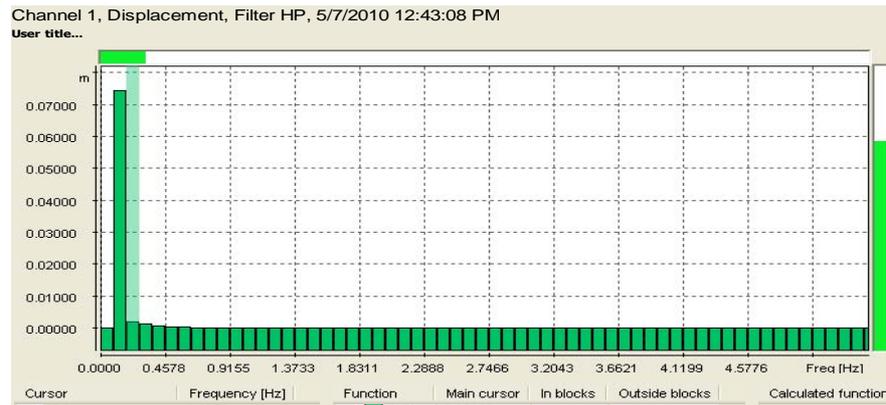


Fig. 6.37. Le spectre des déplacements d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de  $180 \text{ rot/min}$

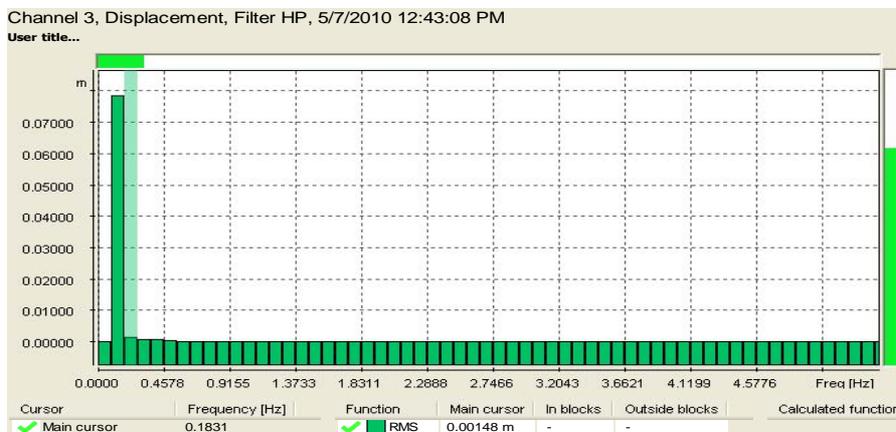


Fig. 6.38. Le spectre des déplacements d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de  $180 \text{ rot/min}$

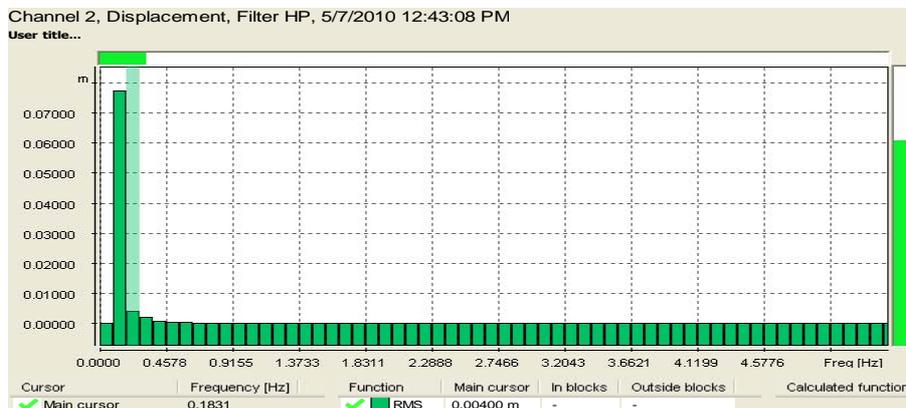


Fig. 6.39. Le spectre des déplacements d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de  $180 \text{ rot/min}$

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Ox est de 0,00198 m/s<sup>2</sup> et on la trouve à la fréquence de 0,1931 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oy est de 0,00148 m/s<sup>2</sup> et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oz est de 0,00400 m/s<sup>2</sup> et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

Les valeurs qui ont été obtenues suite aux mesures sur la main avec le vibromètre SVAN 958 sont données dans les Tableaux 6.10., 6.11. et 6.12. Les valeurs sont obtenues par l'effectuation des mesures sur la machine à percer vertical, au fonctionnement en charge à la vitesse de rotation de 180 rot/min et la vitesse d'avance a=0,16 mm/rot, d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre. Les résultats des mesures effectuées sont donnés pour chaque canal (l'axe Ox – le canal 1, l'axe Oy – le canal 3 et l'axe Oz – le canal 2).

**Tableau 6.10.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main pour les mesures d'après l'axe Ox

Canal 1 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02486	0.04651	0.01247	0.00800	0.01866
2	0.02639	0.04814	0.01390	0.00854	0.02032
3	0.02216	0.03967	0.01017	0.00671	0.01601
4	0.01498	0.02786	0.00760	0.00646	0.01039

**Tableau 6.11.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main pour les mesures d'après l'axe Oy

Canal 3 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02244	0.04335	0.01127	0.00769	0.01754
2	0.02475	0.04618	0.01041	0.00758	0.01820
3	0.02460	0.04792	0.01303	0.01015	0.02272
4	0.02597	0.04592	0.01226	0.00877	0.01660

**Tableau 6.12.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur la main pour les mesures d'après l'axe Oz

Canal 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02106	0.04116	0.01139	0.00788	0.01656
2	0.02087	0.03833	0.01169	0.00731	0.01702
3	0.02058	0.03954	0.01001	0.00667	0.01531
4	0.01460	0.02874	0.00679	0.00577	0.00995

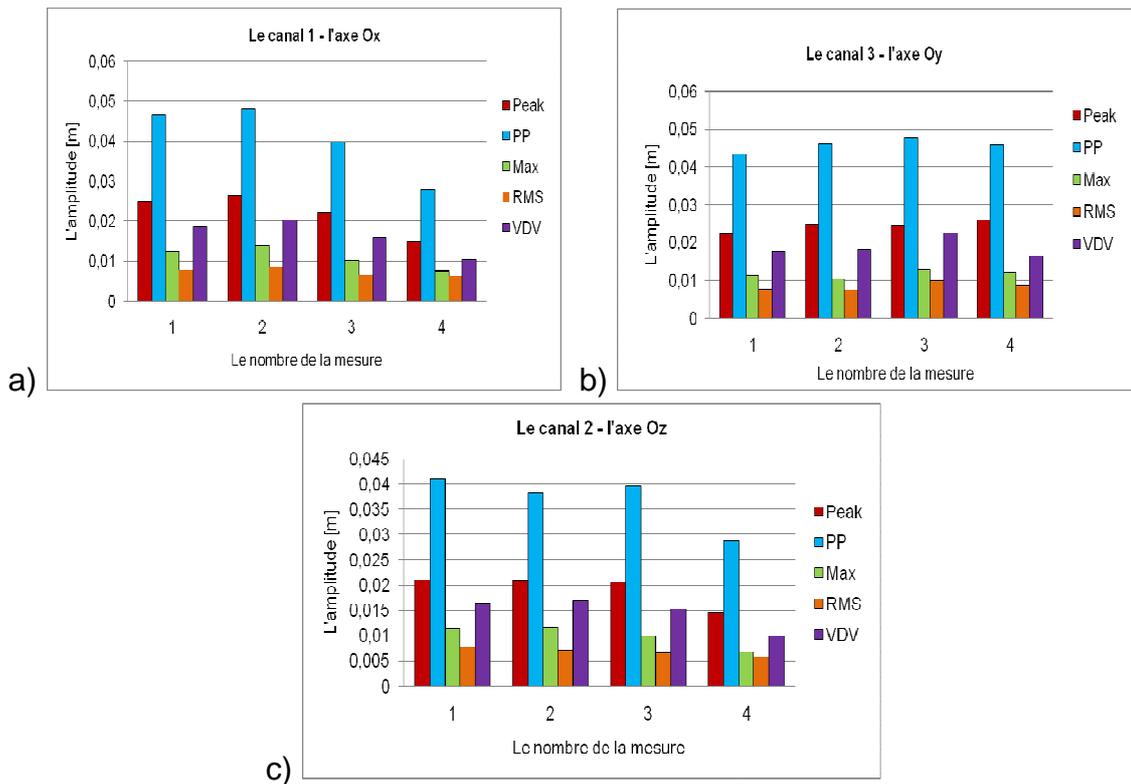


Fig. 6.40. Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [m/s<sup>2</sup>] et VDV [m/s<sup>2</sup>] correspondantes aux mesures effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les axes Ox, Oy et Oz

Si on compare les résultats d'après les trois directions de propagation Ox, Oy et Oz, on peut observer des Figures 6.40. a, b et c, réalisées à l'aide des valeurs des Tableaux 6.10., 6.11. et 6.12., que d'après la direction Ox on a la plus grande amplitude, c'est-à-dire les vibrations transmises se ressentent le plus fort d'après la direction Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil.

Dans les Figures 6.41., 6.42. et 6.43. sont montrés les spectres d'accélération pour la mesure effectuée sur la main, au fonctionnement en charge de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 180 rot/min, avec la vitesse d'avance a=0,16 mm/rot d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux du vibromètre.

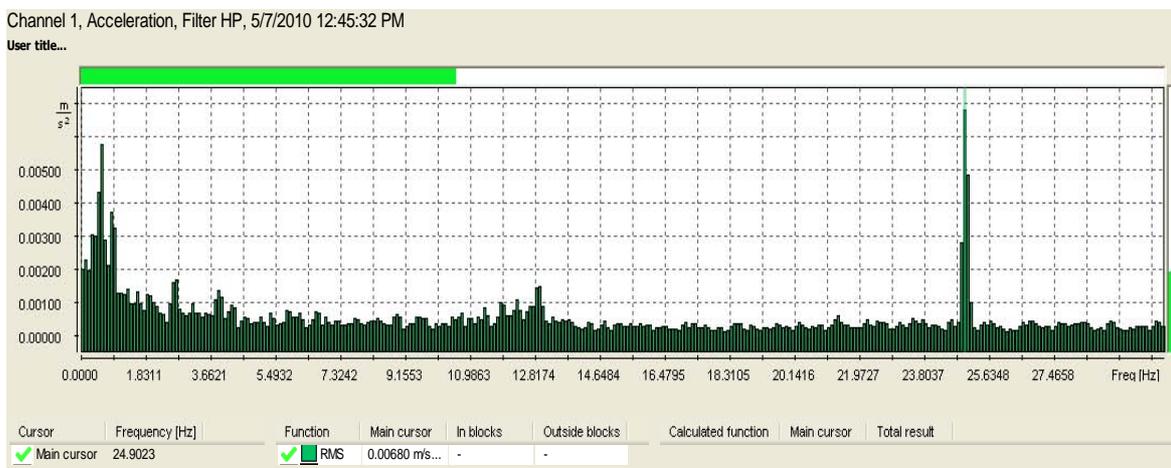
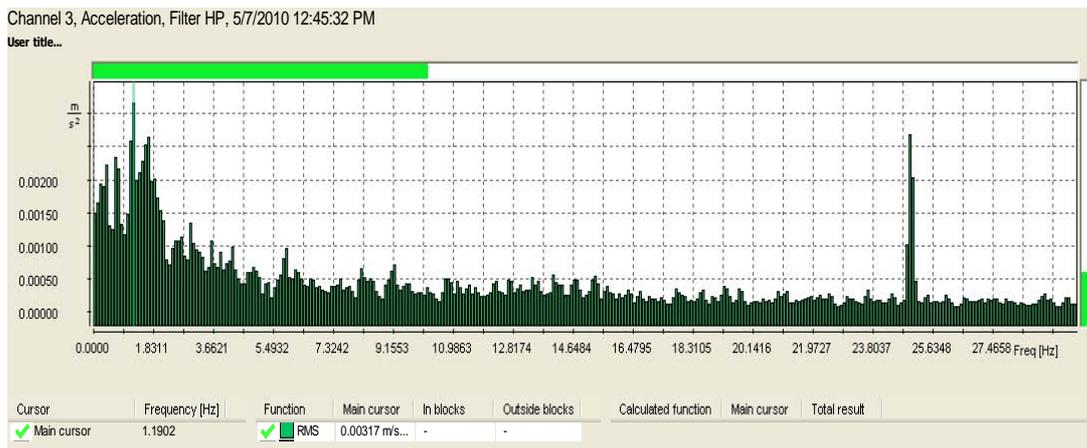
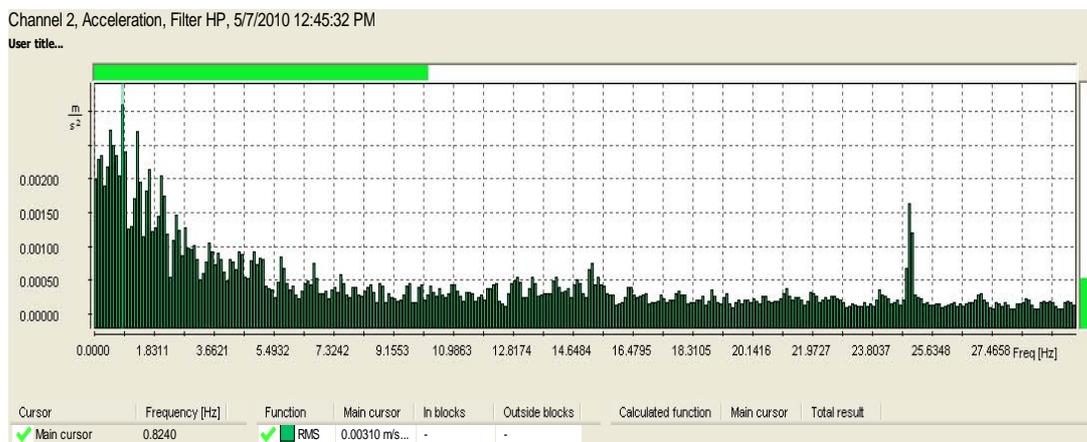


Fig. 6.41. Le spectre d'accélération d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Ox est de 0,00680 m/s<sup>2</sup> et on la trouve à la fréquence de 24,9023 Hz.



**Fig. 6.42.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min

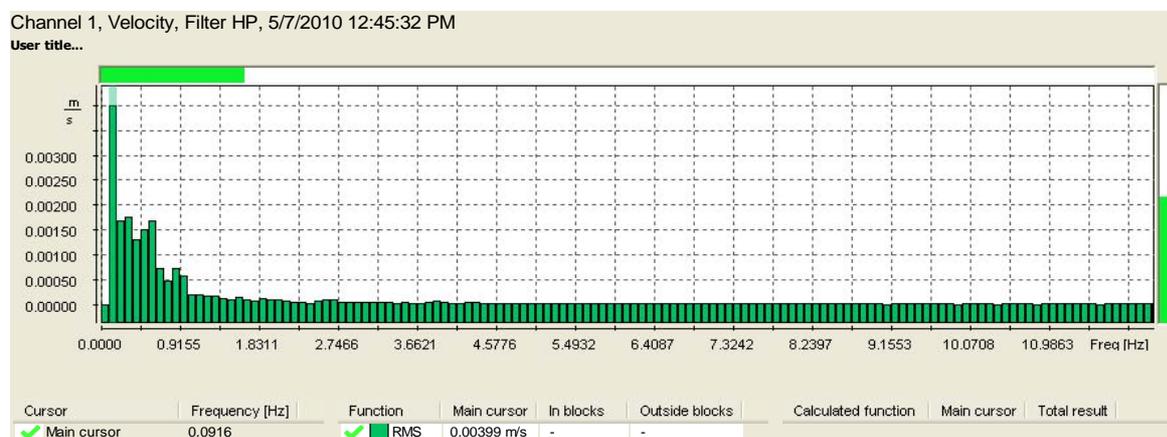


**Fig. 6.43.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min

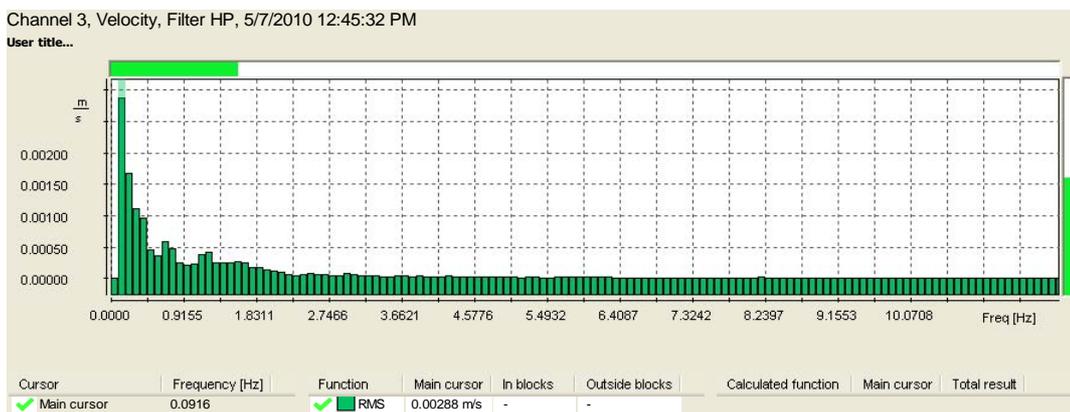
La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oy est de  $0,00317 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 1.1902 Hz.

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oz est de  $0,00310 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 0,8240 Hz.

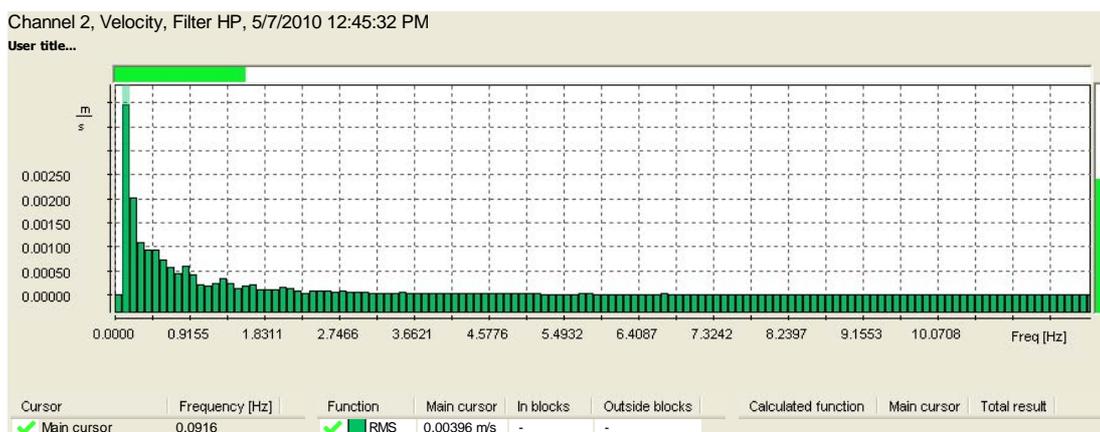
Dans les Figures 6.76., 6.77. et 6.78., sont donnés les spectres des vitesses pour les mesures effectuées sur la main, au fonctionnement en charge de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 180 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,16 \text{ mm/rot}$ , aux enregistrements d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.



**Fig. 6.44.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min



**Fig. 6.45.** Le spectre des vitesses d’après l’axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min



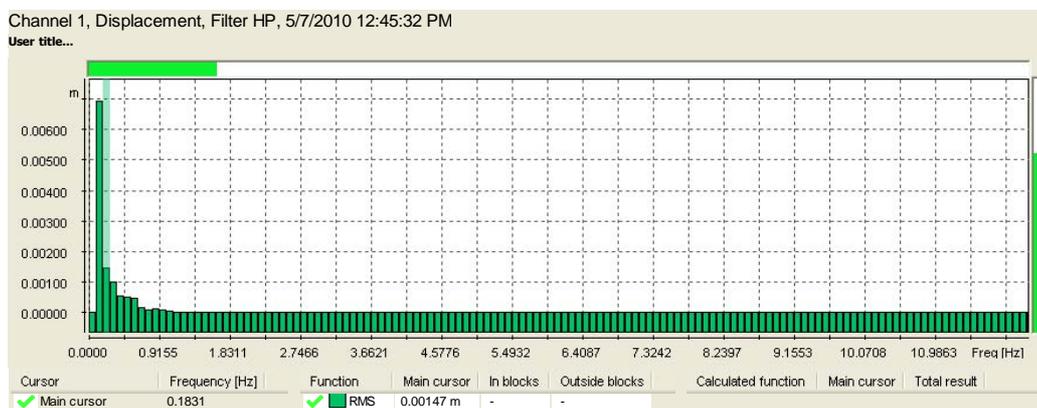
**Fig. 6.46.** Le spectre des vitesses d’après l’axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min

La valeur maximale de la vitesse d’après l’axe Ox est de 0,00399 m/s et on la trouve à la fréquence de 0,0916 Hz.

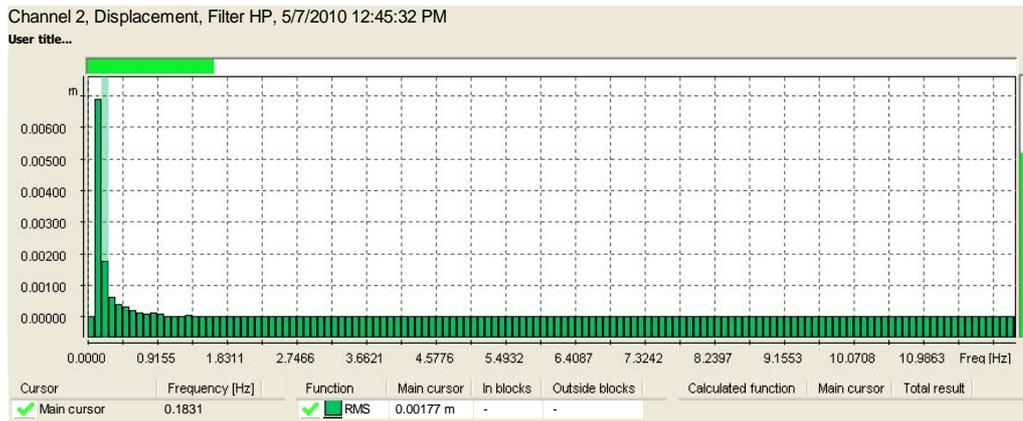
La valeur maximale de la vitesse d’après l’axe Oy est de 0,00288 m/s et on trouve à fréquence de 0,0916 Hz.

La valeur maximale de la vitesse d’après l’axe Oz est de 0,00396 m/s et on la trouve à la fréquence de 0,0916 Hz.

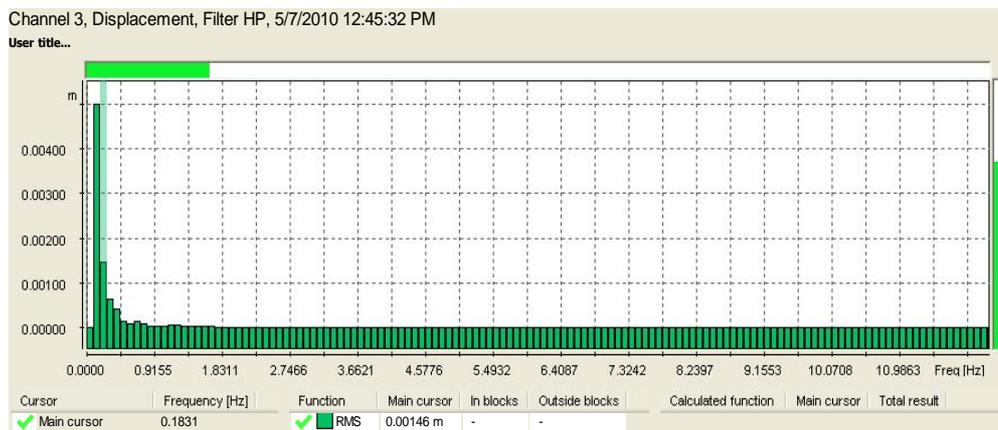
Dans les Figures 6.47., 6.48. et 6.49., sont montrés les spectres des déplacements pour les mesures effectuées sur la main, au fonctionnement en charge de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l’axe principal de 180 rot/min et la vitesse d’avance  $a=0,16$  mm/rot, avec les enregistrements d’après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.



**Fig. 6.47.** Le spectre des déplacements d’après l’axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min



**Fig. 6.48.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min



**Fig. 6.49** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 180 rot/min

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Ox est de 0,00147 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oy est de 0,00117 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oz est de 0,00146 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

## 6.6. La mesure des vibrations sur la machine à percer verticale par la méthode Moiré de projection

### 6.6.1. La mesure des vibrations sur la main au fonctionnement au ralenti et en charge de la machine à percer verticale MAx750 par la méthode Moiré de projection

La mesure des vibrations a été effectuée sur la machine à percer vertical au fonctionnement au ralenti et en charge avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 180 rot/min, d'après la direction Oy. À l'aide d'un projecteur (Fig. 5.22.) on éclaire la partie de la

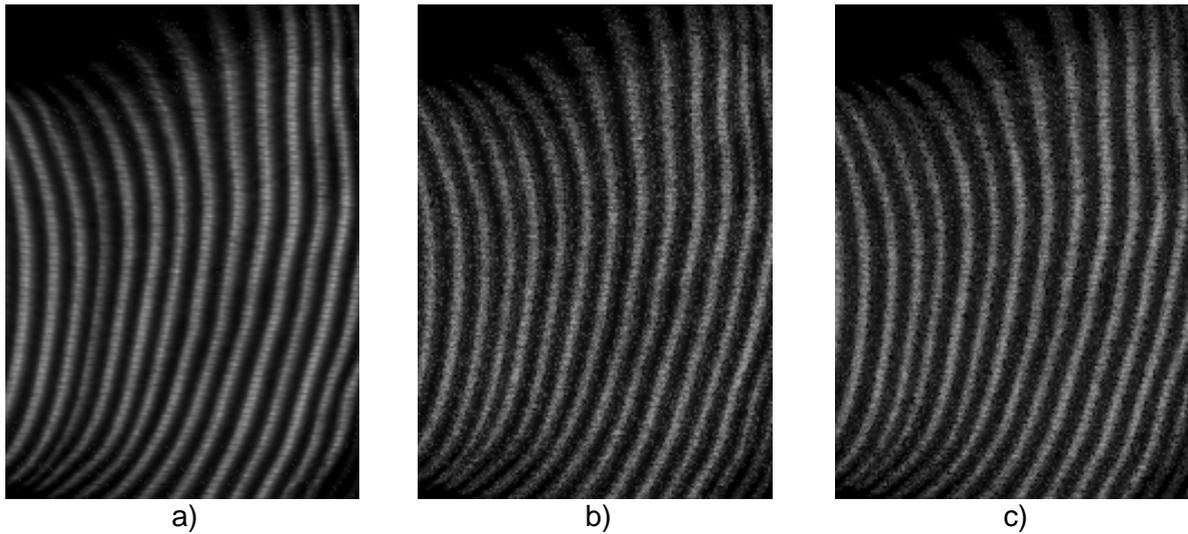


**Fig. 6.50.** La position de la main sur la machine à percer verticale

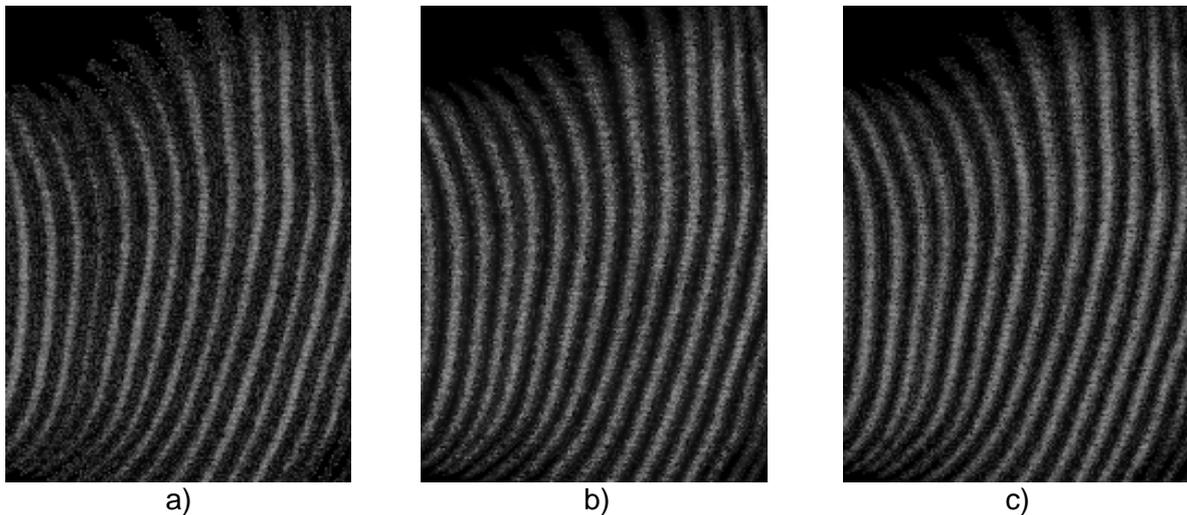
main sur laquelle on a effectué les mesures, pour pouvoir visualiser plus clairement les franges Moiré (Fig. 6.50.). On a projeté sur la main les trois grilles de projection déphasées entre elles de  $120^\circ$  (Fig. 5.24.) pour pouvoir mesurer l'amplitude des vibrations. Le système d'acquisition de données a été présenté en Figure 5.23.

En vue au traitement des données on a acquis trois images en déphasées dans l'état statique avec la machine à percer verticale arrêté (Fig. 6.50. a, b, et c) qui ont été déphasées entre elles avec  $120^\circ$  et trois images avec la machine à percer vertical au fonctionnement au ralenti (Fig. 6.51. a, b, et c), déphasées également entre elles avec  $120^\circ$ . La caméra CCD utilisée est montrée dans la Figure 5.21. (le Chapitre 5).

L'acquisition des images est commandée dans la fenêtre d'acquisition de l'image (Fig. 5.25.) du logiciel "Projet". L'acquisition des images a été réalisée manuellement.



**Fig. 6.51.** Les images de référence sur la main, avec la machine à percer arrêtée, pour l'étalonnage, déphasées entre elles de: a)  $0^\circ$ ; b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$



**Fig. 6.52.** Les images acquises sur la main, avec la machine à percer à la marche au ralenti déphasées entre elles de: a)  $0^\circ$ ; b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$

Dans la figure 6.53. est montrée l'interface graphique de traitement des données acquises, qui contient toutes les données utilisées pour le calcul des vibrations.

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale de 157 pixels et sur la verticale de 219 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le niveau de gris du seuil du masque de 15 et pour le seuil discontinu de 1.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 21 pixels et sur la verticale est de 114 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont:

- Les distances entre:
  - Projecteur – Objet = 990 mm;
  - Caméra CCD – Projecteur = 955 mm;
  - Caméra CCD – Objet = 890 mm.
- Le pas du réseau de lignes est de 0,5 mm.
- La distance focale est de 100 mm.

Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0,1856399 mm / pixel.

The screenshot shows a software window titled 'Modifier l'Application' with several sections of parameters:

- DEPHASAGES ENTRE IMAGES:**
  - Calcul des décalages de phase
  - Filtre de Hanning utilisé
  - Définition de la fenêtre analysée par FFT: 
    - Position horizontale = 2 pixels
    - Position verticale = 70 pixels
    - Taille horizontale = 32 pixels
    - Taille verticale = 128 pixels
- DEFINITION DE LA ZONE TRAITEE:** 
  - Position horizontale = 0 pixels
  - Position verticale = 0 pixels
  - Taille horizontale = 157 pixels
  - Taille verticale = 219 pixels
- CARACTERISTIQUES DU MASQUE:**
  - Seuil du masque = 15 Niv. Gris
  - Seuil discontinuité = 1
- POINT DE REFERENCE, PHASE INITIALE = 0 degrés:**
  - Position horizontale = 21 pixels
  - Position verticale = 114 pixels
  -
- CARACTERISTIQUES DU MONTAGE OPTIQUE:**
  - Distance:
    - projecteur-épreuve = 990 mm
    - caméra-projecteur = 955 mm
    - caméra-épreuve = 890 mm
  - Pas du réseau = 0.5 mm
  - Focale = 100 mm
  - Grandissement (mm/pixel) = 0.185639
  - Hauteur / largeur des pixels = 0.73

Fig. 6.53. La fenêtre des paramètres avec le déphasage calculé

On a lancé la fenêtre de calcul du déphasage et du déplacement (Fig. 6.27.) et, à la fin, on a obtenu le relief de la déformation en 3D (Fig. 6.54. a) et la valeur de la déformation de  $4,97 \times 10^{-1}$  mm (Fig. 6.54. b).

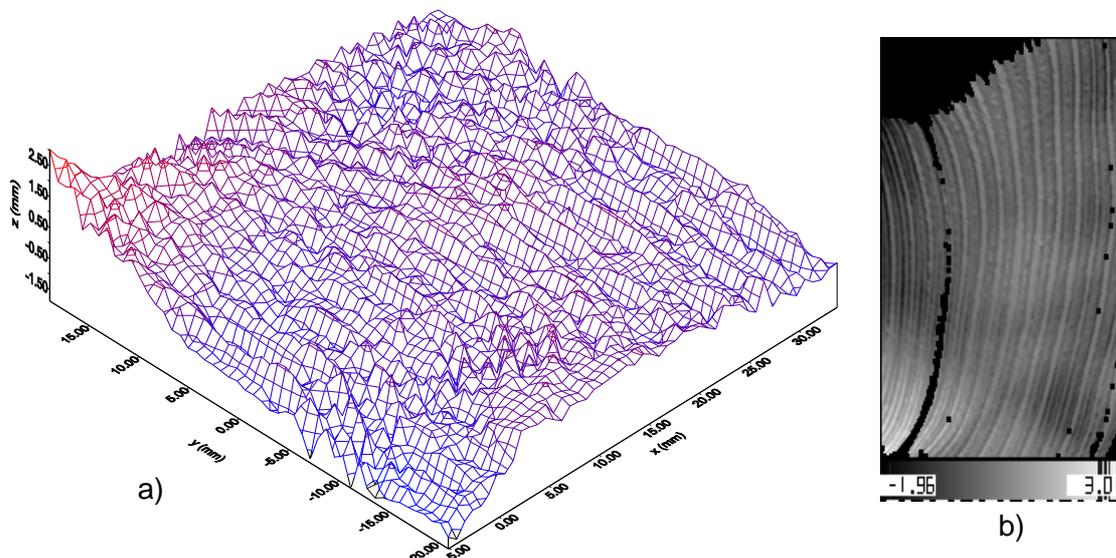
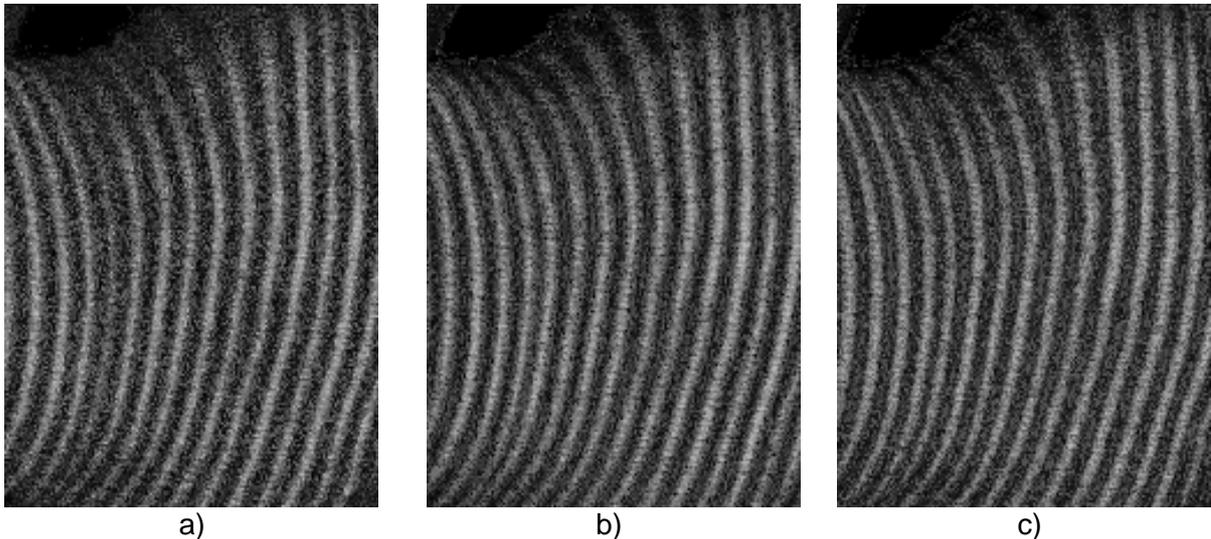


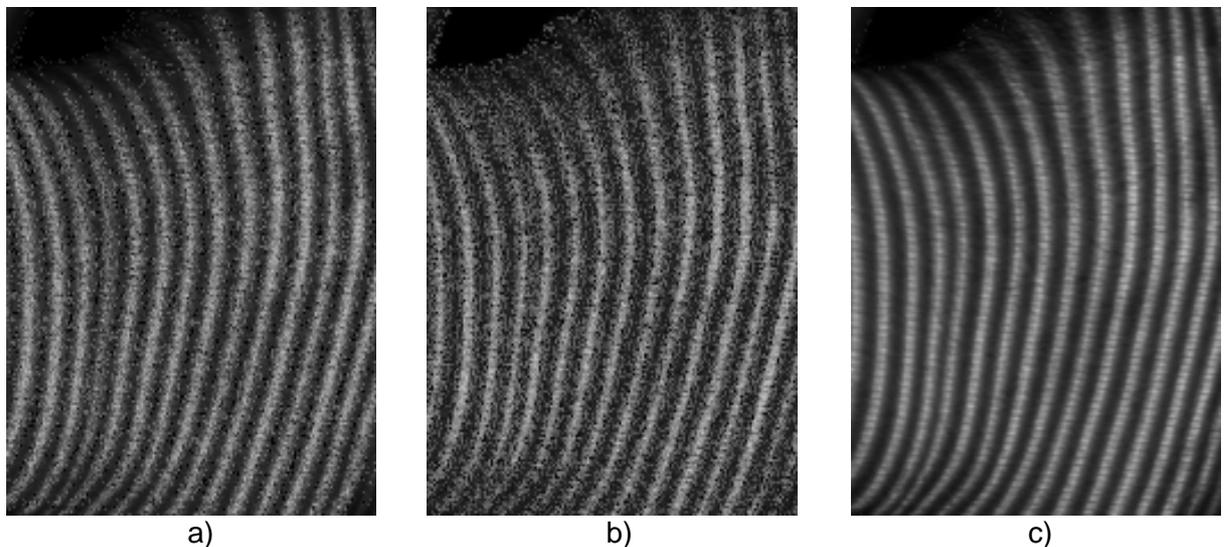
Fig. 6.54. a) L'image de la déformation en 3D; b) La valeur de la déformation

On a parcouru les mêmes pas pour la mesure des vibrations sur la main au fonctionnement en charge, qui ont été parcouru pour la mesure les vibrations sur la main au fonctionnement au ralenti.

Ont a acquis six images dont trois images en état statique (Fig. 6.55. a, b et c) qui ont été déphasées l'une par rapport à l'autre  $120^\circ$  et trois avec la machine à percer au fonctionnement en charge (Fig. 6.56. a, b, c) au perçage avec une perseuse de  $\varnothing 14$  mm dans une pièce cylindrique avec le diamètre de 60 mm, ayant la vitesse de rotation de 180 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,16$  mm/rot.



**Fig. 6.55.** Les images de référence sur la main, avec la machine à percer arrêtée, pour l'étalonnage, déphasées entre elles avec: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$



**Fig. 6.56.** Les images acquises de sur la main, avec la machine à percer au fonctionnement en charge, déphasées entre elles de: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$

Dans la Figure 6.57 est montrée l'interface graphique du traitement des données acquises qui contient tous les paramètres utilisés pour le calcul des vibrations.

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale de 165 pixels et sur la verticale de 206 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le niveau de gris, le seuil du masque de 10 et le seuil discontinu de 5.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 26 pixels et sur la verticale de 132 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont les mêmes que et pour la mesure au fonctionnement au ralenti.

Le pas du réseau de lignes est de 0,5 mm. La distance focale est de 100 mm.

Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0.203125 mm/pixels.

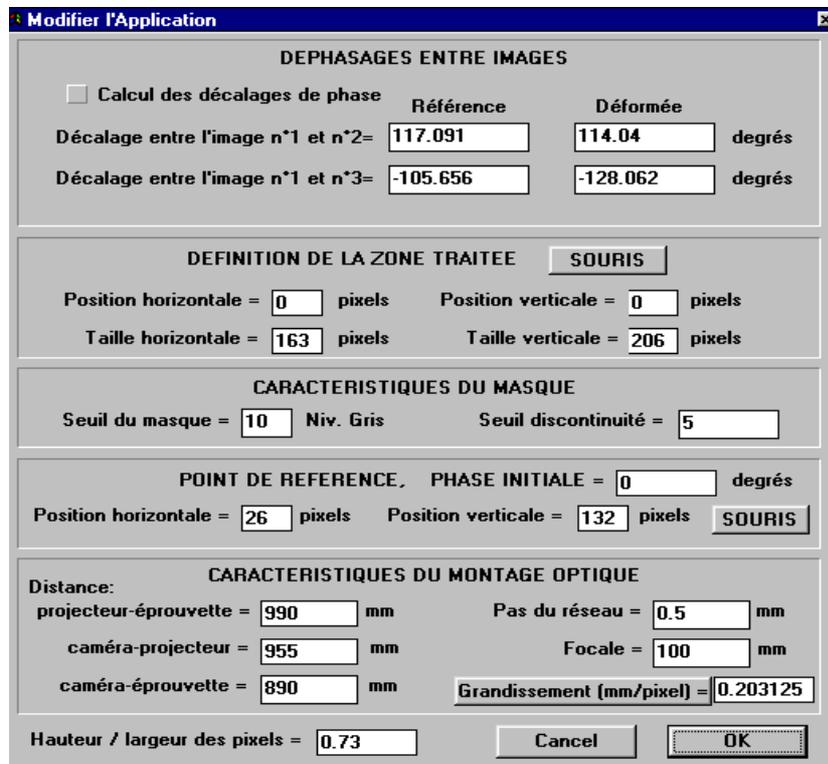


Fig. 6.57. La fenêtre du paramètre avec le déphase calculé

Dans la fenêtre de calcul du déphasage et des déplacements (Fig. 6.27.) on peut examiner le relief de la déformation de  $16,61 \times 10^{-1}$  mm (Fig. 6.58. a) et sa représentation sur le graphique réalisée par le logiciel "Surfer" (Fig. 6.58. b).

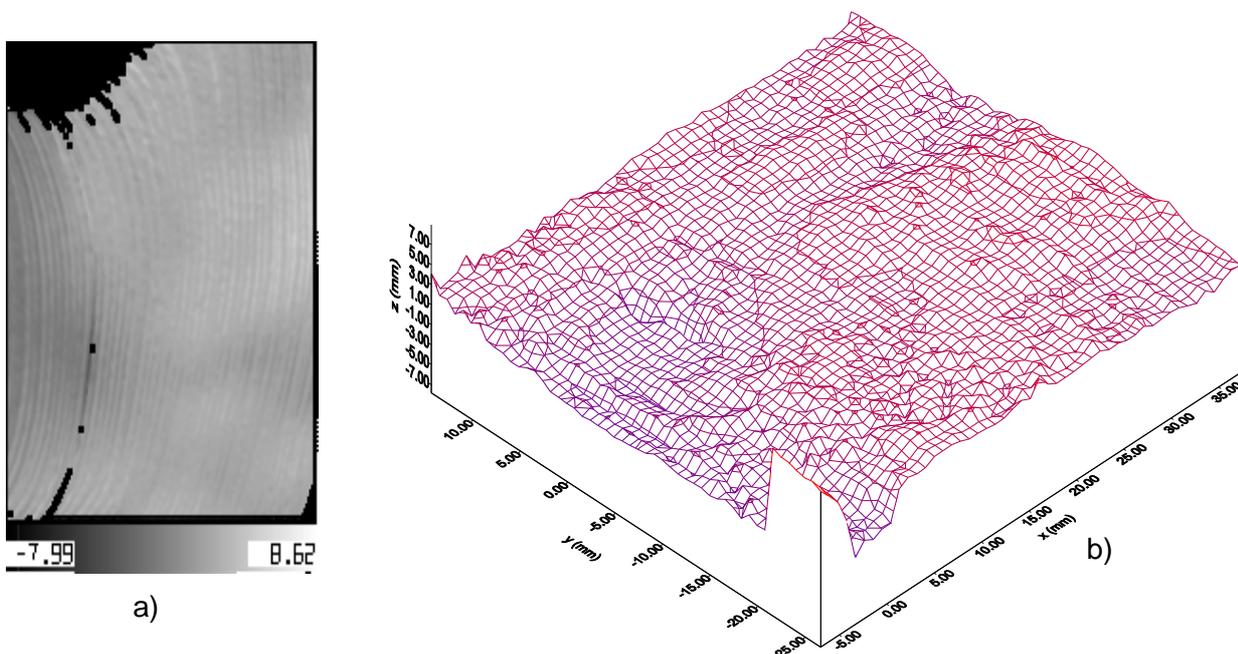
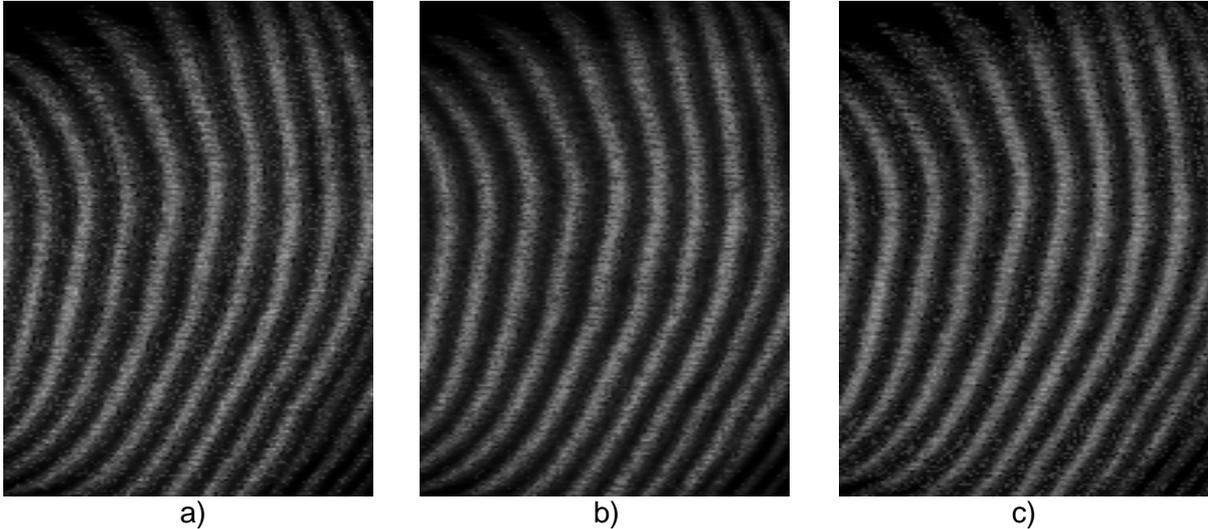


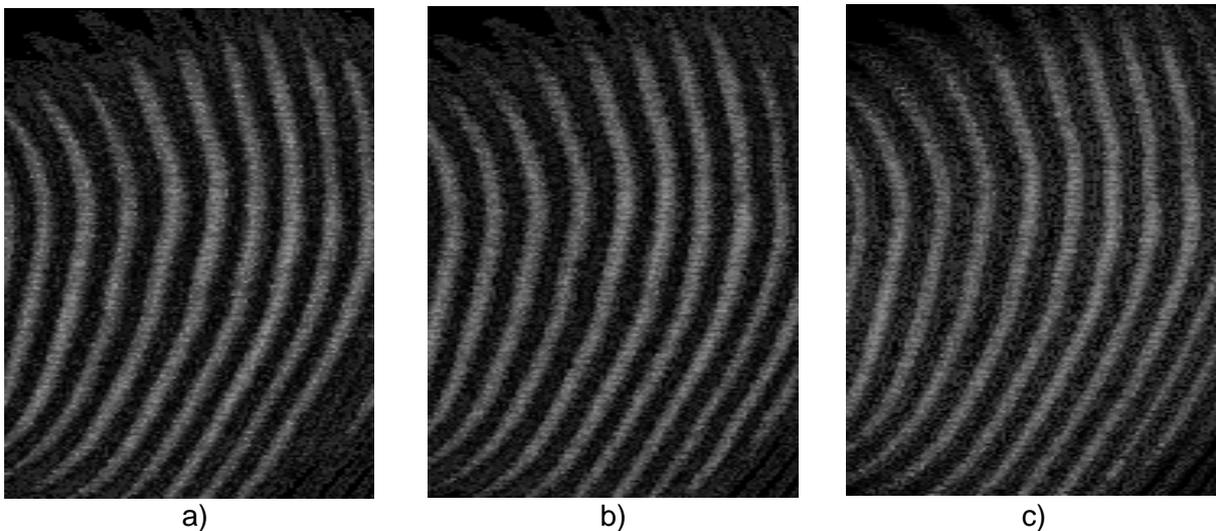
Fig. 6.58. a) La valeur de la déformation; b) L'image en 3D de la déformation

Une autre mesure sur la main a été réalisée à la vitesse de rotation de l'axe principal de la machine-outil de 710 rot/min.

On a acquis six images dont: trois images déphasées de  $120^\circ$  à l'état statique pour le calibrage (Fig. 6.59. a, b, c), et trois, avec la machine à percer fonctionnant en charge (Fig. 6.112. a, b, c), le perçage avec une perceuse de  $\varnothing 9,8$  mm dans une pièce cylindrique avec le diamètre de 60 mm, ayant la vitesse de rotation de 710 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,1$  mm/rot.



**Fig. 6.59.** Les images de référence sur la main, avec la machine à percer arrêtée, pour l'étalonnage, déphasées entre elles de: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$



**Fig. 6.60.** Les images acquises sur la main, avec la machine à percer au fonctionnement en charge, déphasées entre elles de: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$

Dans la Figure 6.61. est montrée l'interface graphique du traitement des données acquises, qui contient tous les paramètres utilisés pour le calcul des vibrations.

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale de 512 pixels et sur la verticale de 512 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le niveau de gris avec le seuil du masque de 5 et pour le seuil discontinu de 2.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 128 pixels et sur la verticale de 128 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont les mêmes que pour la mesure au fonctionnement au ralenti.

Le pas du réseau des lignes est de 0,5 mm. La distance focale est de 100 mm. Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0.1856 mm/pixels.

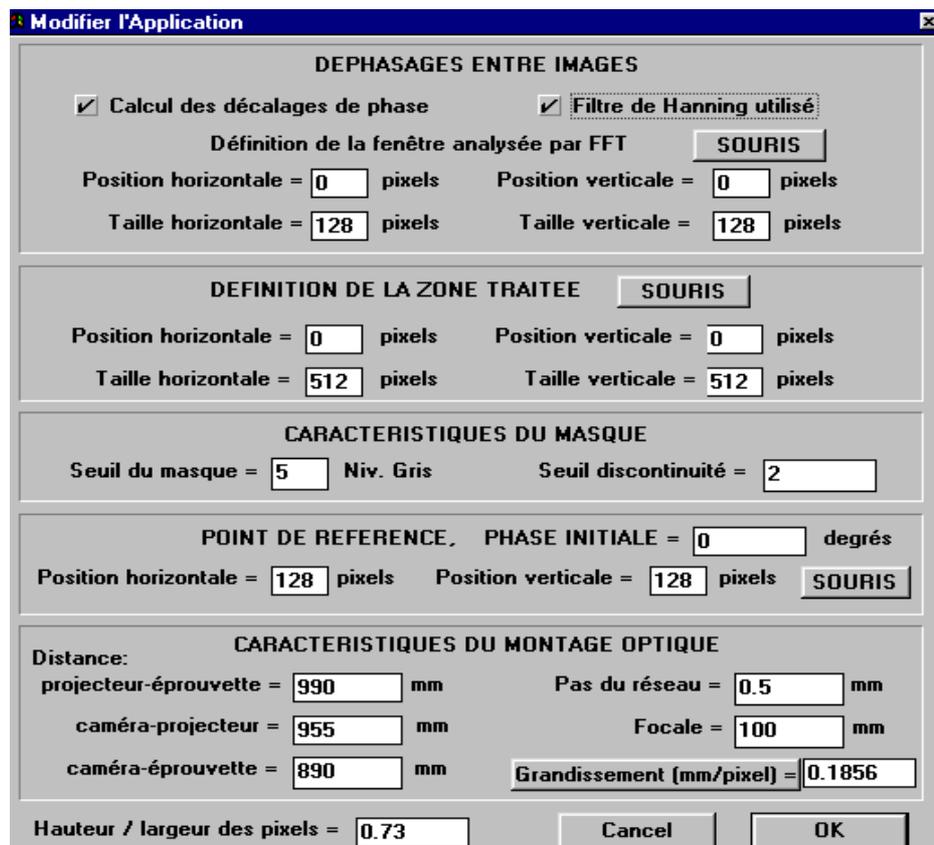


Fig. 6.61. La fenêtre des paramètres avec le déphasage calculé

On lance la fenêtre de calcul du déphasage et des déplacements (Fig. 6.27.) et à la fin a résulté la valeur de la déformation de  $4,15 \times 10^{-1}$  mm (Fig. 6.62. a) et sa représentation sur le graphique avec le logiciel "Surfer" (Fig. 6.62. b).

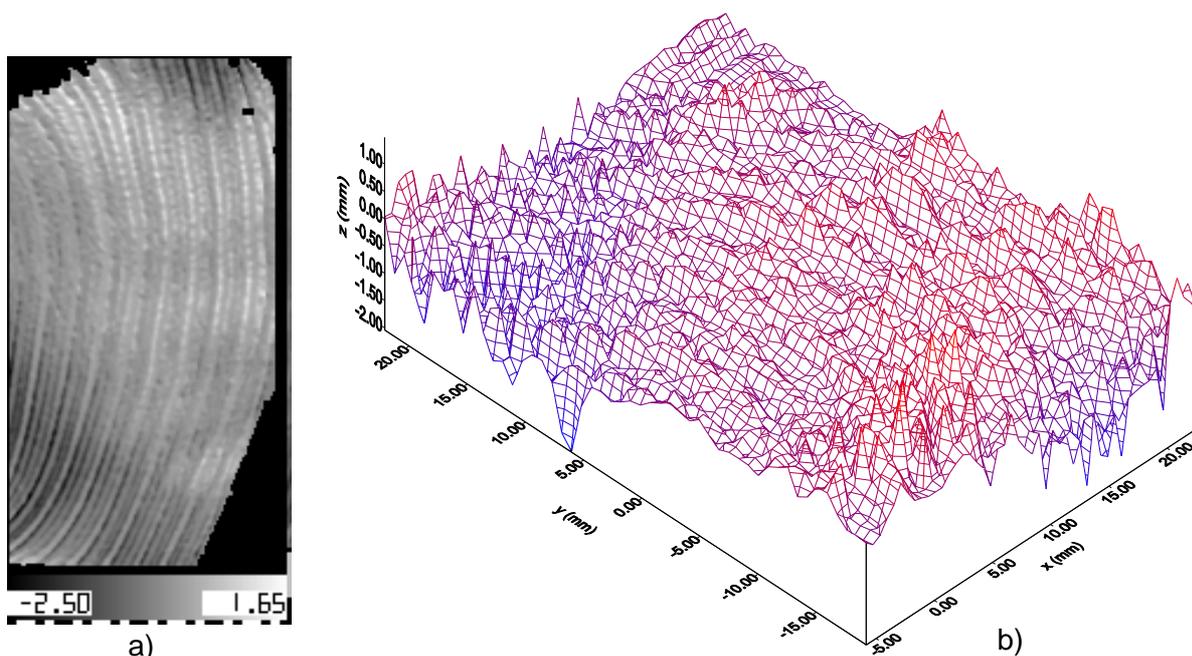


Fig. 6.62. a) La valeur de la déformation; b) L'image de la déformation en 3D

La procédure successive des images et les résultats de mesures pour les mesures effectuées sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge sont indiqués dans l'annexe 7.

## 6.7. Conclusions

La mesure des vibrations avec le vibromètre à une sensibilité plus grande et les mesures sont effectuées exactement au lieu demandé à l'opérateur humain et ça amène à un résultat meilleur par les méthodes optiques adaptées.

Les valeurs des déplacements sont données pendant la période du régime transitoire (de démarrage), qui sont environ cinq fois plus grandes que les valeurs des déplacements en régime permanent (de fonctionnement).

À la mesure des vibrations sur le tour SNA 500x1000 avec le vibromètre SVAN 958, les valeurs maximales enregistrées des déplacements d'après les trois axes, la vitesse de l'universel étant de 800 (rot/min), sont:

- sur la main, au fonctionnement au ralenti, sur tous les trois axes, la valeur maximale enregistrée des déplacements est de  $18 \times 10^{-5} \text{m}$  et on la trouve à la fréquence de 1 Hz;
- sur la main, au fonctionnement en charge, les valeurs maximales enregistrées des déplacements sont: d'après l'axe Ox de  $11 \times 10^{-5} \text{m}$ , d'après l'axe Oy de  $13 \times 10^{-5} \text{m}$  et d'après l'axe Oz est de  $14 \times 10^{-5} \text{m}$  et on les trouve à la fréquence de 1 Hz;
- sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti sont: d'après l'axe Ox est de  $21 \times 10^{-5} \text{m}$ , d'après l'axe Oy est de  $13 \times 10^{-5} \text{m}$  et d'après l'axe Oz est de  $14 \times 10^{-5} \text{m}$  et on les trouve à la fréquence de 1 Hz;
- sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge, la valeur maximale enregistrée pour les déplacements sur tous les trois axes est de  $17 \times 10^{-5} \text{m}$  et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

À la mesure des vibrations sur le tour SNA 500x1000 par la méthode Moiré de projection, les valeurs maximales enregistrées de la déformation d'après l'axe normal à la surface de mesure et avec la vitesse de rotation de 800 rot/min, sont:

- sur la main, au fonctionnement au ralenti, la valeur de la déformation est  $7,66 \times 10^{-1} \text{mm}$ ;
- sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti, la valeur de la déformation est de  $5,6 \times 10^{-1} \text{mm}$ ;
- sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge, la valeur de déformation est de  $7,51 \times 10^{-1} \text{mm}$ .

À la mesure des vibrations sur la machine à percer verticale MAx750 avec le vibromètre SVAN 958, les valeurs maximales enregistrées des déplacements, d'après les trois axes avec la vitesse de rotation de 180 rot/min, sont:

- sur la main, au fonctionnement au ralenti sont: d'après l'axe Ox est de  $19,8 \cdot 10^{-4} \text{m}$  on la trouve à la fréquence de 0,1931 Hz, d'après l'axe Oy est de  $14,8 \cdot 10^{-4} \text{m}$  on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz et d'après l'axe Oz est de  $4 \cdot 10^{-3} \text{m}$  et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz;
- sur la main, au fonctionnement en charge, sont: d'après l'axe Ox est de  $14,7 \cdot 10^{-4} \text{m}$ , d'après l'axe Oy est de  $11,7 \cdot 10^{-4} \text{m}$  et d'après l'axe Oz est de  $14,6 \cdot 10^{-4} \text{m}$  et on les trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

À la mesure des vibrations sur la machine à percer vertical MAx750 avec le vibromètre SVAN 958, les valeurs maximales enregistrées des déplacements d'après les trois axes, avec la vitesse de 355 rot/min, sont:

- sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti, sont: d'après l'axe Ox est de  $27,7 \cdot 10^{-4}$  m, d'après l'axe Oy est de  $10 \cdot 10^{-4}$  m et d'après l'axe Oz est de  $28,1 \cdot 10^{-4}$  m et on les trouve à la fréquence de 0,1831 Hz;
- sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge, sont: d'après l'axe Ox est de  $28,1 \cdot 10^{-4}$  m, d'après l'axe Oy est de  $30,9 \cdot 10^{-4}$  m et d'après l'axe Oz est de  $10,9 \cdot 10^{-4}$  m et on les trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

À la mesure des vibrations sur la machine à percer vertical MAx750 par la méthode Moiré de projection, les valeurs maximales enregistrées de la déformation sur l'axe normal à surface de mesure, sont:

- sur la main, au fonctionnement au ralenti, avec la vitesse de 180 rot/min, la valeur de la déformation est de  $4,97 \cdot 10^{-1}$  mm;
- sur la main, au fonctionnement en charge, avec la vitesse de 180 rot/min, la valeur de la déformation est de  $16,61 \cdot 10^{-1}$  mm;
- sur la main, au fonctionnement en charge, avec la vitesse de 710 rot/min, la valeur de la déformation est de  $4,15 \cdot 10^{-1}$  mm;
- sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti, avec la vitesse de 355 rot/min, la valeur de la déformation est de  $6,08 \cdot 10^{-1}$  mm;
- sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge, avec la vitesse de 355 rot/min, la valeur de la déformation est de  $5,67 \cdot 10^{-1}$  mm.

## CHAPITRE 7

### LA MODÉLISATION MÉCANIQUE DU SYSTÈME HUMAIN MAIN-BRAS

#### 7.1. Notions générales

Initialement, on a développé des modèles mathématiques du corps humain entier, mais, sur le parcours, faisant suite aux résultats des recherches, les modèles sont devenus de plus en plus complexes. A présent, on travaille sur les modèles mathématiques qui correspondent à des parties du corps humain. Les études du comportement du corps humain sous l'action des vibrations mécaniques produites par les machines-outils, *fara virgula* sont très rares sur le plan mondial, en Roumanie étant pratiquement inexistantes jusqu'à présent [CRI 09].

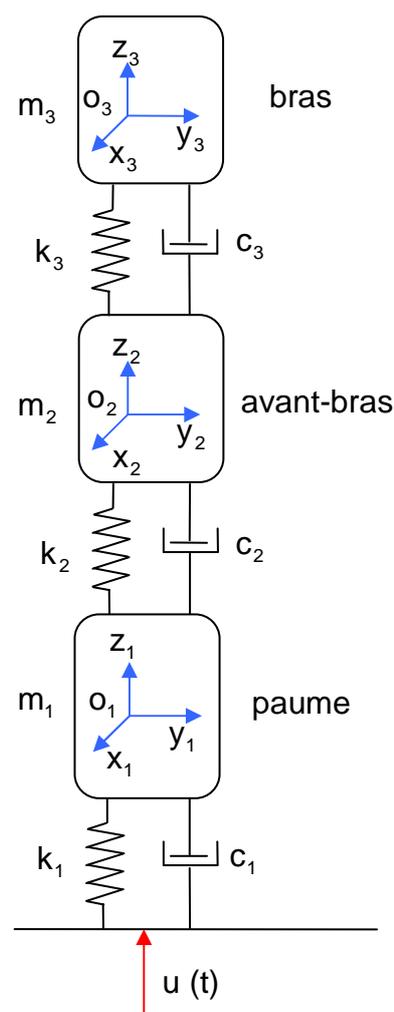
Le système humain main-bras est un système avec un degré de complexité non homogène, continu, avec des propriétés visco-élastiques dans les muscles, les os et la peau. Les caractéristiques dynamiques dans la perspective de l'analyse du modèle biomécanique nécessitent l'identification des propriétés mécaniques, visco-élastiques et d'inertie du modèle, dans des conditions d'utilisation typiques. Au mouvement du bras humain il y a de nombreux facteurs qui se rapportent à son comportement:

- Facteurs avec un comportement statique;
- Facteurs avec un comportement dynamique.

#### 7.2. Le modèle biomécanique du système humain main-bras avec trois degrés de liberté 3-EMB

Pour simplifier le modèle dynamique réel main-bras, qui est un modèle avec des masses distribuées, on le transforme dans un système de masses concentrées, où  $m_1$  est la masse de la main,  $m_2$  est la masse de l'avant-bras et  $m_3$  est la masse du bras. On néglige l'articulation de la main parce que la main est positionnée sur la source d'excitation (les machines-outils) pendant le temps qu'on effectue l'opération de degrossissage sur elle.

Le système humain main-bras, rapporté dans le système de référence, pour chaque masse concentrée, a neuf degrés de liberté. On a considéré les vibrations transmises au long du système, ainsi qu'on a considéré seulement les coordonnées généralisées  $z_1$ ,  $z_2$  et  $z_3$  et, le système a seulement trois degrés de liberté 3-EMB (3 Equations du système Main-Bras de l'organisme humain), (Fig. 7.1.). Le système main-bras se trouve en position

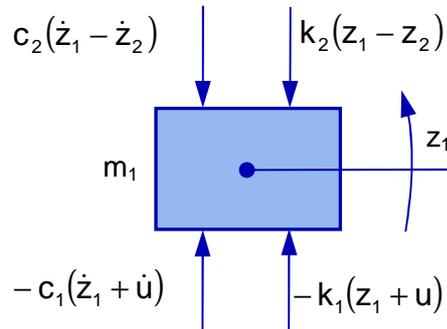


**Fig. 7.1.** Modèle biomécanique de la représentation du système humain main-bras. Modelul 3-

verticale.

L'écriture des équations différentielles est réalisée en les isolant. A chaque équation correspond le schéma mécanique suivant.

**La masse de la main (la paume)  $m_1$ :**



**Fig. 7.2.** Le schéma mécanique pour la main

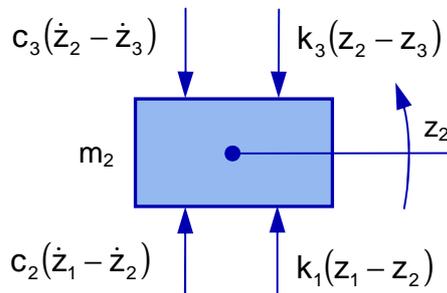
L'équation différentielle est écrite avec l'application du principe II de la Mécanique, d'après lequel l'accélération est imprimée à la masse de la Figure 7.2. et L'équation différentielle du mouvement est la suivante:

$$m_1 \ddot{z}_1 = -c_1(\dot{z}_1 + \dot{u}) - k_1(z_1 + u) - c_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) - k_2(z_1 - z_2) \quad (7.1)$$

ou

$$m_1 \ddot{z}_1 + c_1(\dot{z}_1 + \dot{u}) + k_1(z_1 + u) + c_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_2(z_1 - z_2) = 0 \quad (7.2)$$

**La masse de l'avant-bras  $m_2$ :**



**Fig. 7.3.** Le schéma mécanique de l'avant-bras

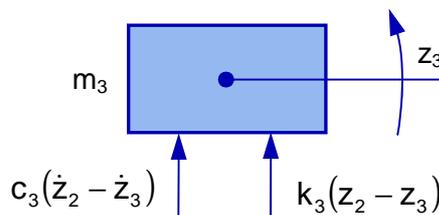
L'équation différentielle du mouvement de l'avant-bras résulte, en appliquant le principe II de la Mécanique, du schéma représenté dans la Figure 7.3.:

$$m_2 \ddot{z}_2 = c_2(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_2(z_1 - z_2) - c_3(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) - k_3(z_2 - z_3) \quad (7.3)$$

ou

$$m_2 \ddot{z}_2 + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2(z_2 - z_1) + c_3(\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + k_3(z_2 - z_3) = 0 \quad (7.4)$$

**La masse du bras  $m_3$ :**



**Fig. 7.4.** Le schéma mécanique du bras

L'équation différentielle du mouvement du bras est la suivante:

$$m_3 \ddot{z}_3 = c_3 (\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + k_3 (z_2 - z_3) \quad (7.5)$$

Toutes les inconnues passent dans le membre l et, ainsi, l'équation différentielle prend la forme:

$$m_3 \ddot{z}_3 + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_3 (z_3 - z_2) = 0 \quad (7.6)$$

Les équations (7.2), (7.4) et (7.6) forment ensemble le système d'équations, qui pour un système à trois degrés de liberté, 3-EMB, est:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + c_1 (\dot{z}_1 + \dot{u}) + k_1 (z_1 + u) + c_2 (\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + k_2 (z_1 - z_2) = 0 \\ m_2 \ddot{z}_2 + c_2 (\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2 (z_2 - z_1) + c_3 (\dot{z}_2 - \dot{z}_3) + k_3 (z_2 - z_3) = 0 \\ m_3 \ddot{z}_3 + c_3 (\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_3 (z_3 - z_2) = 0 \end{cases} \quad (7.7)$$

L'intégration avec la méthode Ruge-Kutte d'ordre IV avec Simulink, est faite sur le système (7.7), où:

$z_1$ —est le déplacement correspondant à la coordonnée généralisée du centre de la masse  $m_1$  (la masse de la main) rapporté à l'axe  $z_h$  [m];

$z_2$ —est le déplacement correspondant à la coordonnée généralisée du centre de la masse  $m_2$  (la masse de l'avant-bras) rapporté à l'axe  $z_h$  [m];

$z_3$ —est le déplacement correspondant à la coordonnée généralisée du centre de la masse  $m_3$  (la masse du bras) rapporté à l'axe  $z_h$  [m];

$\ddot{z}_i = \frac{d^2 z_i}{dt^2}$ ,  $\dot{z}_i = \frac{dz_i}{dt}$ ,  $z$  avec  $i = \overline{1,3}$ —sont les accélérations, les vitesses et, respectivement, les déplacements correspondants pour chaque élément de masse  $m$ .

Par addition, le système d'équations différentielles devient:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 + (c_1 + c_2) \dot{z}_1 + (k_1 + k_2) z_1 - c_2 \dot{z}_2 - k_2 z_2 = -c_2 \dot{u} - k_2 u \\ m_2 \ddot{z}_2 - c_2 \dot{z}_1 - k_2 z_1 + (c_2 + c_3) \dot{z}_2 + (k_2 + k_3) z_2 - c_3 \dot{z}_3 - k_3 z_3 = 0 \\ m_3 \ddot{z}_3 - c_3 \dot{z}_2 - k_3 z_2 + c_3 \dot{z}_3 + k_3 z_3 = 0 \end{cases} \quad (7.8)$$

Le système (7.8) peut être écrit sous la forme matricielle:

$$[M] \cdot \{\ddot{z}\} + [C] \cdot \{\dot{z}\} + [K] \cdot \{z\} = \{u\} \quad (7.9)$$

où:

[M]—est la matrice des coefficients d'inertie;

[C] —est la matrice des coefficients d'amortissement;

[K] —est la matrice des coefficients de rigidité;

{z}—est le vecteur des déplacements;

{\dot{z}}—est le vecteur des vitesses;

{\ddot{z}}—est le vecteur d'accélérations;

$\{u\}$ —est le vecteur de l'excitation forcée (externe).  
Ils ont les expressions suivantes:

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (7.10)$$

$$\{\ddot{z}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{z}_1 \\ \ddot{z}_2 \\ \ddot{z}_3 \end{Bmatrix} \quad (7.11)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 & 0 \\ -c_2 & c_2 + c_3 & -c_3 \\ 0 & -c_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

$$\{\dot{z}\} = \begin{Bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \end{Bmatrix} \quad (7.13)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_{12} & -k_{12} & 0 \\ -k_{12} & k_{12} + k_{23} & -k_{23} \\ 0 & -k_{23} & k_{23} \end{bmatrix} \quad (7.14)$$

$$\{z\} = \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{Bmatrix} \quad (7.15)$$

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u(t) \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (7.16)$$

Mais

$$u(t) = -c_2 \dot{u} - k_2 u \quad (7.17)$$

$u$  est l'excitation, avec l'expression:

$$u(t) = u_0 \cdot \sin \omega t \quad (7.18)$$

On modélise seulement les translations d'après l'axe Oz, pour le modèle à trois degrés de liberté. Pour simplification, par la suite, on se réfère à ce modèle comme modèle 3-EMB (3 Equations du système Main-Bras de l'organisme humain).

On considère la fréquence d'excitation du système humain main-bras comme la fréquence correspondante à la vitesse de  $n=800$ rot/min du tour SNA 500x1000, elle est donc:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{83,73}{2 \cdot 3,14} = 13,33 \text{ Hz}$$

Les masses, les caractéristiques et l'amortissement du ressort sont présentés ci-dessous [CRI 09]:

$\omega=83,77$  rad/s—est la pulsation de la source d'excitation;

$n = 800$  rot/min—est la vitesse de la machine-outil;

$m_1 = 0,45$  kg—est la masse de la main (paume);

$m_2 = 1,15$  kg—est la masse de l'avant-bras;

$m_3 = 1,9$  kg—est la masse du bras;

$k_1 = 155800$  N/m—est la constante élastique longitudinale de la main;

$k_2 = 23600$  N/m—est la constante élastique longitudinale de l'avant-bras;

$k_3 = 44460$  N/m—est la constante élastique longitudinale du bras;

$c_1 = 30$  Ns/m—est la constante d'amortissement de la main;

$c_2 = 202,8$  Ns/m—est la constante d'amortissement de l'avant-bras;

$c_3 = 500$  Ns/m—est la constante d'amortissement du bras.

Le signal d'entrée est une fonction sinusoïdale transmise comme un déplacement du support sur lequel est assis l'opérateur humain, relation (7.18). On calcule la dérivée de ce signal en fonction du temps et il résulte:

$$\dot{u}(t) = u_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t \quad (7.19)$$

où:

$u_0 = 3 \times 10^{-3}$  m—est l'amplitude du déplacement;

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 800}{60} = 83,77 \text{ rad/s} \quad (7.20)$$

Afin de les introduire en Simulink, il est nécessaire d'expliciter les accélérations, ce qui se réalise par la transformation du système d'équations différentielles (7.7), qui devient successivement:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{z}_1 = -c_1(\dot{z}_1 + \dot{u}) - k_1(z_1 + u) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2(z_2 - z_1) \\ m_2 \ddot{z}_2 = -c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_2(z_2 - z_1) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_3(z_3 - z_2) \\ m_3 \ddot{z}_3 = -c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - k_3(z_3 - z_2) \end{cases} \quad (7.21)$$

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 = \frac{1}{m_1} [-c_1(\dot{z}_1 + \dot{u}) - k_1(z_1 + u) + c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + k_2(z_2 - z_1)] \\ \ddot{z}_2 = \frac{1}{m_2} [-c_2(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) - k_2(z_2 - z_1) + c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) + k_3(z_3 - z_2)] \\ \ddot{z}_3 = \frac{1}{m_3} [-c_3(\dot{z}_3 - \dot{z}_2) - k_3(z_3 - z_2)] \end{cases} \quad (7.22)$$

$$\begin{cases} \ddot{z}_1 = \frac{1}{m_1} (-c_1 \cdot \dot{z}_1 - c_1 \cdot \dot{u} - k_1 \cdot z_1 - k_1 \cdot u + c_2 \cdot \dot{z}_2 - c_2 \cdot \dot{z}_1 + k_2 \cdot z_2 - k_2 \cdot z_1) \\ \ddot{z}_2 = \frac{1}{m_2} (-c_2 \cdot \dot{z}_2 + c_2 \cdot \dot{z}_1 - k_2 \cdot z_2 + k_2 \cdot z_1 + c_3 \cdot \dot{z}_3 - c_3 \cdot \dot{z}_2 + k_3 \cdot z_3 - k_3 \cdot z_2) \\ \ddot{z}_3 = \frac{1}{m_3} (-c_3 \cdot \dot{z}_3 + c_3 \cdot \dot{z}_2 - k_3 \cdot z_3 + k_3 \cdot z_2) \end{cases} \quad (7.23)$$

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \frac{1}{m_1} [-\dot{z}_1(c_1 + c_2) + \dot{z}_2 \cdot c_2 - c_1 \cdot \dot{u} - z_1(k_1 + k_2) + z_2 \cdot k_2 - k_1 \cdot u] \\ \dot{z}_2 = \frac{1}{m_2} [-\dot{z}_2(c_2 + c_3) + \dot{z}_1 \cdot c_2 + \dot{z}_3 \cdot c_3 - z_2(k_2 + k_3) + z_1 \cdot k_2 + z_3 \cdot k_3] \\ \dot{z}_3 = \frac{1}{m_3} (-c_3 \cdot \dot{z}_3 + c_3 \cdot \dot{z}_2 - k_3 \cdot z_3 + k_3 \cdot z_2) \end{cases} \quad (7.24)$$

### 7.2.1. Le programme 3-EMB correspondant au modelé 3-EMB du système humain main-bras

Le programme pour le calcul des vitesses et des déplacements des éléments du système est montré dans la Figure 7.7. Le temps d'intégration a été considéré de 10 secondes. L'intégration a été réalisée avec la méthode Runge-Kutta d'ordre quatre à l'aide du logiciel Simulink [Annexe A5].

L'amplitude du signal d'entrée est calculée avec la formule:

$$u(t) = u_0 \cdot \sin \omega t = 3 \cdot 10^{-3} \cdot \sin \omega t$$

$$\dot{u}(t) = u_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 83,77 \cdot \sin \omega t$$

dans lesquelles on considère  $\omega=83,77\text{rad/s}$ , correspondant à la fréquence de 13,33Hz et, respectivement, d'une vitesse du tour de 800rot/min (obtenue des mesures expérimentales).

Chaque équation est modélisée séparément. Ainsi, à chaque équation correspond un sous-système du modèle entier. Pour l'équation de déplacement  $z_1$ , après la modélisation, a été obtenu le système des diagrammes montrés dans la Figure 7.5.

$$\ddot{z}_1 = \frac{1}{m_1} [-\dot{z}_1(c_1 + c_2) + \dot{z}_2 \cdot c_2 - c_1 \cdot u_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t - z_1(k_1 + k_2) + z_2 \cdot k_2 - k_1 \cdot u_0 \cdot \sin \omega t] \quad (7.25)$$

$c_1 \dot{u} + k_1 u$ —représente la valeur du signal d'entrée à la base du modèle, le signal composé de deux fonctions harmoniques:

$$c_1 \dot{u} = c_1 \cdot u_0 \cdot \omega \cdot \cos \omega t = 30 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \cdot 83,77 \cos \omega t = 7,54 \cos \omega t \cong 8 \text{ N} \quad (7.26)$$

$$k_1 u = k_1 \cdot u_0 \cdot \sin \omega t = 155800 \cdot 3 \cdot 10^{-3} \sin \omega t = 467,4 \sin \omega t \cong 467 \text{ N}$$

Après les remplacements, l'équation (7.25) devient:

$$\ddot{z}_1 = \frac{1}{0,45} [-232,8 \cdot \dot{z}_1 + 202,8 \cdot \dot{z}_2 - 8 - 179400 \cdot z_1 + 23600 \cdot z_2 - 467] \quad (7.27)$$

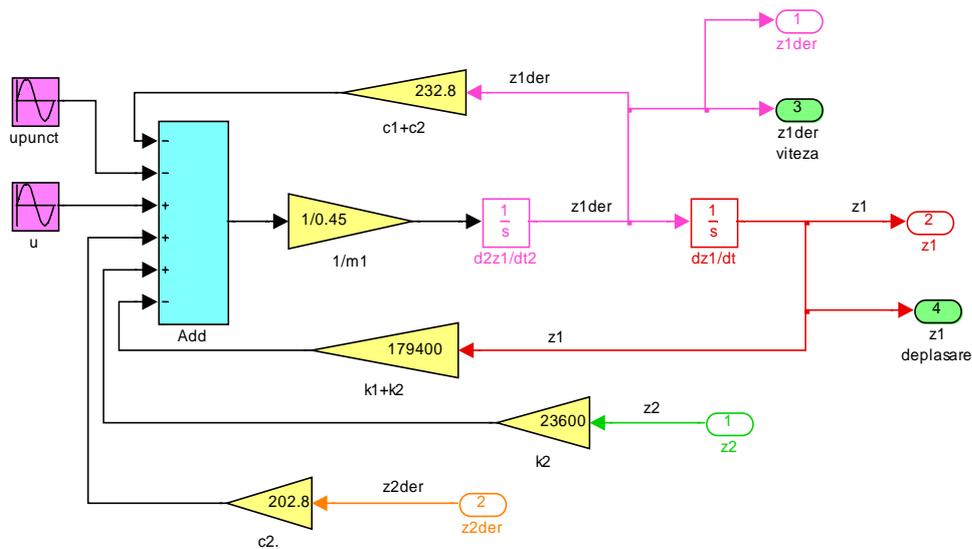


Fig. 7.5. Le sous-système  $z_1$  du programme 3-EMB

Pour l'équation du déplacement  $z_2$ , suite à la modélisation, on a obtenu le système des diagrammes montré dans la Figure 7.6.

L'équation correspondante à  $z_2$  est:

$$\ddot{z}_2 = \frac{1}{m_2} [-\dot{z}_2(c_2 + c_3) + \dot{z}_1 \cdot c_2 + \dot{z}_3 \cdot c_3 - z_2(k_2 + k_3) + z_1 \cdot k_2 + z_3 \cdot k_3] \quad (7.28)$$

Avec les remplacements, l'équation (7.28) devient:

$$\ddot{z}_2 = \frac{1}{1,15} [-702,8 \cdot \dot{z}_2 + 202,8 \cdot \dot{z}_1 + 500 \cdot \dot{z}_3 - 68060 \cdot z_2 + 23600 \cdot z_1 + 44460 \cdot z_3] \quad (7.29)$$

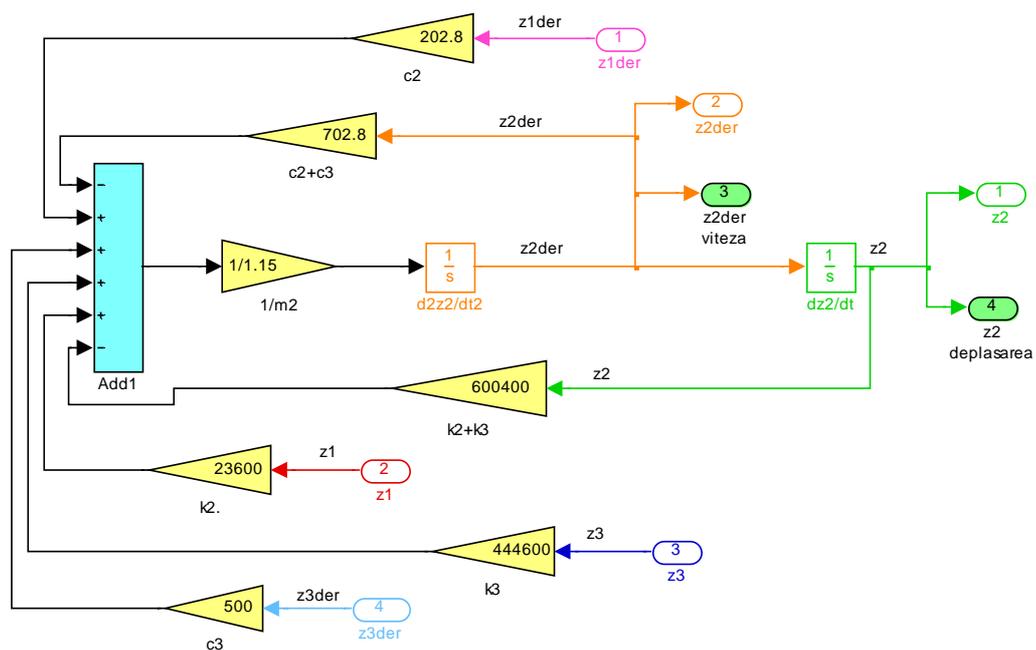
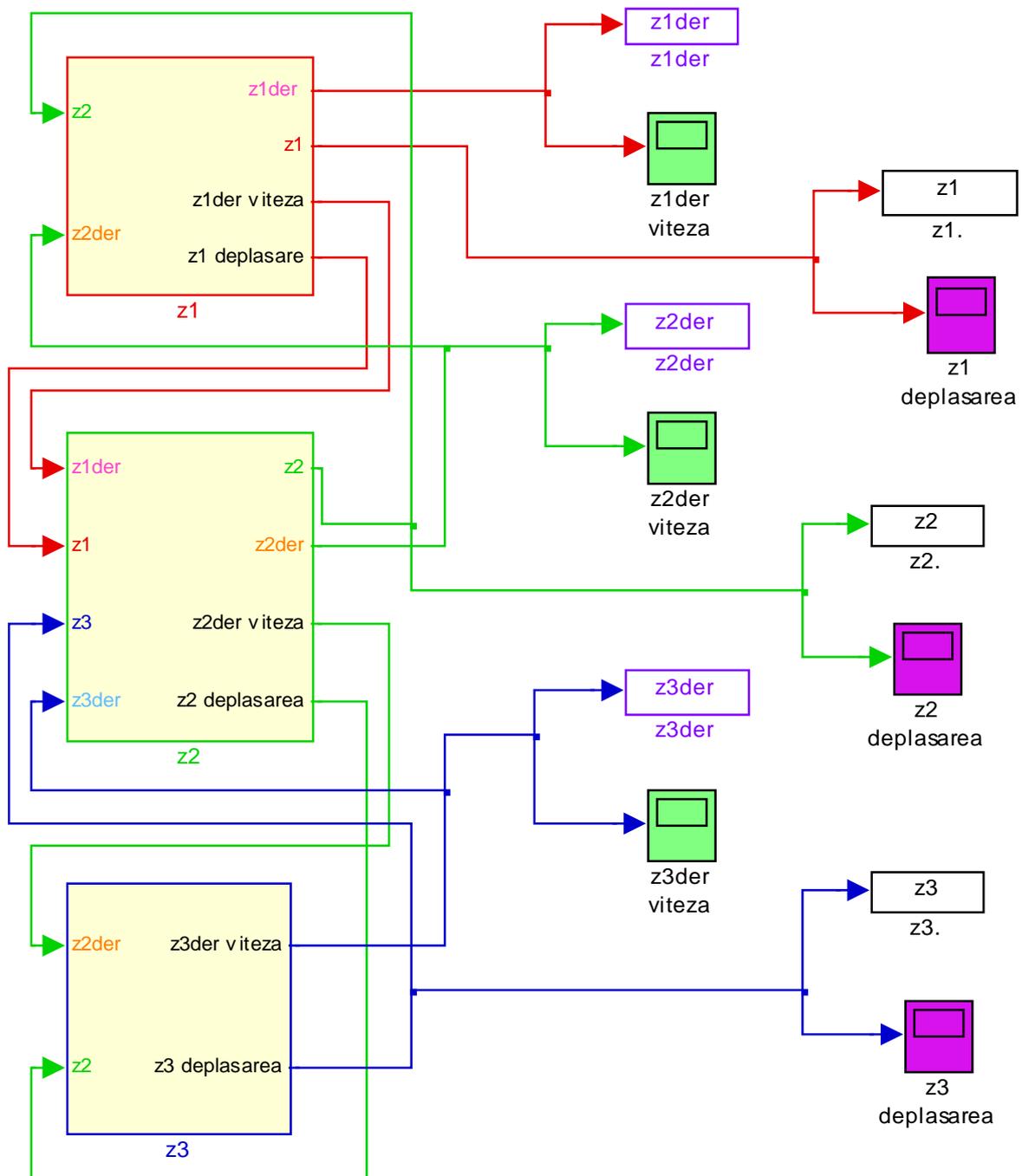


Fig. 7.6. Le sous-système  $z_2$  du programme 3-EMB



**Fig. 7.7.** Le programme 3-EMB de la résolution du système afférent au modèle mécanique, pour le système main-bras

Pour l'équation du déplacement  $z_3$ , suite à la modélisation, on a obtenu le système des diagrammes montrés dans la Figure 7.8.

$$\ddot{z}_3 = \frac{1}{m_3} (-c_3 \cdot \dot{z}_3 + c_3 \cdot \dot{z}_2 - k_3 \cdot z_3 + k_3 \cdot z_2) \quad (7.30)$$

L'équation 7.30 devient:

$$\ddot{z}_3 = \frac{1}{1,9} (-500 \cdot \dot{z}_3 + 500 \cdot \dot{z}_2 - 44460 \cdot z_3 + 44460 \cdot z_2) \quad (7.31)$$

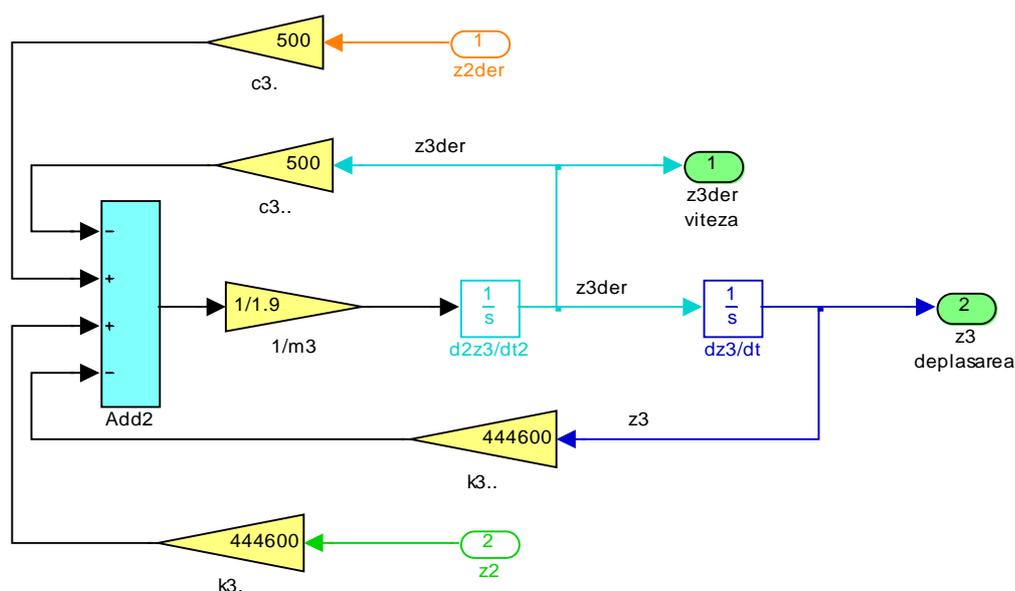


Fig. 7.8. Le sous-système  $z_3$  du programme 3-EMB

Les paramètres des blocs source correspondant au signal d'entrée sont montrés dans la Figure 7.9. Le modèle est résolu avec la fonction ode45 correspondante à la méthode Runge-Kutta de l'ordre IV et IV et demi.

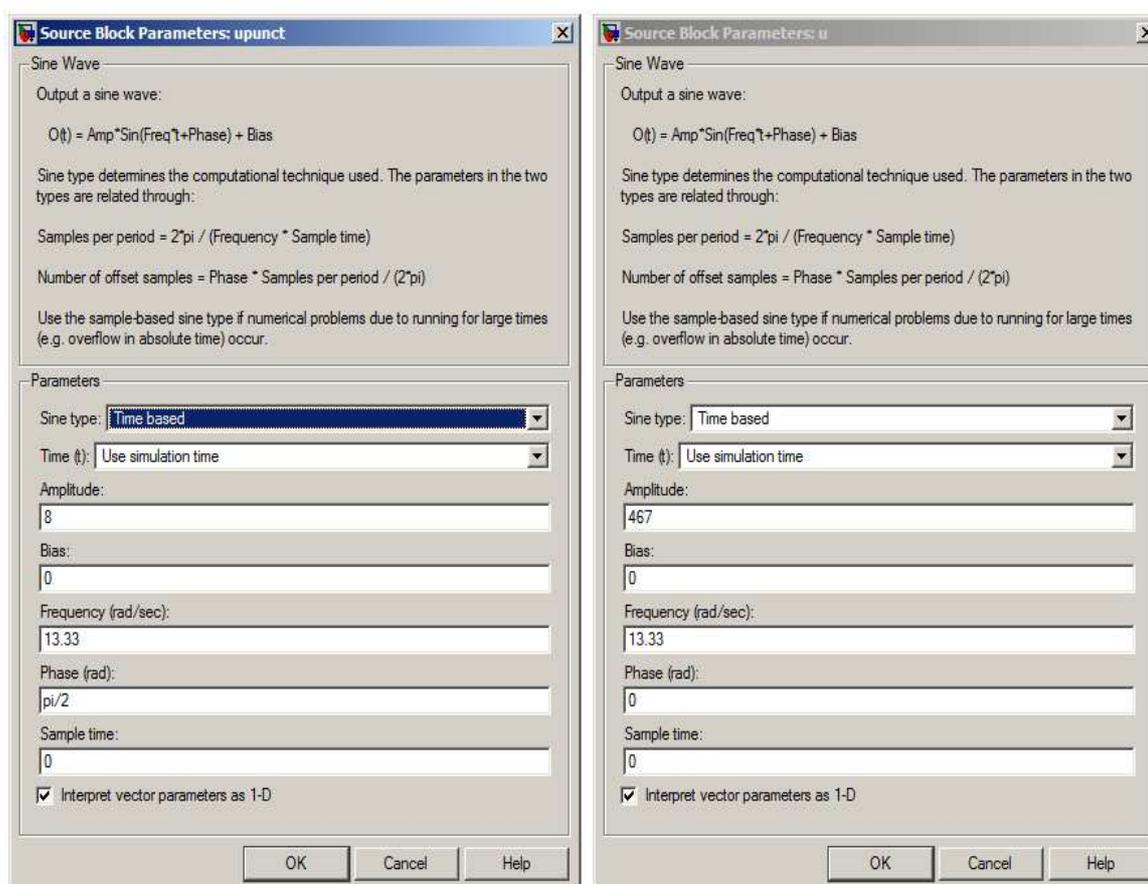
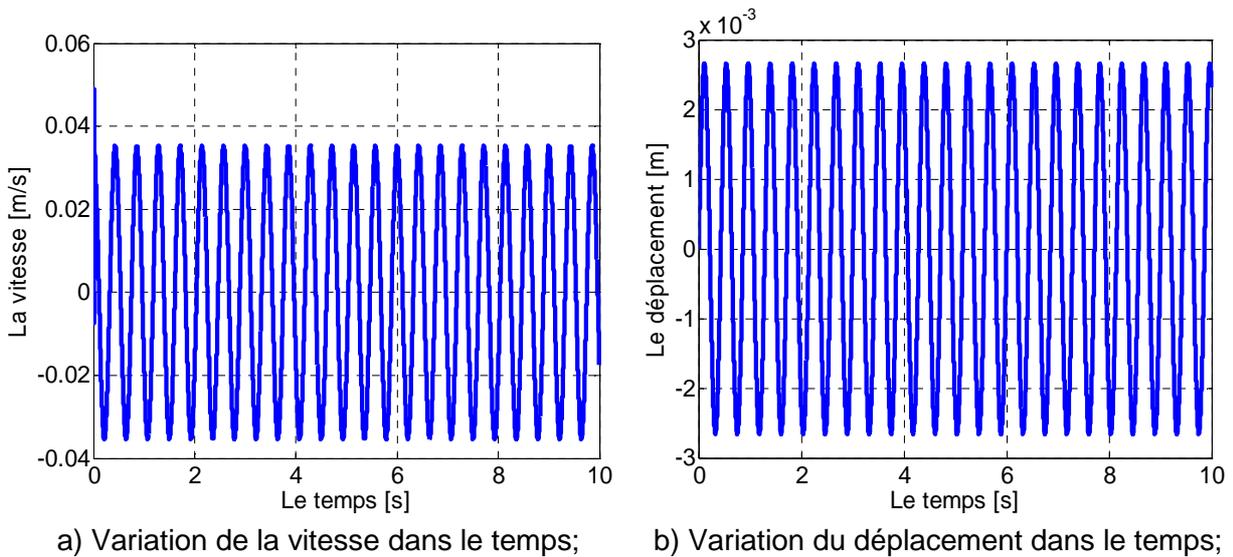
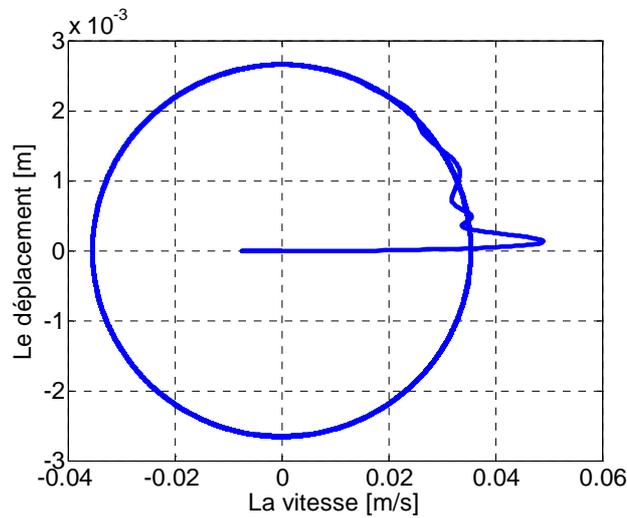


Fig. 7.9. Le bloc source correspondant aux paramètres du signal d'entrée

La Figure 7.10. correspond à la variation de la vitesse dans le temps et à la variation du déplacement dans le temps. Dans la Figure 7.11. est représentée la stabilité du système humain main-bras pour  $z_1$ der–la vitesse et  $z_1$ –le déplacement.

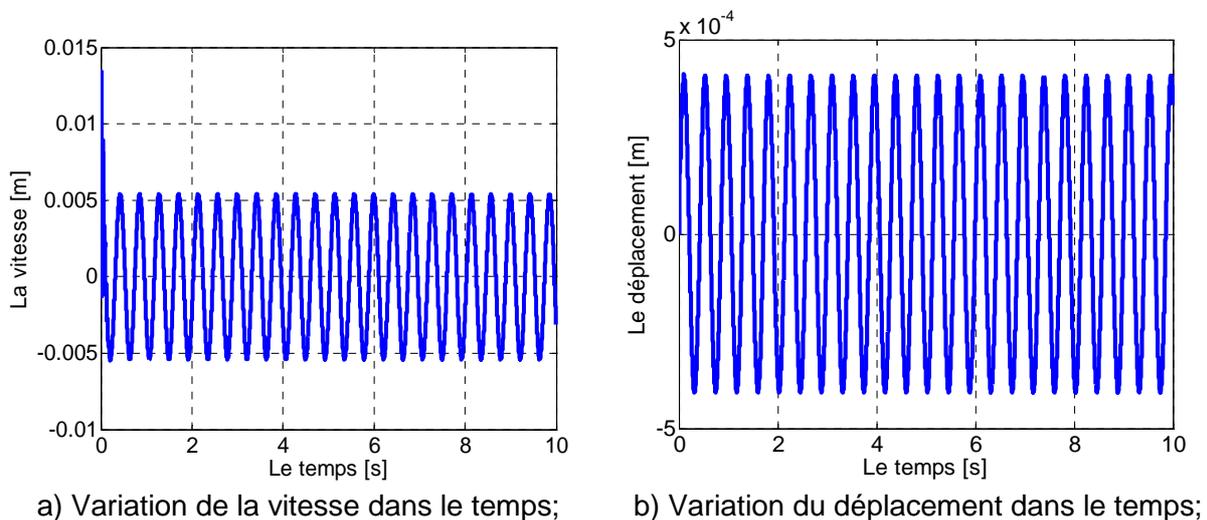


**Fig. 7.10.** Les diagrammes pour le modèle 3-EMB



**Fig. 7.11.** Le diagramme de phase pour le modèle 3-EMB

La Figure 7.12 correspond à la variation de la vitesse dans le temps et à la variation du déplacement dans le temps. Dans la Figure 7.13 est représentée la stabilité du système humain main-bras pour  $z_2$ —la vitesse et  $z_2$ —le déplacement.



**Fig. 7.12.** Les diagrammes pour le modèle 3-EMB

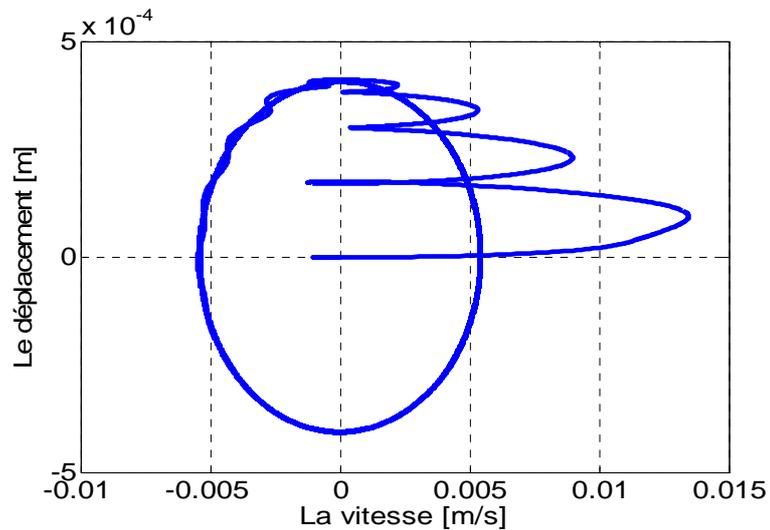


Fig. 7.13. Le diagramme de phase pour le modèle 3-EMB

La Figure 7.14. correspond à la variation de la vitesse dans le temps et à la variation de déplacement dans le temps. Dans la Figure 7.15. est représentée la stabilité du système humain main-bras pour  $z_3$ der–la vitesse et  $z_3$ –le déplacement.

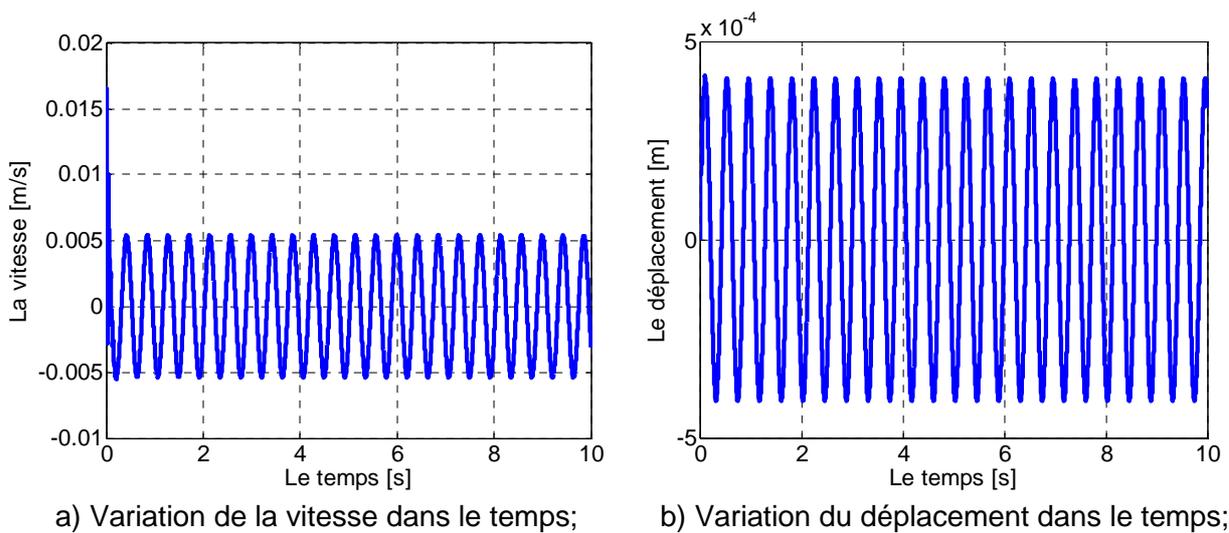


Fig. 7.14. Les diagrammes pour le modèle 3-EMB

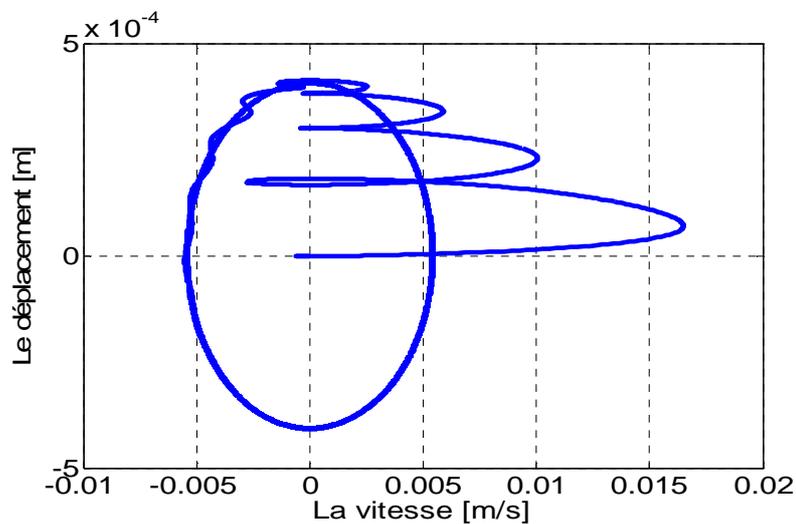


Fig. 7.15. Le diagramme de phase pour le modèle 3-EMB

### **7.3. Conclusions**

Au fonctionnement au ralenti le déplacement, pour le modèle biomécanique 3-EMB à une fréquence de 13.33 Hz, a un maximum de  $5 \times 10^{-4}$  m qui est comparable comme ordre de grandeur avec les résultats expérimentaux obtenus pour les mesures effectuées avec le vibromètre SVAN 958 qui ont donné la valeur maximale de  $11 \times 10^{-5}$  m et, par la méthode Moiré de projection on a obtenu la valeur maximale de  $7 \times 10^{-4}$  m.

## CHAPITRE 8

### CONCLUSIONS FINALES, CONTRIBUTIONS PERSONNELLES ET DIRECTIONS DE RECHERCHE

#### 8.1. Conclusions finales

Comme le titre de la thèse l'indique, ce travail vise à entreprendre une étude complexe, globale, pluridisciplinaire sur les grandeurs cinématiques locales et globales et la mesure des vibrations, à l'aide du vibromètre et par les techniques optiques, vibrations qui sont transmises au lieu de travail par le système main-bras de l'opérateur humain.

L'environnement artificiel créé par l'homme soumet l'homme à des conditions extrêmes, auxquelles il n'est pas habitué. La tolérance du corps humain aux vibrations produites dans cet environnement est limitée. À part le fait que les vibrations produisent une sensation générale de discomfort qui empêche l'opérateur de donner le rendement désiré (faible concentration, fatigue) et qui a un effet immédiat, elles ont un effet nocif sur la santé, un effet à long terme.

Les vibrations locales ou régionales se produisent dans les zones de contact du corps avec les pièces en vibration. Le plus souvent en contact avec les sources de vibrations sont les membres, à savoir les mains et les pieds, et plus rarement la tête et le dos. Les vibrations transmises à la main ou le bras sont souvent ressenties dans d'autres parties du corps, principalement dans la tête.

#### 8.2. Les contributions personnelles

Dans ce travail présenté comme thèse de doctorat, on peut énumérer quelques-unes des contributions personnelles, mises en évidence par l'auteur. On peut énumérer:

1. L'identification bibliographique des caractéristiques mécaniques qui définissent le système main-bras.
2. La réalisation d'un dispositif d'essai (Chapitre 5) pour la mesurer les vibrations par la méthode Moiré de projection.
3. La modélisation biomécanique et mathématique du système humain main-bras avec trois degrés de liberté.
4. L'analyse de la transmission des vibrations des machines-outils au système humain main-bras de l'opérateur pendant les périodes de travail.
5. Les mesures avec le vibromètre et avec la méthode Moiré de projection ont été réalisées dans les ateliers de l'Université Technique de Cluj-Napoca sur un tour SNA 500x1000 et une machine à percer verticale MAx750, pour mettre en évidence la transmission des vibrations. Les mesures par interférométrie de speckles pour mettre en évidence les régions avec des fortes amplitudes de vibration sur des outils à main ont été effectuées au Laboratoire de Mécanique de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen. Ces types de mesures avec la méthode Moiré de projection et par interférométrie speckle sont peu utilisées jusqu'à présent pour mesurer les vibrations sur le corps humain ou sur les sources de vibrations transmises à l'être humain.

### 8.3. La valorisation des résultats des recherches

Pendant l'élaboration de la thèse de doctorat, les études et les recherches effectuées ont été valorisées par:

- 4 communications comme premier auteur présentées aux conférences nationales et internationales;
- 1 présentation de rapport écrit, comme seul auteur, à la fin du stage de 8 mois effectué au Laboratoire de Mécanique de l'Institut National des Sciences Appliquées de Rouen ;
- 3 communications comme co-auteur présentées aux conférences nationales et internationales;
- Membre dans deux contrats CNCSIS, CEEEX: nr. 129/2006 et 751/2006, ainsi que dans un contrat de partenariat P2 nr. 92-112 2008.

### 8.4. Directions futures de recherche

Les modélisations mathématiques des différentes parties du corps humain, avec la validation des résultats par les mesures directes ou par les techniques de mesure optiques dans les conditions dynamiques de travail forment une première direction possible de recherche.

Les études concernant le comportement du corps humain à des fréquences différentes de travail, dans des environnements différents et pour des outils dans des domaines d'activités autres que les machines-outils, avec la validation des résultats par des mesures directes ou par techniques de mesures optiques dans des conditions dynamique de travail est une deuxième possible direction de recherche.

Les études regardant le comportement du corps humain à des fréquences différentes de travail et l'établissement des possibilités de relaxation de l'organisme humain sous l'action des vibrations utiles avec la validation des résultats par de mesures directes ou par les techniques de mesure optiques dans les conditions dynamiques de travail est une troisième future possible direction de recherche.

## ANNEXE A1

## Les vibrations des systèmes avec un degré de liberté

Les systèmes oscillants avec un degré de liberté sont composés, en général, d'une masse rigide, qui exécute un mouvement de translation ou de rotation, masse qui est prévue avec un élément élastique et avec un élément ayant des propriétés d'amortissement. Le mouvement d'un système mécanique vibrant a un seul degré de liberté peut être étudié à l'aide d'un seul paramètre scalaire, appelé la coordonnée (le paramètre) de la vibration.

## A1.1. Le mouvement vibratoire libre non amorti

Un point matériel M de masse m ou un corps lié à un ressort avec la constante élastique k (Fig. A1.1.) et de masse négligeable, retiré de sa position d'équilibre statique par traction ou compression du ressort, représente le modèle mécanique d'un corps qui exécute un mouvement vibratoire libre non amorti.

La masse m est contrainte d'effectuer un mouvement de translation (Fig. A1.1. a et b), et le corps, articulé en A, exécute un mouvement de rotation pure (Fig. A1.1. c).

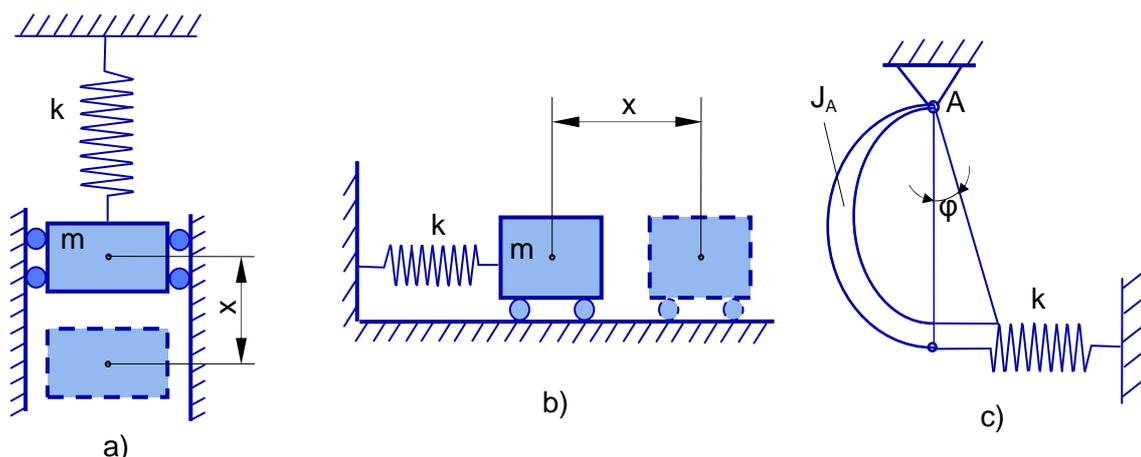


Fig. A1.1. Le mouvement vibratoire libre non amorti

Par définition, la constante élastique du ressort k, est égale à la force qui produit une déformation égale à 1 (à l'unité). On peut la définir comme le rapport entre la force F appliquée au ressort et la déformation x qui lui correspond:

$$k = \frac{F}{x} \quad (\text{A1.1})$$

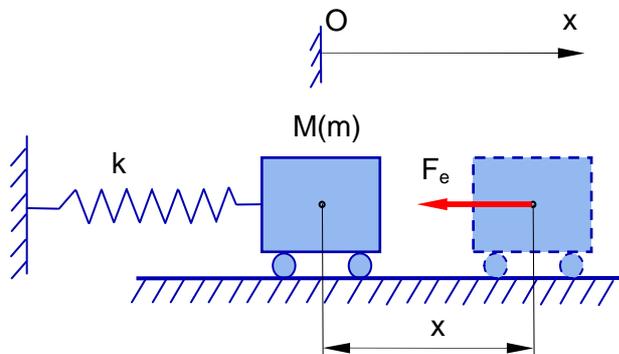


Fig. A1.2. Le mouvement vibratoire libre non amorti

Sur le système vibrant de la Figure A1.2., retiré de sa position d'équilibre, actionne la force élastique, qui s'oppose à la déformation de l'arc:

$$F_e = -kx \quad (\text{A1.2})$$

En utilisant l'équation fondamentale de la dynamique projetée sur la direction x, on obtient:

$$m\ddot{x} = -kx \quad (\text{A1.3})$$

ou

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad (\text{A1.4})$$

L'équation différentielle du mouvement (A1.4) peut être écrite sous la forme [ISP 97]:

$$\ddot{x} + \frac{k}{m}x = 0, \quad (\text{A1.5})$$

En notant avec:

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

la pulsation propre du mouvement, on obtient l'équation différentielle:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad (\text{A1.6})$$

avec l'équation caractéristique:

$$r^2 + \omega_0^2 = 0, \quad (\text{A1.7})$$

ayant les racines:

$$r_{1,2} = \pm i\omega_0.$$

La solution générale, dans ce cas, s'écrit sous la forme:

$$x = C_1 \sin \omega_0 t + C_2 \cos \omega_0 t, \quad (\text{A1.8})$$

où  $C_1$  et  $C_2$  sont les constantes d'intégration.

La même solution peut être écrite [ISP 97] sous la forme:

$$x = a \sin(\omega_0 t + \varphi) \quad (\text{A1.9})$$

dans laquelle

$$a = \sqrt{C_1^2 + C_2^2}$$

et

$$\text{tg} \varphi = \frac{C_2}{C_1}. \quad (\text{A1.10})$$

La détermination des constantes d'intégration est faite, en prenant les conditions initiales du mouvement:

$$t_0 = 0 \quad \begin{cases} x = x_0 \\ \dot{x} = v_0 \end{cases}, \quad (\text{A1.11})$$

qui sont remplacées dans les équations de l'espace (A1.8) et de la vitesse (la dérivée spatiale):

$$\dot{x} = C_1 \omega_0 \cos \omega_0 t - C_2 \omega_0 \sin \omega_0 t \quad (\text{A1.12})$$

On obtient ainsi les constantes d'intégration:

$$C_1 = \frac{v_0}{\omega_0}; \quad C_2 = x_0; \quad a = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{\omega_0^2}}; \quad \varphi = \text{arctg} \frac{x_0 \omega_0}{v_0} \quad (\text{A1.13})$$

L'équation du mouvement, selon (A1.8) ou (A1.9) et avec (A1.13), peut s'écrire sous l'une des formes:

$$x = \frac{v_0}{\omega_0} \sin \omega_0 t + x_0 \cos \omega_0 t \quad (A1.14)$$

ou

$$x = \sqrt{\frac{v_0^2}{\omega_0^2} + x_0^2} \sin \left( \omega_0 t + \arctg \frac{x_0 \omega_0}{v_0} \right) \quad (A1.15)$$

où:

$$\sqrt{\frac{v_0^2}{\omega_0^2} + x_0^2} = A$$

A - est l'amplitude de mouvement et:

$$\frac{x_0 \omega_0}{v_0} = \varphi_0$$

$\varphi_0$  - est la phase initiale.

### A1.2. Le mouvement vibratoire libre amorti

On considère un point matériel M de masse m (Fig. A1.3.), sur lequel agit la force élastique:

$$F_e = -kx$$

et une force de frottement visqueux:

$$F_v = -c\dot{x}$$

où c est le coefficient d'amortissement visqueux qui représente la force qui prend naissance à un déplacement relatif dans amortisseur de 1m/s. L'unité de mesure pour le coefficient d'amortissement est  $\frac{N \cdot s}{m}$ .

L'équation du mouvement de la masse m, en mouvement vibrant libre, avec un seul degré de liberté, est de la forme:

$$m \ddot{x} = -c\dot{x} - kx \quad (A1.16)$$

ou

$$m \ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0, \quad (A1.17)$$

et on peut l'écrire sous la forme [ISP 97]:

$$\ddot{x} + \frac{c}{m} \dot{x} + \frac{k}{m} x = 0 \quad (A1.18)$$

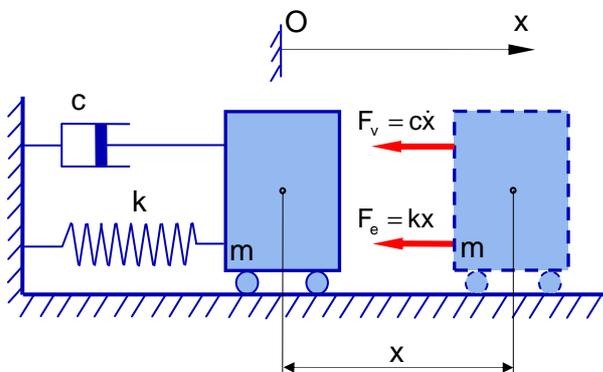


Fig. A1.3. Le mouvement vibratoire libre

En notant avec:

$$\frac{c}{m} = 2n$$

où n - est la constante d'amortissement et

$$\frac{k}{m} = \omega_0^2$$

où:

$\omega_0$  - est la pulsation propre du mouvement, on obtient l'équation différentielle:

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + \omega_0^2 x = 0. \quad (A1.19)$$

Par l'intégration de l'équation différentielle (A1.19) on obtient l'équation caractéristique:

$$r^2 + 2nr + \omega_0^2 = 0, \quad (A1.20)$$

L'équation caractéristique (A1.20) de l'équation différentielle (A1.19) a les solutions:

$$r_{1,2} = -n \pm \sqrt{n^2 - \omega_0^2}. \quad (A1.21)$$

La solution générale est une combinaison linéaire d'exponentielles:

$$x = B_1 e^{r_1 t} + B_2 e^{r_2 t} \quad (A1.22)$$

ou, en remplaçant  $r_1$  et  $r_2$ , on peut écrire:

$$x = e^{-nt} \left( B_1 e^{\sqrt{n^2 - \omega_0^2} t} + B_2 e^{-\sqrt{n^2 - \omega_0^2} t} \right) \quad (A1.23)$$

Le type du mouvement du point de masse  $m$  dépend de la nature des racines de l'équation caractéristique (A1.20).

**Cas I. L'amortissement sous-critique.** Si les racines sont complexes, il résulte que:

$$n^2 - \omega_0^2 < 0, \quad (A1.24)$$

respectivement

$$\omega_0^2 - n^2 > 0, \quad (A1.25)$$

et, on obtient ainsi les racines:

$$r_{1,2} = -n \pm i\omega_1$$

et:

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - n^2}$$

Avec ces racines on obtient la solution générale de l'équation (A1.20) sous la forme:

$$x = e^{-nt} (B_1 e^{i\omega_1 t} + B_2 e^{-i\omega_1 t}) \quad (A1.26)$$

On applique la formule d'Euler:

$$e^{\pm i\omega_1 t} = \cos \omega_1 t \pm i \sin \omega_1 t \quad (A1.27)$$

et la solution générale peut s'écrire ainsi:

$$x = e^{-nt} [(B_1 + B_2) \cos \omega_1 t + i(B_1 - B_2) \sin \omega_1 t] \quad (A1.28)$$

Si l'on utilise les notations:

$$B_1 + B_2 = C_1$$

et:

$$i(B_1 - B_2) = C_2$$

on peut mettre (A1.28) sous la forme:

$$x = e^{-nt} [C_1 \cos \omega_1 t + i C_2 \sin \omega_1 t]. \quad (A1.29)$$

En posant les conditions initiales:

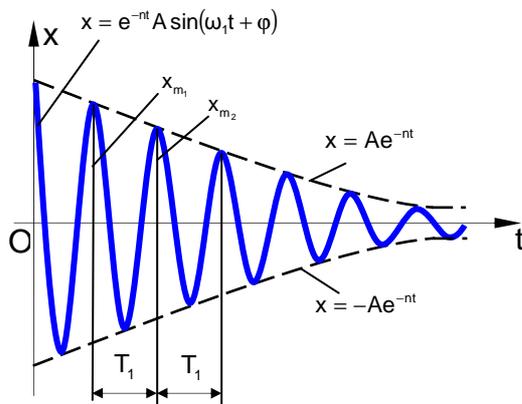
$$t_0 = 0 \begin{cases} x = x_0 \\ \dot{x} = v_0 \end{cases}$$

les constantes  $C_1$  et  $C_2$  deviennent:

$$C_1 = x_0; \quad C_2 = \frac{v_0 + nx_0}{\omega_1} \tag{A1.30}$$

L'équation du mouvement est pseudo-harmonique avec l'amplitude décroissante:

$$x = e^{-nt} \left( x_0 \cos \omega_1 t + \frac{v_0 + nx_0}{\omega_1} \sin \omega_1 t \right), \tag{A1.31}$$



**Fig. A1.4.** La représentation graphique des vibrations libres amorties avec amortissement sous-critiqué

La solution, la loi du mouvement du centre de masse  $m$ , peut s'écrire ainsi:

$$x = e^{-nt} A \sin(\omega_1 t + \varphi) \tag{A1.32}$$

dans laquelle:

$$A = \sqrt{x_0^2 + \left( \frac{v_0 + nx_0}{\omega_1} \right)^2} \tag{A1.33}$$

$$\text{tg} \varphi = \frac{\omega_1 x_0}{v_0 + nx_0}$$

La condition d'amortissement sous-critique

(A1.25) peut s'écrire:

$$\omega_0^2 - n^2 = \frac{k}{m} - \frac{c^2}{4m^2} = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{c^2}{4km}} > 0 \tag{A1.34}$$

où:

$\omega_0$  -est la pulsation du mouvement vibratoire.

La représentation graphique du mouvement décrit par l'équation (A1.32) est présentée dans la Figure A1.4.

**Cas II. L'amortissement supercritique.** Si les racines de l'équation caractéristique sont réelles, alors:

$$n^2 - \omega_0^2 = \frac{c^2}{4m^2} - \frac{k}{m} = \omega_0 \sqrt{\frac{c^2}{4km} - 1} > 0 \tag{A1.35}$$

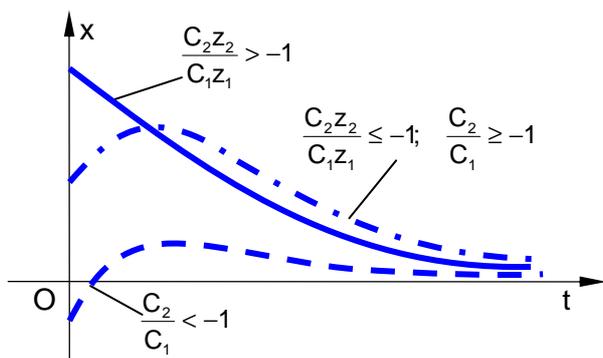
et l'équation du mouvement peut être écrite:

$$x = e^{-nt} \left( B_1 e^{\sqrt{n^2 - \omega_0^2} t} + B_2 e^{-\sqrt{n^2 - \omega_0^2} t} \right). \tag{A1.36}$$

où:

$$x = B_1 e^{-r_1 t} + B_2 e^{-z_2 t} \tag{A1.37}$$

On a noté:



**Fig. A1.5.** La représentation graphique du mouvement dans le cas d'amortissement supercritique

on obtient l'équation du mouvement sous la forme:

$$x = e^{-nt} \left( x_0 \operatorname{ch} \sqrt{n^2 - \omega_0^2} t + \frac{v_0 + nx_0}{\sqrt{n^2 - \omega_0^2}} \operatorname{sh} \sqrt{n^2 - \omega_0^2} t \right) \quad (\text{A1.38})$$

En fonction de la grandeur des paramètres  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$ , la représentation graphique du mouvement donnée par l'équation (A1.37) prend l'une des formes de la Figure A1.5.

**Cas III. L'amortissant critique.** Il se produit quand:

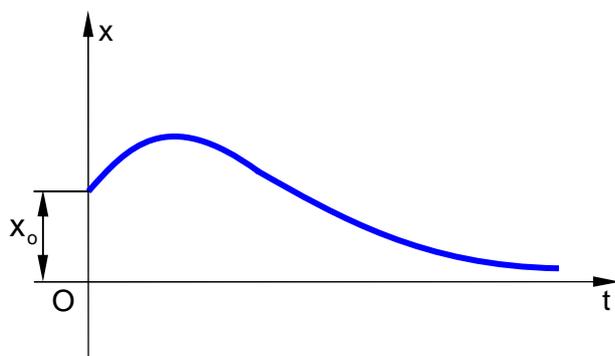
$$\omega_0^2 = n^2 \quad (\text{A1.39})$$

respectivement

$$\frac{k}{m} = \frac{c^2}{4m^2}, \quad (\text{A1.40})$$

résultant:

$$c = c_{cr} = 2\sqrt{km}. \quad (\text{A1.41})$$



**Fig. A1.6.** La représentation graphique du mouvement dans le cas d'amortissement critique

Dans ce cas, les racines de l'équation caractéristique sont les suivantes:

$$r_{1,2} = -n, \quad (\text{A1.42})$$

et l'équation du mouvement s'écrit:

$$x = e^{-nt} (C_1 t + C_2) \quad (\text{A1.43})$$

En utilisant les mêmes conditions initiales à  $t_0 = 0$ , on obtient:

$$x = e^{-nt} [(v_0 + nx_0)t + x_0] \quad (\text{A1.44})$$

Graphiquement, l'équation du mouvement se représente par une courbe de la forme montrée dans la Figure A1.6., parce que l'exponentielle décroît plus vite que l'augmentation de la fonction linéaire.

## ANNEXE A2

## L'évaluation de l'exposition humaine aux vibrations globales du corps

Extrait de la norme SR ISO 2631-1/ Février 2001

Vibrations et chocs mécaniques

Partie 1: Exigences générales

Le mode dans lequel les vibrations affectent la santé, le confort, la perception et le mal de mouvement dépendent du contenu en fréquence des vibrations. Pour différents axes de vibrations sont nécessaires différentes pondérations en fréquence.

Dans le Tableau A2.1., on trouve deux pondérations en fréquence principales, avec influence sur la santé, le confort, la perception et le mal de mouvement.

Tableau A2.1.

Guide pour l'application des courbes de pondération en fréquence pour les pondérations principales

Pondération en fréquence	Santé	Confort	Perception	Mal de mouvement
$W_k$	l'axe z, la surface du siège	l'axe z, la surface du siège l'axe z, en orthostatisme allongé vertical (à l'exception de la tête) les axes x, y, z, debout (assis)	axe z, la surface du siège axe z, en orthostatisme allongé vertical -	
$W_d$	l'axe x, la surface du siège l'axe y, la surface du siège	l'axe x, la surface du siège l'axe y, la surface du siège les axes x, y, en orthostatisme allongé horizontal axes y, z, du dossier	l'axe x, la surface du siège l'axe y, la surface du siège les axes x, y, en orthostatisme allongé horizontal	
$W_f$				Vertical

Dans le Tableau A2.2. on trouve les pondérations en fréquence supplémentaire pour les cas spéciales, avec référence sur la santé et le confort.

Tabelul A2.2.

Guide pour l'application des courbes de pondération en fréquence pour les facteurs de pondération supplémentaires

Facteur de pondération en fréquence	Santé	Confort	Perception
$W_c$	l'axe x, dossier	l'axe x, dossier	l'axe x, dossier
$W_e$		les axes $r_x, r_y, r_z$ , la surface du siège	les axes $r_x, r_y, r_z$ , la surface du siège
$W_j$		allongé vertical (la tête)	allongé vertical (la tête)

Les pondérations en fréquence incluent les filtres limiteurs de bande (passe-haut à 0,4 Hz et passe-bas à 100 Hz) qui doivent être utilisés avec les pondérations  $W_c, W_d, W_e, W_j$  et, respectivement  $W_k$ . La pondération en fréquence  $W_f$  a les filtres passe-haut et passe-bas à 0,08 Hz et, respectivement, 0,63 Hz.

Le signal peut être analysé et rapporté sous la forme de spectres d'accélération non pondérées, en bandes de largeur constante ou en bandes de largeur proportionnelle (par exemple en bandes de tiers d'octave).

L'accélération r.m.s. (Root Mean Square – la racine moyenne quadratique) pondérée en fréquence doit être déterminée à partir des pondérations et par addition correspondante des données en bandes d'étroites ou des données en bandes de tiers d'octave.

Pour la conversion des données en bandes de tiers d'octave, on doit utiliser les facteurs de pondération des Tableaux A2.3. et A2.4. L'accélération pondérée globale doit être déterminée selon la relation suivante ou de son équivalent numérique dans le domaine temporel ou dans le domaine fréquentiel:

$$a_w = \left[ \sum_i (W_i a_i)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{A2.1})$$

où:

$a_w$  - est l'accélération pondérée en fréquence;

$W_i$  – est le facteur de pondération pour la bande de tiers d'octave  $i$ , des Tableaux A2.3. et A2.4.;

$a_i$  - est l'accélération r.m.s. pour la bande de tiers d'octave  $i$ .

La valeur totale de l'accélération r.m.s. pondérée des vibrations, déterminée à partir des vibrations orthogonales est calculée par:

$$a_v = \left( k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2 \right)^{1/2} \quad (\text{A2.1})$$

où:

$a_{wx}$ ,  $a_{wy}$ ,  $a_{wz}$  - sont les accélérations r.m.s. pondérées par rapport aux axes orthogonaux  $x$ ,  $y$  et  $z$ ;

$k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  - sont les facteurs de multiplication.

Pour le confort on recommande l'utilisation de l'accélération totale des vibrations,

$a_v$ .

**Tableau A2.3.**

Pondérations principales en fréquence en bandes de tiers d'octave

Nombre de la bande de fréquence $x$	Fréquence $f$ Hz	$W_k$		$W_d$		$W_f$	
		facteur x 1 000	dB	facteur x 1 000	dB	facteur x 1 000	dB
-17	0,02					24,2	-32,33
-16	0,025					37,7	-28,48
-15	0,0315					59,7	-24,47
-14	0,04					97,1	-20,25
-13	0,05					157	-16,10
-12	0,063					267	-11,49
-11	0,08					461	-6,73
-10	0,1	31,2	-30,11	62,4	-24,09	695	-3,16
-9	0,125	48,6	-26,26	97,3	-20,24	895	-0,96
-8	0,16	79,0	-22,05	158	-16,01	1 006	0,05
-7	0,2	121	-18,33	243	-12,28	992	-0,07
-6	0,25	182	-14,81	365	-8,75	854	-1,37
-5	0,315	263	-11,60	530	-5,52	619	-4,17
-4	0,4	352	-9,07	713	-2,94	384	-8,31
-3	0,5	418	-7,57	853	-1,38	224	-13,00
-2	0,63	459	-6,77	944	-0,50	116	-18,69
-1	0,8	477	-6,43	992	-0,07	53,0	-25,51
0	1,0	482	-6,33	1 011	0,10	23,5	-32,57
1	1,25	484	-6,29	1 008	0,07		-40,02
2	1,6	494	-6,12	968	-0,28	9,98	-48,47
3	2	531	-5,49	890	-1,01		-56,19
4	2,5	631	-4,01	776	-2,20	3,77	-63,93

Continuation au Tableau A2.3.

Nombre de la bande de fréquence x	Fréquence f Hz	W <sub>k</sub>		W <sub>d</sub>		W <sub>f</sub>	
		facteur x 1 000	dB	facteur x 1 000	dB	facteur x 1 000	dB
5	3,15	804	-1,90	642	-3,85		-71,96
6	4	967	-0,29	512	-5,82	1,55	-80,26
7	5	1 039	0,33	409	-7,76		
8	6,3	1 054	0,46	323	-9,81	0,64	
9	8	1 036	0,31	253	-11,93		
10	10	988	-0,10	212	-13,91	0,25	
11	12,5	902	-0,89	161	-15,87		
12	16	768	-2,28	125	-18,03	0,097	
13	20	636	-3,93	100	-19,99		
14	25	513	-5,80	80,0	-21,94		
15	31,5	405	-7,86	63,2	-23,98		
16	40	314	-10,05	49,4	-26,13		
17	50	246	-12,19	38,8	-28,22		
18	63	186	-14,61	29,5	-30,60		
19	80	132	-17,56	21,1	-33,53		
20	100	88,7	-21,04	14,1	-36,99		
21	125	54,0	-25,35	8,63	-41,28		
22	160	28,5	-30,91	4,55	-46,84		
23	200	15,2	-36,38	2,43	-52,30		
24	250	7,90	-42,04	1,26	-57,97		
25	315	3,98	-48,00	0,64	-63,92		
26	400	1,95	-54,20	0,31	-70,12		

1) L'indice x est le nombre de la bande de fréquence selon la norme CEI 61260.

Tableau A2.4.

Pondérations supplémentaires en fréquence en bandes de tiers d'octave

Nombre de la bande de fréquence x	Fréquence f Hz	W <sub>c</sub>		W <sub>e</sub>		W <sub>f</sub>	
		facteur x 1 000	dB	facteur x 1 000	dB	facteur x 1 000	dB
-10	0,1	62,4	-24,11	62,5	-24,08	31,0	-30,19
-9	0,125	97,2	-20,25	97,5	-20,22	48,3	-26,32
-8	0,16	158	-16,03	159	-15,98	78,5	-22,11
-7	0,2	243	-12,30	245	-12,23	120	-18,38
-6	0,25	364	-8,78	368	-8,67	181	-14,86
-5	0,315	527	-5,56	536	-5,41	262	-11,65
-4	0,4	708	-3,01	723	-2,81	351	-9,10
-3	0,5	843	-1,48	862	-1,29	417	-7,60
-2	0,63	929	-0,64	939	-0,55	458	-6,78
-1	0,8	972	-0,24	941	-0,53	478	-6,42
0	1,0	991	-0,08	880	-1,11	484	-6,30
1	1,25	1 000	0,00	772	-2,25	485	-6,28
2	1,6	1 007	0,06	632	-3,99	483	-6,32
3	2	1 012	0,10	512	-5,82	482	-6,34
4	2,5	1 017	0,15	409	-7,77	489	-6,22
5	3,15	1 022	0,19	323	-9,81	524	-5,62
6	4	1 024	0,20	253	-11,93	628	-4,04
7	5	1 013	0,11	202	-13,91	793	-2,01
8	6,3	974	-0,23	160	-15,94	946	-0,48
9	8	891	-1,00	125	-18,03	1 017	0,15
10	10	776	-2,20	100	-19,98	1 030	0,26
11	12,5	647	-3,79	80,1	-21,93	1 026	0,22
12	16	512	-5,82	62,5	-24,08	1 018	0,16
13	20	409	-7,77	50,0	-26,02	1 012	0,10
14	25	325	-9,76	39,9	-27,97	1 007	0,06
15	31,5	256	-11,84	31,6	-30,01	1 001	0,00

Continuation au Tableau A2.4.

Nombre de la bande de fréquence x	Fréquence f Hz	$W_c$		$W_e$		$W_j$	
		facteur x 1 000	dB	facteur x 1 000	dB	facteur x 1 000	dB
16	40	199	-14,02	24,7	-32,15	991	-0,08
17	50	156	-16,13	19,4	-34,24	972	-0,24
18	63	118	-18,53	14,8	-36,62	931	-0,62
19	80	84,4	-21,47	10,5	-39,55	843	-1,48
20	100	56,7	-24,94	7,07	-43,01	708	-3,01
21	125	34,5	-29,24	4,31	-47,31	539	-5,36
22	160	18,2	-34,80	2,27	-52,86	364	-8,78
23	200	9,71	-40,26	1,21	-58,33	243	-12,30
24	250	5,06	-45,92	0,63	-63,99	158	-16,03
25	315	2,55	-51,88	0,32	-69,94	100	-19,98
26	400	1,25	-58,08	0,16	-76,14	62,4	-24,10

1) L'indice x est le nombre de la bande de fréquence selon la norme CEI 61260.

## ANNEXE A3

## Les paramètres de l'appareil SVAN 958

Les paramètres de l'appareil SVAN 958 pour la mesure des vibrations.

Device type	SVAN 958			
Serial No.	14647			
Internal software version	3.06			
Filesystem version	3.06			
Original file name	@RES1845			
Associated file name	Bufte_76			
Measurement hour	4:01:58 AM			
Measurement day	20/02/2010			
Device function	FFT			
Reference level for Acc	1 $\mu\text{m/s}^2$			
Reference level for Vel	1 nm/s			
Reference level for Dil	1 pm			
LEQ/RMS integration	Exponential			
Start delay	1.0 s			
Integration period	10 s			
Repetition cycle	10			
Trigger mode	Off			
VECTOR				
Vector in logger	OFF			
k1	k2	k3	k4	
OFF	OFF	OFF	OFF	
0.00	0.00	0.00	0.00	
Channel	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4
Channel input	Acc.	Acc.	Acc.	Acc.
Measurement range	17,78 $\text{m/s}^2$	17,78 $\text{m/s}^2$	17,78 $\text{m/s}^2$	17,78 $\text{m/s}^2$
Mic. field correction	---	---	---	---
Calibration factor	1.000	1.000	1.000	1.000
FFT filter	HP	HP	HP	HP
FFT window	Hanning	Hanning	Hanning	Hanning
FFT in logger	ON	ON	ON	ON
Profile Profile 1	P1	P1	P1	P1
Weighting filter	Wd	Wd	Wd	Wd
Detector type	1 s	1 s	1 s	1 s
Logger contents	Peak	Peak	Peak	Peak
	PP	PP	PP	PP
	Max	Max	Max	Max
	RMS	RMS	RMS	RMS
	VDV	VDV	VDV	VDV
Unknown blocks				
ID	0x2C			

## ANNEXE A4

## La fonction de control de l'appareil SVAN 958

L'appareil est contrôlé par l'intermédiaire à neuf touches de Keyboard. Utilisant ces touches on peut avoir accès à toutes les fonctions disponibles. Ces fonctions sont disposées en listes ou sous listes. La liste principale s'ouvre après qu'on appuie sur le bouton de MENU et contient les éléments suivants: FUNCTION, INPUT, DISPLAY, FILE, SETUP et AUXILIARY FUNCTIONS. On ne peut pas avoir accès aux plusieurs listes simultanément (Fig. A4.1.).

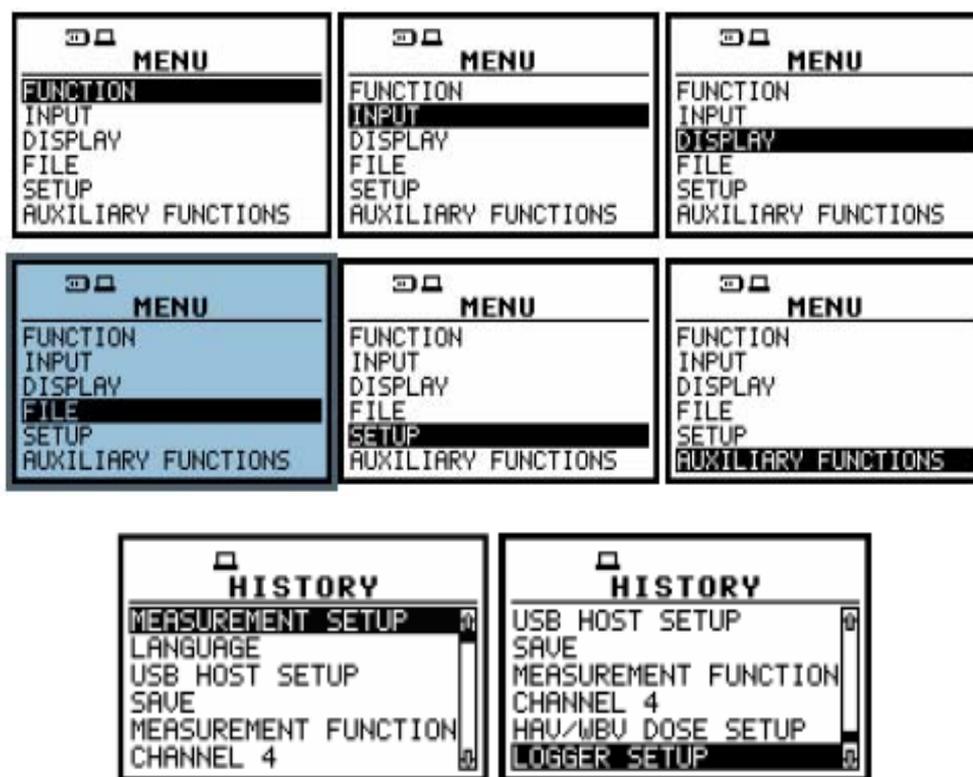


Fig. A4.1. L'affichage de la liste dans le menu principal et les sous listes [SVA 07]

## 5.3.2. La fonction d'activation optionnelle

Le dosimètre acoustique de 1/1 octave, 1/3 octave, FFT, RT60-mémoire de données, RPM-le temps d'enregistrement du signal, sont fonctions optionnelles qui élargissent les applications de l'appareil. Certaines des fonctions additionnelles sont spécifiées dans la fenêtre Measurement Function (Fig. A4.2.).

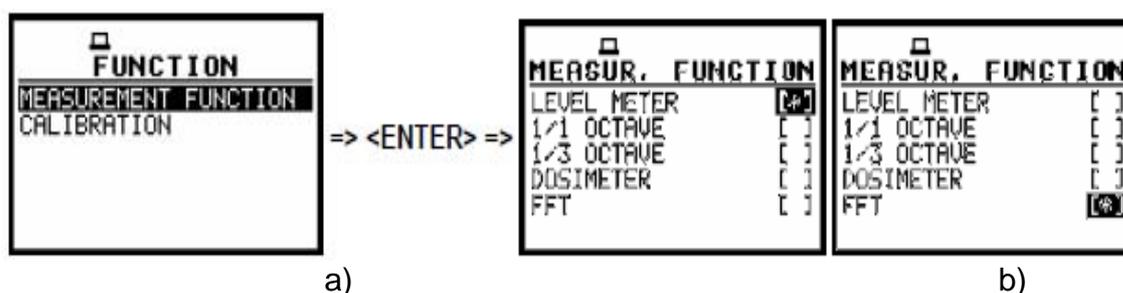


Fig. A4.2. L'ouverture de la fenêtre des mesures

La fonction est sélectionnée en écrivant un caractère spécial à droite du nom de la fonction. La position peut être changeable, en utilisant les touches ◀▶▲▼, ensuite ENTER. Toutes les mesures valables peuvent être stockées dans la mémoire interne (32 MB) ou dans une mémoire externe USB.

Dans la Figure A4.3., on présente l'interface graphique de l'appareil SVAN 958, dans le moment quand on veut avoir la réalisation d'un choix pour la mesure des vibrations (par exemple: les mesures du system main-bras, les calibrages, le choix du filtre etc.).

Le calibrage de l'instrument peut faire pour chaque canal, la sensibilité de cette opération étant comprise entre:  $10 \mu\text{V}/\text{ms}^{-2}$ – $10 \text{V}/\text{ms}^{-2}$  dans le cas des mesures de la vibration.

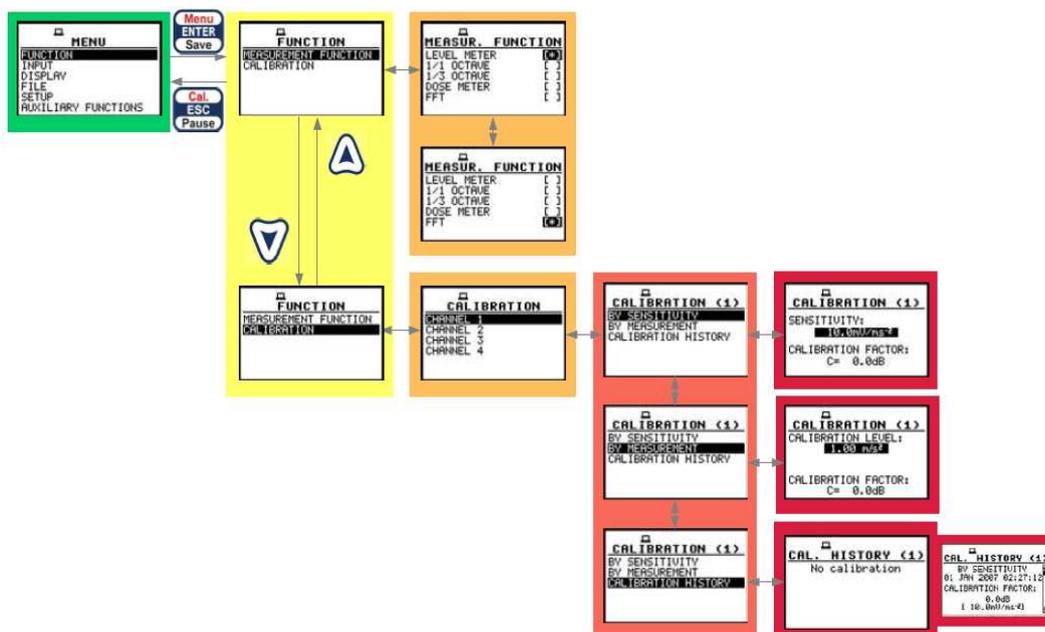


Fig. A4.3. Le diagramme fonctionnel de l'appareil SVAN 958

Les résultats obtenus après les mesures peuvent être introduites dans la base des données de tout ordinateur où seront traités les résultats obtenus utilisant l'interface illustrée dans la Figure A4.4. et le logiciel SvanPC+.

SvanPC+ détecte automatiquement l'instrument lorsqu'il est connecté par l'USB.

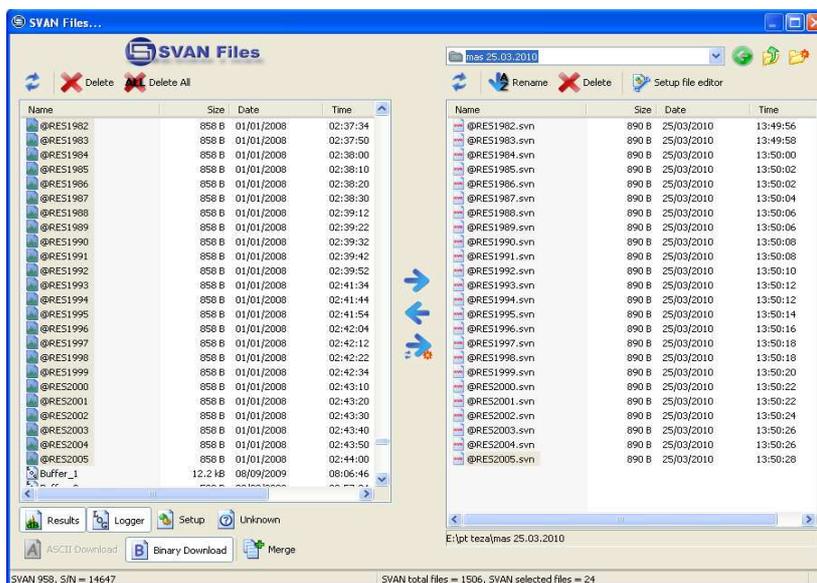
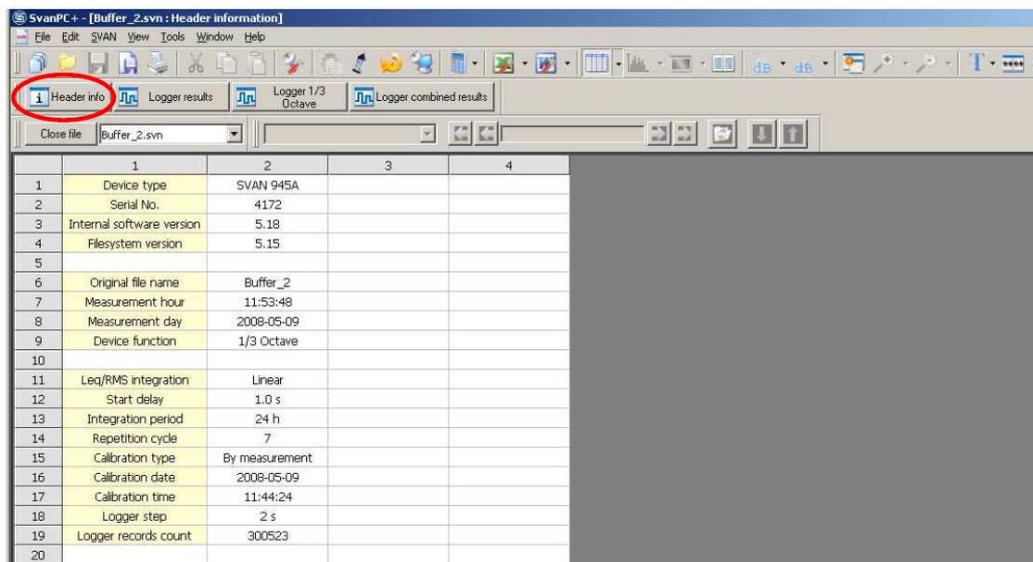


Fig. A4.4. L'interface graphique du traitement des données acquises de l'appareil sur l'ordinateur

Dans la Figure A4.5. on présente l'interface graphique de l'option "Header Info" concernant les informations de base sur le type de l'appareil, les paramètres de l'appareil pendant les mesures, le nom du fichier, la date d'acquisition etc.



	1	2	3	4
1	Device type	SVAN 945A		
2	Serial No.	4172		
3	Internal software version	5.18		
4	Filesystem version	5.15		
5				
6	Original file name	Buffer_2		
7	Measurement hour	11:53:48		
8	Measurement day	2008-05-09		
9	Device function	1/3 Octave		
10				
11	Leq/RMS integration	Linear		
12	Start delay	1.0 s		
13	Integration period	24 h		
14	Repetition cycle	7		
15	Calibration type	By measurement		
16	Calibration date	2008-05-09		
17	Calibration time	11:44:24		
18	Logger step	2 s		
19	Logger records count	300523		
20				

Fig. A4.5. L'interface graphique de l'option Header info

La liste chronologique des résultats est donnée par "Logger result" dans laquelle peuvent être affichés ces sous formes de graphiques ou Tableau (Fig. A4.6.).

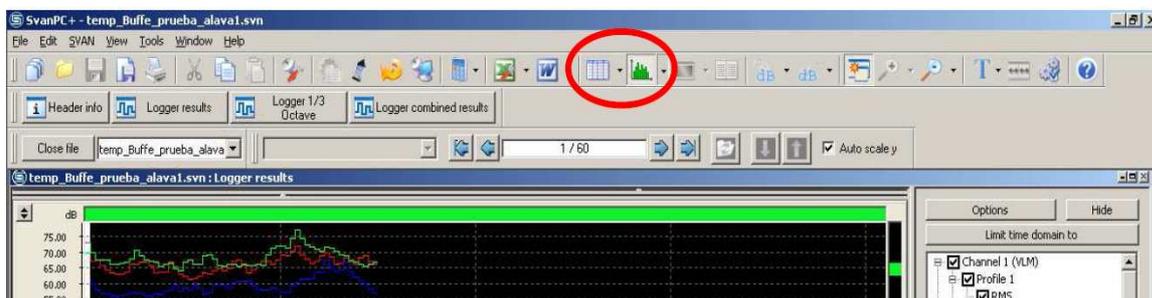


Fig. A4.6. L'interface graphique d'affichage des résultats sous forme graphique

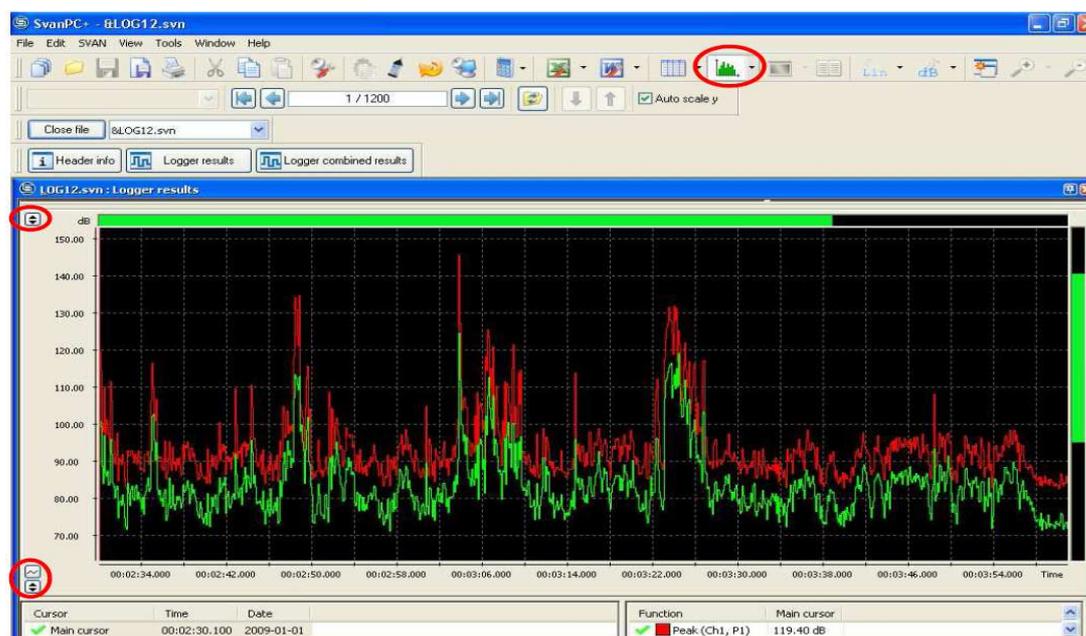


Fig. A4.7. L'interface graphique de l'affichage des résultats des sons et des vibrations

On peut sélectionner une visualisation graphique des résultats obtenus après les mesures en appuyant sur le bouton  qui se trouve à gauche en bas de l'image. On peut choisir les unités de mesure en appuyant sur , dans le cas des mesures des sons et en appuyant sur , dans le cas des mesures des vibrations (Fig. A4.7.).

Il existe la possibilité de définir différentes options pour l'affichage du graphique dans la fenêtre "Local Plot Setting", comme dans la Figure A4.8. L'utilisateur peut établir la couleur de la grille (du réseau), le style de la grille, la couleur du fond des données, les options pour le curseur principal et les blocs, les couleurs avec lesquelles on trace graphiquement les fonctions, le type des lignes, le nombre de pixels par échantillon, le choix du minimum et du maximum sur l'axe Y etc.

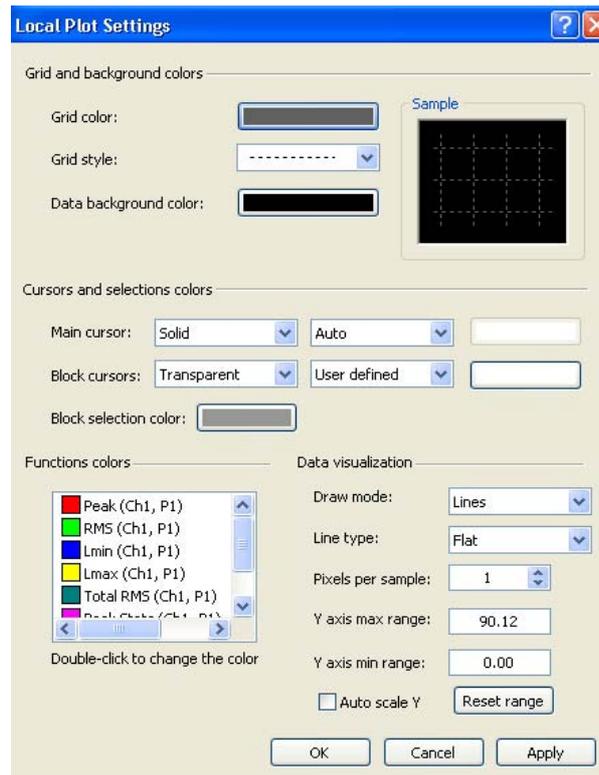
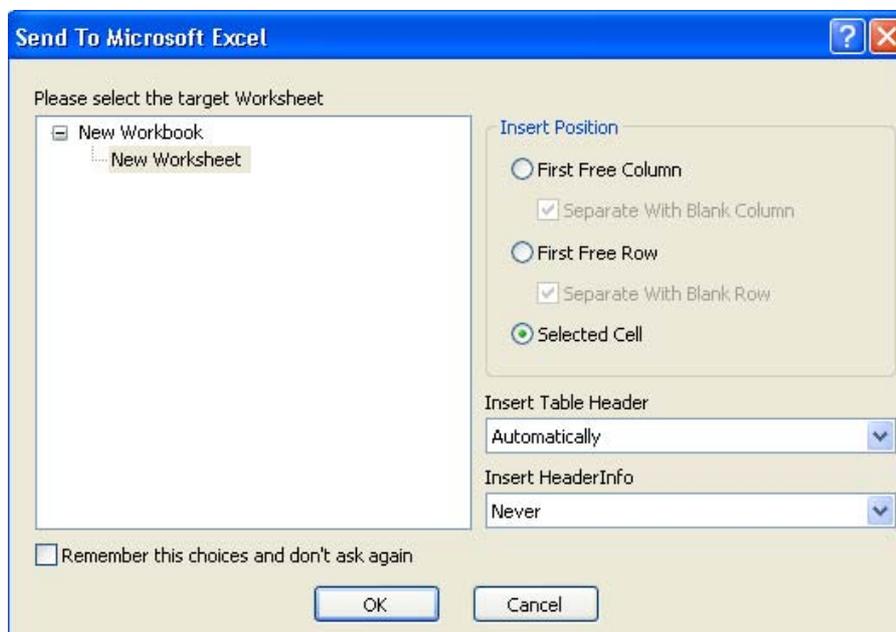


Fig. A4.8. L'interface graphique pour le choix des options d'affichage des données

NU	Date & time	Ch1	
		P1 (HP1, 1 s) Peak [dB]	P1 (HP1, 1 s) RMS [dB]
1	2009-01-01 00:02:30.100	115.43	100.70
2	2009-01-01 00:02:30.200	114.43	99.40
3	2009-01-01 00:02:30.300	113.23	98.60
4	2009-01-01 00:02:30.400	97.70	84.40
5	2009-01-01 00:02:30.500	110.00	96.90
6	2009-01-01 00:02:30.600	97.00	86.60
7	2009-01-01 00:02:30.700	101.20	85.80
8	2009-01-01 00:02:30.800	99.00	87.40
9	2009-01-01 00:02:30.900	97.30	83.60
10	2009-01-01 00:02:31.000	92.60	84.20
11	2009-01-01 00:02:31.100	111.50	96.00
12	2009-01-01 00:02:31.200	106.20	91.60
13	2009-01-01 00:02:31.300	96.40	83.60
14	2009-01-01 00:02:31.400	92.70	83.00
15	2009-01-01 00:02:31.500	89.30	80.10
16	2009-01-01 00:02:31.600	91.30	82.30
17	2009-01-01 00:02:31.700	97.60	81.20
18	2009-01-01 00:02:31.800	84.70	74.60
19	2009-01-01 00:02:31.900	90.70	79.00
20	2009-01-01 00:02:32.000	90.10	79.80
21	2009-01-01 00:02:32.100	88.90	78.00
22	2009-01-01 00:02:32.200	91.50	81.00

Fig. A4.9. L'affichage des résultats sous forme de tableaux

Les résultats obtenus après les mesures sont présentés aussi sous la forme de tableau, comme dans la Figure A4.6., en cliquant le bouton  dans la barre d'instruments principaux. Le contenu des tableaux peut être mis en format MS Excel, en cliquant sur le pictogramme  dans le menu principal, comme dans la Figure A4.10. et les graphiques sont mis en format MS Word, en cliquant sur le pictogramme destiné à MS Word.



**Fig. A4.10.** Exemple d'envoi des résultats dans MS Excel

Les principales caractéristiques du module ordinateur dans le menu principal du programme sont les suivants:

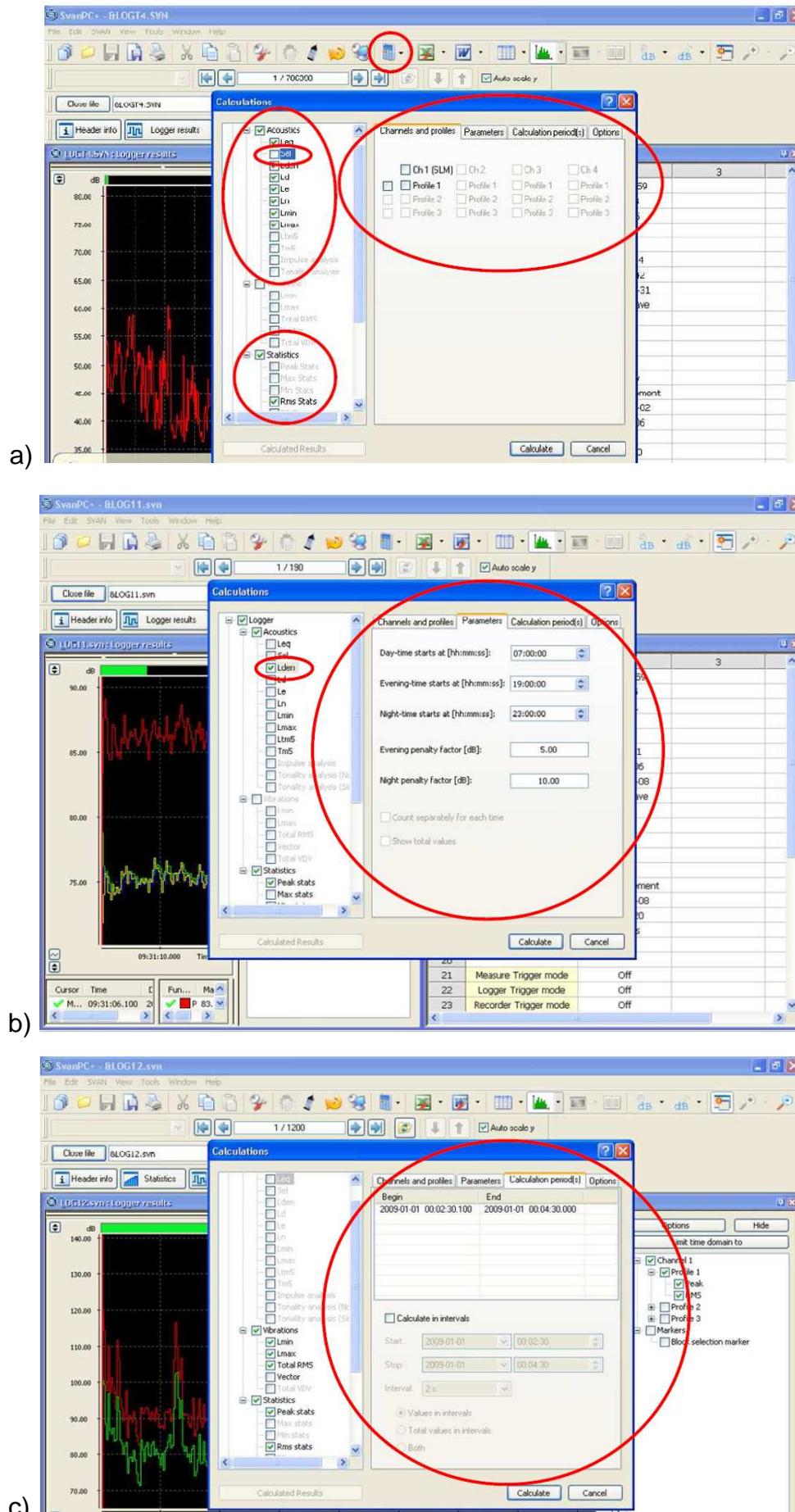
- Les calculs acoustiques et des vibrations;
- Statistique pour les fonctions de la connection des Peak, Max, Min, RMS, etc;
- Le calcul du spectre logger—de fonctions telles que: Leq, Sel, Lmin, Lmax peut être déterminée dans le spectre logger;
- Moyenne du spectre de fréquence (par exemple, à partir des blocs sélectionnés ou l'entier logger).

Les fonctions disponibles pour le calcul sont énumérées sur le côté droit de la fenêtre de l'ordinateur, comme dans la Figure A4.11. a. Toutes les fonctions sont divisées en catégories comme: les calculs acoustiques, des vibrations, les statistiques, le calcul des octaves connectées etc., on peut sélectionner la fonction désirée pour le calcul dans la catégorie présentée.

Dans la partie droite de la fenêtre sont les jeux d'options et de paramètres qui sont proposés dans le procès de calcul spécifique des fonctions. La première option contient le canal et le profil sélectionné. Avec l'option "Parameters" on peut définir les paramètres pour la fonction sélectionnée (Fig. A4.11. b).

Avec l'option "la période de calcul", l'utilisateur peut voir le point de début et de fin de tous les blocs sélectionnés ou le début et la fin de toutes les mesures quand il n'y a pas des blocs marqués. L'option "le calcul dans l'intervalle" permet d'effectuer les calculs dans la plage sélectionnée, à l'aide des intervalles prédéfinis. L'utilisateur peut définir l'heure de début et de fin de calcul et l'un des intervalles prédéfinis.

Le sous-menu "Options", contient des éléments supplémentaires, tels que: "fermer la fenêtre après de calcul" et "résultats cumulatifs".



**Fig. A4.11.** Les caractéristiques dans la barre du menu du programme Svan PC+: a) Changement de profil; b) Définition des paramètres.

## ANNEXE A5

## Modèle biomécanique du corps humain avec un degré de liberté

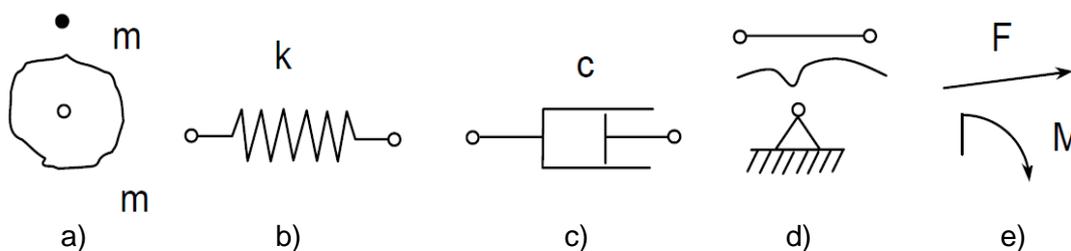
### A5.1. Modèles biomécaniques simples

Les modèles théoriques sont composés d'un système avec un nombre fini de degrés de liberté, représenté mathématiquement par des équations différentielles. Elles décrivent le comportement des modèles physiques, obtenus par le remplacement des composants du système réel avec des éléments idéalisés. Les systèmes oscillants sont composés d'éléments qui accumulent l'énergie potentielle (les ressorts), des éléments qui accumulent l'énergie cinétique (masse ou moments d'inertie massiques) et d'éléments dans lesquels il existe une dissipation continue d'énergie (amortisseurs) [TRU 09].

La vibration d'un système est un changement périodique d'énergie entre la forme cinétique et celle potentielle. Dans un mouvement de translation, les déplacements sont linéaires et dans les mouvements de rotation, les déplacements sont des mouvements angulaires [GIL].

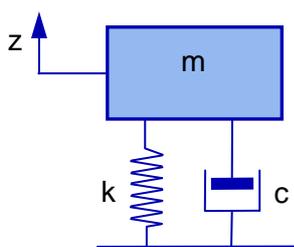
Les modèles sont constitués de:

- éléments de masse – le point matériel ou le solide rigide de masse  $m$  (Fig. A5.1, a);
- éléments élastiques – le ressort avec la constante élastique  $k$  (Fig. A5.1. b);
- éléments d'amortissement – l'amortisseur avec la constante  $c$  (Fig. A5.1. c);
- éléments de ligature – barre sans masse, fil ou articulation (Fig. A5.1. d);
- éléments perturbateurs (Fig. A5.1. e).



**Fig. A5.1.** Les éléments de la modélisation discrète

Le premier modèle biomécanique, développé par Dieckmann en 1957, est composé d'une masse, un amortisseur et un ressort (Fig. A5.2.). Il a simulé l'impédance et la fonction de réponse en fréquence du corps humain sur la direction verticale –  $z$  [FRI 00].



**Fig. A5.2.** Le modèle avec un degré de liberté

En ce qui concerne les données recueillies par Herterich et Schnauber en 1991, ils montrent que l'accélération verticale de la tête est plus grande que celle de la surface d'appui, pour les fréquences comprises entre 5 Hz et 30 Hz. Selon une étude publiée par Treier en 1997, la transmissibilité pour une personne en position l'orthocentrique est supérieure à une personne assise, dans l'intervalle de fréquences de 12-20 Hz. La transmissibilité vers la tête pour une personne assise est clairement atténuée par le siège de cette personne et non pas par la

position ou la compression de la colonne vertébrale [FRI 00].

## A5.2. La déduction des équations différentielles

Pour la déduction des équations ou des systèmes d'équations différentielles correspondants aux mouvements vibratoires des systèmes mécaniques, on peut utiliser plusieurs méthodes et/ou des théorèmes [VOI 83], [URS 98], [ARG 99], [HAR 02], [TRU 09]. Les plus couramment utilisés sont les suivants: les théorèmes fondamentaux de la dynamique pour la déduction des équations différentielles, la méthode d'équations de Lagrange, la méthode des coefficients d'influence et la méthode fondée sur le principe variationnel de Hamilton.

### A5.2.1 L'implémentation de la méthode Runge-Kutta à l'aide du logiciel mathématique

Actuellement, il existe de nombreux paquets de logiciels à l'aide desquels on peut faire des traitements numériques ou graphiques. Les plus connus et utilisés sont les suivants: Matlab, Simulink, Maple, Mathematica, MathCAD, LabVIEW.

Simulink est un logiciel utilisé pour la modélisation, la simulation et l'analyse dynamiques des systèmes [TRU 09]. Il peut traiter les systèmes linéaires et non linéaires. L'interface graphique permet la construction du modèles à l'aide des blocs. L'organisation des modèles peuvent être hiérarchique, par la création de sous-systèmes, ces derniers peuvent être explicités en double-cliquant sur le diagramme bloc de sous-système désiré.

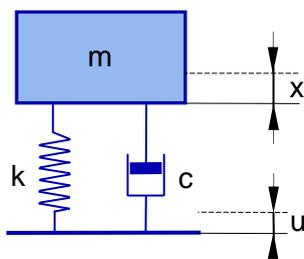
Parce que Matlab et Simulink sont intégrés l'un dans l'autre, les simulations et l'analyse des modèles utilisent à tout moment les deux programmes.

Les équations mathématiques sont éditées à l'aide des blocs et la connexion entre elles est signalée par des lignes. Les diagrammes avec les lignes forment le système dynamique [TRU 09].

## A5.3. Le modèle mathématique du corps humain avec un degré de liberté (1DOF)

Le modèle est donné comme exemple pour expliciter la modélisation du système humain main-bras.

La modélisation du corps humain peut être faite avec un modèle plus simple ou plus complexe, en fonction du but de la modélisation. Ici on présente un modèle mécanique simplifié du corps humain, debout sur une plate-forme, que vibre en même temps que le corps. Le modèle présente un degré de liberté (Fig. A5.3.).



**Fig. A5.3.** Le modèle avec un degré de liberté, excité par le mouvement du support.  
Modèle 1DOF

L'excitation du système montré dans la Figure A5.3., est un mouvement  $u(t)$ , de son support. L'équation différentielle du mouvement est:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{u}) + k(x - u) = 0 \quad (\text{A5.1})$$

On considère le mouvement du support harmonique, définie par l'équation:

$$\dot{u} = u_0 \sin \omega t$$

de [HAR 02].

En dérivant cette équation on obtient:

$$u = u_0 \omega \cos \omega t.$$

L'équation mathématique correspondante du mouvement du corps devient:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = \dot{c}u + ku \quad (\text{A5.2})$$

ou

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = cu_0 \omega \cos \omega t + ku_0 \sin \omega t \quad (\text{A5.3})$$

où:

$m = 73,6 \text{ kg}$  –représente la masse du corps humain de référence [MAT 03];

$c = 3797,76 \text{ Ns/m}$  –représente le coefficient d'amortissement entre le corps et la plate-forme vibrante [MAT 03];

$k = 98620 \text{ N/s}$  –représente la constante d'élasticité entre le corps et la plate-forme vibrante [MAT 03];

$\ddot{x}, \dot{x}, x$  –sont: l'accélération, la vitesse et, respectivement, le déplacement de la masse  $m$ ;

$\dot{c}u + ku$  –représente la valeur du signal d'entrée à la base du modèle, signal composé de deux fonctions harmoniques:

$$ku = ku_0 \sin \omega t = 98620,3 \cdot 10^{-3} \sin \omega t = 295,86 \sin \omega t \quad (\text{à peu près de } 296),$$

$$\dot{c}u = cu_0 \omega \cos \omega t = 3797,76 \cdot 10^{-3} \cdot 26,17 \cos \omega t = 298,16 \cos \omega t \quad (\text{à peu près de } 298),$$

dans lequel:

$$-\omega = 2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 4,16 = 26,17,$$

–  $f = 4,16 \text{ Hz}$  –est la fréquence de vibration (valeur provenant des mesures)

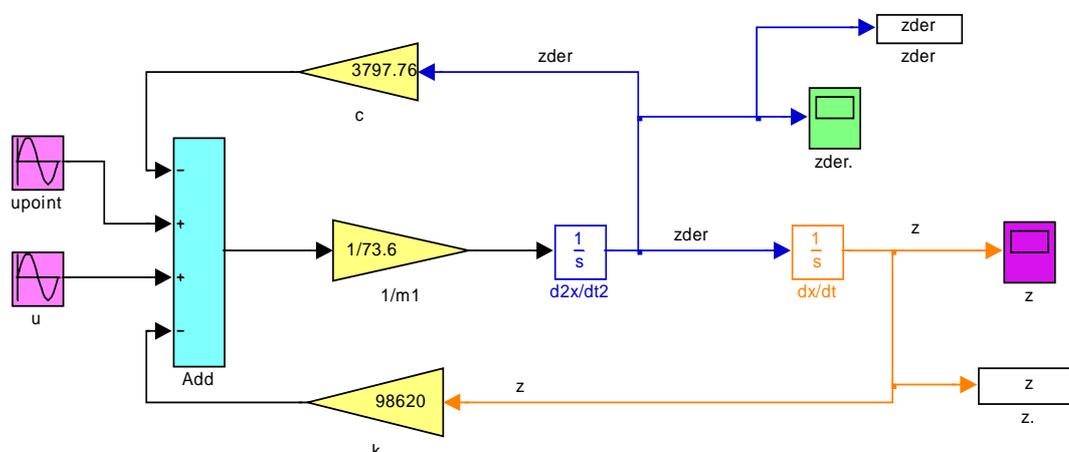
–  $u_0 = 3 \cdot 10^{-3}$  –est l'amplitude du déplacement (valeur provenant des mesures).

Afin d'implémenter l'équation dans le programme Simulink, on a fait la transformation suivante:

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} (cu + ku - c\dot{x} - kx) \quad (\text{A5.4})$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{m} [cu_0 (\omega \cos \omega t) + k(u_0 \sin \omega t) - c\dot{x} - kx] \quad (\text{A5.5})$$

Le programme Simulink pour l'équation (A5.5) est illustré dans la Figure A5.4.



**Fig. A5.4.** Le diagramme fonctionnel du modèle mathématique 1DOF

À l'entrée il y a les deux fonctions harmoniques. À la sortie, le bloc de fonction sinusoïdale redonne une valeur calculée par la formule (A5.6):

$$O(t) = \text{Amp} \cdot \text{Sin}(\text{Freq} \cdot t + \text{Phase}) \quad (\text{A5.6})$$

où: Amp – est l'amplitude du mouvement;  
 Sin – représente la fonction sinus;  
 Freq = 4,16 [rad/sec] – est la fréquence (valeur provenant des mesures);  
 t – est le temps de simulation (on le selecte pour chaque simulation);  
 Phase – est la phase ( $\varphi$ ), [rad].  $\varphi = 0$  pour  $ku_0 \sin \omega t$  et  $\varphi = \pi/2$  pour  $cu_0 \omega \cos \omega t$   
 parce que la fonction cos est déphasée par rapport à la fonction sin de  $\pi/2$ .

La fonction Matlab pour l'intégration numérique des équations différentielles est ode45. Elle implémente la méthode Runge-Kutta d'ordre 4,5. La syntaxe de cette fonction est [TRU 09]:

$$[t,y] = \text{ode45}(\text{odefun}, \text{tspan}, \text{y0}) \quad (\text{A5.7})$$

où on a:

- **odefun** – est une fonction qui évalue les termes de droite de l'équations différentielles (dans l'équation (A4.5));
- **tspan** – est un vecteur qui spécifie l'intervalle d'intégration [t0, tf];
- **y0** – est un vecteur colonne contenant les conditions initiales.

Les paramètres du bloc source correspondants au signal d'entrée peut se voir dans la Figure A4.5.

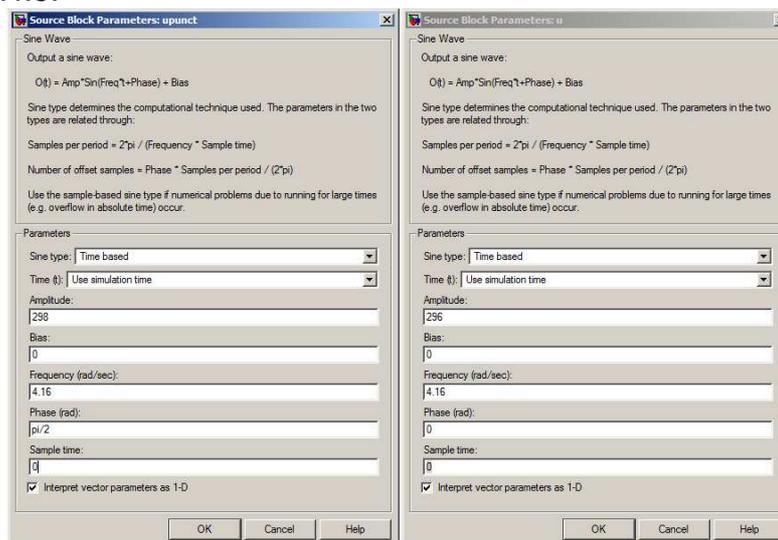


Fig. A5.5. Les paramètres du signal d'entrée

La Figure A4.6. correspond à une variation de la vitesse dans le temps et à côté d'elle on trouve le programme source créé pour la représentation graphique.

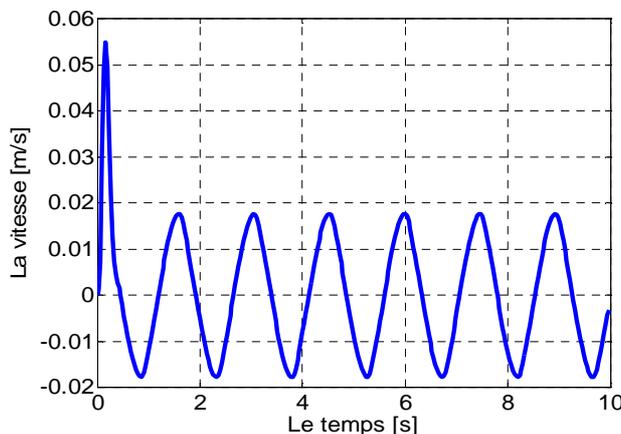
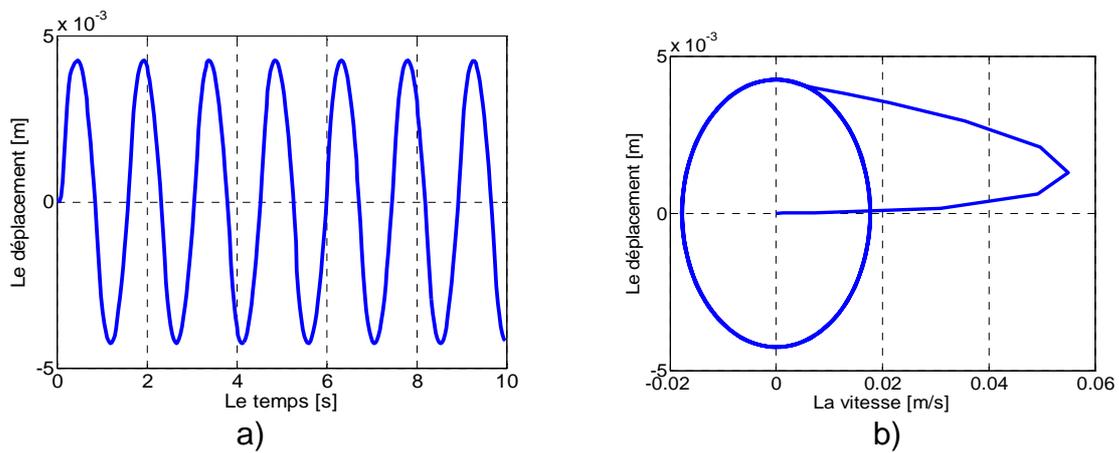


Fig. A5.6. La variation de la vitesse en temps. Modèle 1DOF

```
function createfigure(Y1)
%CREATEFIGURE(Y1)
% Y1: vector of y data
% Create figure
figure1 =
figure('PaperSize',[20.98
29.68]);
% Create axes
axes('Parent',figure1);
box('on');
hold('all');
% Create plot
plot(Y1);
% Create xlabel
xlabel('timp');
% Create ylabel
ylabel('viteza');
```



**Fig. A5.7.** Le diagramme pour le modèle 1DOF

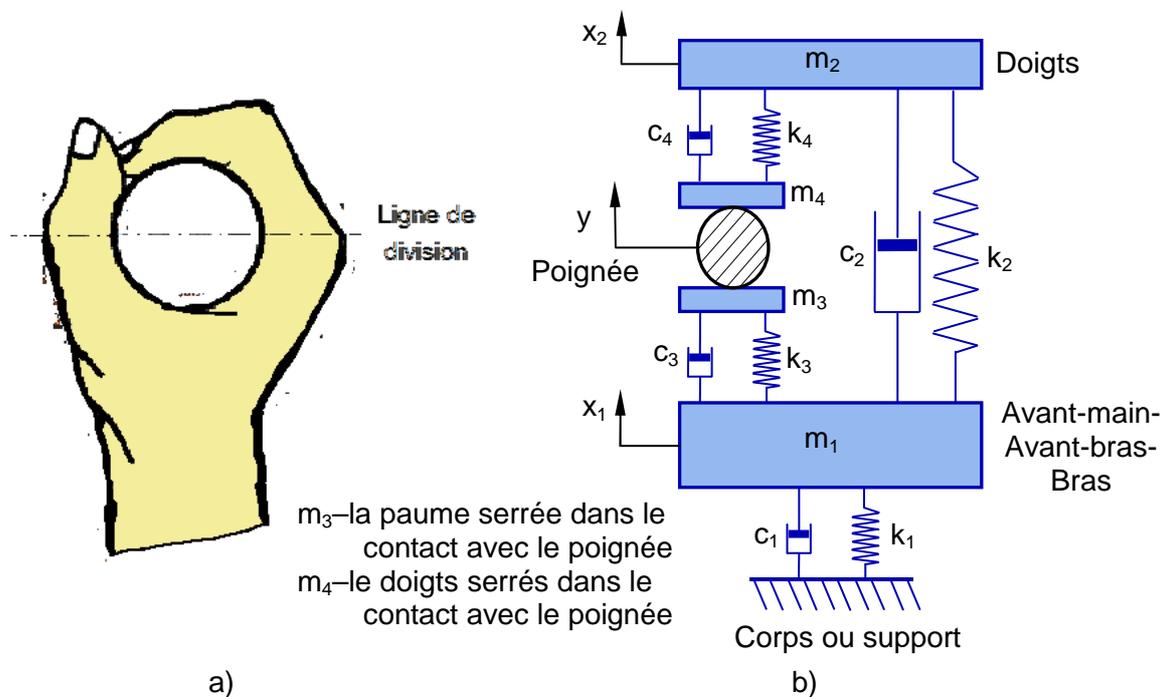
En tenant compte de l'amplitude du déplacement d'entrée:

$$u_0 = 3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

le déplacement d'à peu près  $4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$  pour le corps entier (Fig. A5.7. a) représente un déplacement acceptable, mais seulement dans le cas de la machine ou des outils qui transmettent des vibrations grandes.

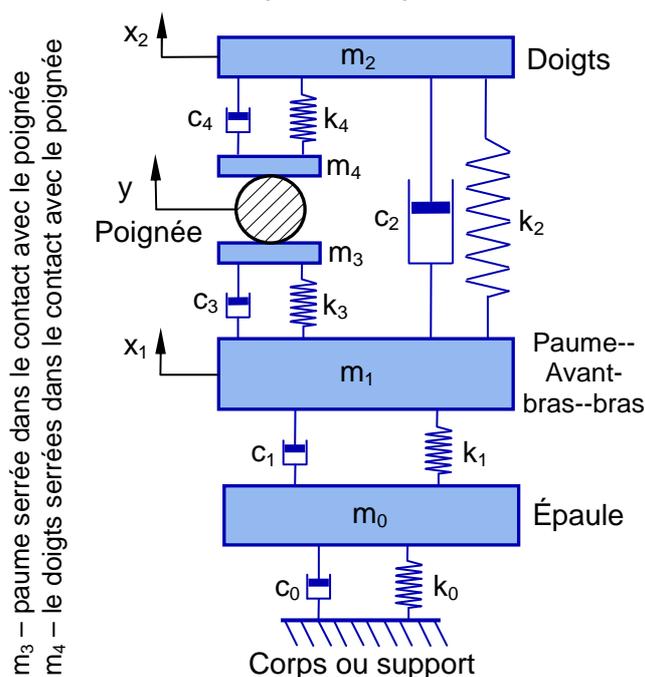
## ANNEXE A6

## Le modèle biomécanique du système humain main-bras avec quatre degrés de liberté et avec cinq degrés de liberté



**Fig. A6.1.** La force de serrage de la main et un modèle 4-EPDB de représentation du système humain doigts-main-bras. a) La force de la main sur un support cylindrique; b) Le modèle 4-EAAB.

La Figure A6.1 présente un modèle avec quatre degrés de liberté du système humain main-bras, pendant que la main serre ou pousse un outil à main. On représente cela par une structure métallique, qui est appliquée pour dériver deux modèles biodynamiques différents. La main est divisée, en mode virtuel, en deux parties: les doigts et la structure paume--avant-bras--bras, résultant un système dynamique à quatre degrés de liberté.



**Fig. A6.2.** Le modèle 5-EPDA de représentation du système Paume-Doigts-Avant-bras-Epaule

Les doigts positionnés sur la mi-poignée sont représentés par deux masses effectives ( $m_4$  et  $m_2$  couplées par l'intermédiaire des ressorts avec les coefficients d'élasticité -  $k_4$  et les coefficients d'amortissement visqueux -  $c_4$ ). De même, la structure paume--avant-bras--bras est représentée par deux masses  $m_3$  et  $m_1$  couplées par l'intermédiaire des ressorts avec des coefficients d'élasticité  $k_3$  et d'amortissement  $c_3$ . Deux paires d'éléments additionnels

d'amortissement linéaire couplent les masses  $m_2$  et  $m_1$ , et  $m_1$  au corps/épaule (considéré comme un support fixe).

La Figure 7.2. présente le modèle avec cinq degrés de liberté 5-EPDAE, du système humain main-bras. C'est similaire à celui à quatre degrés de liberté, à l'exception des éléments supplémentaires  $m_0$ ,  $k_0$  et  $c_0$ , représentant la structure supérieure du bras et de l'épaule.

Les équations du mouvement des modèles sont utilisées pour calculer les forces dynamiques développées par les doigts et la paume,  $F_{\text{doigts}}$  et  $F_{\text{paume}}$ , respectivement dues au déplacement sur l'axe  $y$  de la poignée. Le point de commande biodynamique, nommé DPBRs, est caractérisé par l'impédance mécanique (IM) de la surface entre les doigts et le système paume-poignée. En fonction de la formule d'excitation :

$$y = Y e^{j\omega t}$$

l'impédance distribuée, notée  $z_{\text{doigts}}$  et  $z_{\text{paume}}$ , a la dérivée de la forme :

$$z_{\text{doigts}}(j\omega) = \frac{F_{\text{doigts}}(j\omega)}{v(j\omega)} = \frac{(k_4 + j\omega c_4)(Y - X_2)}{j\omega Y} + j\omega m_4 \quad (\text{A6.1})$$

$$z_{\text{paume}}(j\omega) = \frac{F_{\text{paume}}(j\omega)}{v(j\omega)} = \frac{(k_3 + j\omega c_3)(Y - X_1)}{j\omega Y} + j\omega m_3 \quad (\text{A6.2})$$

où :

$v = j\omega Y$  -est la vitesse de la poignée correspondante à la fréquence d'excitation  $\omega$  et  $x_1$  et  $x_2$  sont les amplitudes des réponses du déplacement de  $m_1$  et, respectivement,  $m_2$ . L'impédance mécanique IM de l'ensemble du système main-bras ( $z_{\text{main}}$ ) est calculée par la formule:

$$z_{\text{main}} = \frac{F_{\text{main}}}{v} = \frac{F_{\text{doigts}} + F_{\text{paume}}}{v} = F_{\text{doigts}} + F_{\text{paume}} \quad (\text{A6.3})$$

Les réponses mesurées et distribuées aux doigts et à la paume ont été ainsi, de loin, rapportées à une seule étude, qui a été divisée en six sujets et quatre actions différentes de la main (seulement pris dans la main, une combinaison entre pris et poussé, juste pris, juste tiré), en utilisant la position des mains selon la norme ISO 10819. Celles-ci ont été mesurées à l'aide d'une poignée divisé en segments de 40mm, dans un état de vibration de 10 fréquences discrètes dans la gamme de 16-1000 Hz. Elles ont été utilisées pour identifier les paramètres des modèles proposés, en minimisant des variations  $\Delta$  des accélérations r.m.s. entre l'impédance mécanique IM théorique et les données expérimentales et elles ont été appelées la fonction d'erreur  $E(x)$ :

$$E(x) = \text{Re}[\Delta z_{\text{doigts}}(j\omega)] + \text{Im}[\Delta z_{\text{doigts}}(j\omega)] + \text{Re}[\Delta z_{\text{paume}}(j\omega)] + \text{Im}[\Delta z_{\text{paume}}(j\omega)] \quad (\text{A6.4})$$

où:

Re et Im—désignent les composantes réelles et imaginaires de l'impédance pour chacun en partie;

$\Delta z_{\text{doigts}}$  et  $\Delta z_{\text{paume}}$ —sont des variations entre l'impédance mécanique IM théorique et celle mesurée, distribuée de la main aux doigts, respectivement, correspondantes à la fréquence d'excitation  $\omega$ ;

$x$ —est le vecteur des paramètres de projection de chaque modèle (Fig. A6.1. et A6.2.).

Le paramètre d'identification du processus a été interprété selon les conditions suivantes:  $m_i \geq 0$ ;  $k_i \geq 0$ ;  $c_i \geq 0$  et  $m_{0i} < 10$  Kg. Un altgorithme interactif a été développé pour minimiser  $E(x)$  par divers paramètres de manière séquentielle, en temps alors que d'autres ont été maintenus à leur dernières valeurs actuelles.

Un cycle de répétition est complet quand tous les paramètres ont été mis à jour et la convergence est atteinte lorsque la différence entre l'erreur des amplitudes de deux cycles consécutifs est de moins de 0,01Ns/m. Le processus d'identification a été répété en tenant compte de plus de cinq vecteurs, initial différents. Tous les tests se sont approchés des solutions similaires, en suggérant l'unicité de la solution.

Le Tableau A6.1. montre les paramètres identifiés par le modèle 4-EAAB, pour les quatre actions de la main, avec leurs fréquences naturelles.

Tableau A6.1.

Les paramètres pour le modèle 4-EAAB

Paramètre	Unité	La condition de contact de la main (50N appliqué dans cette action)			
		Force	Force + Pousser	Pousser	Traction
$m_1$	Kg	1,4329	1,4145	1,1043	0,9337
$m_2$	Kg	0,0897	0,0820	0,3110	0,0957
$m_3$	Kg	0,0230	0,0267	0,0246	0
$m_4$	Kg	0,0147	0,0140	0	0,0143
$k_1$	N/m	3377	4207	953	102
$k_2$	N/m	12,710	6523	1569	23,934
$k_3$	N/m	29,906	58,555	43,177	0
$k_4$	N/m	190,041	207,964	1760	187,458
$c_1$	Ns/m	50,6	85,9	74,3	69,9
$c_2$	Ns/m	35,2	37,9	2,0	44,1
$c_3$	Ns/m	74,5	118,3	99,3	0
$c_4$	Ns/m	127,6	120,8	4,2	110,5
$*f_1$	Hz	28	35	16	24
$*f_2$	Hz	239	257	32	237

\* $f_1$  et \* $f_2$  sont les fréquences naturelles non amorties du modèle.

Le Tableau A6.2. résume les paramètres identifiés pour le modèle 5-EPDA, pour les quatre actions de la main, ainsi que leurs fréquences naturelles. À l'exception de  $m_0$ ,  $k_0$ ,  $c_0$ ,  $k_1$ ,  $c_1$  et  $f_0$ , les autres sont comparables à ceux du modèle 4-EAAB.

Tableau A6.2.

Les paramètres pour le modèle 5-EPDAE

Paramètre	Unité	La condition de contact de la main (50N appliquée dans cette action)			
		Force	Force + pousser	Pousser	Traction
$m_0$	Kg	5,0516	6,0887	2,5941	1,7008
$m_1$	Kg	1,4295	1,4197	0,9125	0,8435
$m_2$	Kg	0,0887	0,0818	0,3416	0,0982
$m_3$	Kg	0,0229	0,0266	0,0247	0
$m_4$	Kg	0,0150	0,0140	0	0,0137
$k_0$	N/m	149,490	9425	17,713	7226
$k_1$	N/m	1726	5382	834	3512
$k_2$	N/m	12,075	6347	1583	24,107
$k_3$	N/m	29,898	57,535	46,279	0
$k_4$	N/m	195,665	208,489	1763	167,117
$c_0$	Ns/m	87,2	97,5	1,2	2,1
$c_1$	Ns/m	64,9	77,0	91,66	57,7
$c_2$	Ns/m	36,3	38,0	0,4	37,3
$c_3$	Ns/m	74,8	118,4	95,1	0
$c_4$	Ns/m	126,0	120,6	4,7	110,8
$*f_0$	Hz	27	8	13	13
$*f_1$	Hz	28	35	16	30
$*f_2$	Hz	245	258	37	222

\* $f_1$  et \* $f_2$  sont les fréquences naturelles non amorties du modèle.

Dans le Tableaux A6.3. sont comparées les amplitudes des erreurs r.m.s. et la phase des amplitudes effectives, réelles, pour les modèles 4-EAAB et 5-EPDAE. Les résultats montrent que le modèle 5-EPDAE a, généralement, moins d'erreurs que le modèle 4-EPDB.

Tabelul A6.3.

Comparaison des valeurs d'erreurs r.m.s du modèles 4-EPDB et 5-EPDA

Location	Composant d'impédance	La condition de contact de la main (50N appliquée dans cette action)							
		Force		Force + pousser		Pousser		Traction	
		4-D	5-D	4-D	5-D	4-D	5-D	4-D	5-D
Doigts	Amplitude (Ns/m)	7,96	7,18	7,17	7,12			11,29	9,43
	Phase (degré)	5,31	5,77	3,98	3,82			5,65	4,61
Paume	Amplitude (Ns/m)	9,87	8,96	9,76	10,22	9,68	9,98		
	Phase (degré)	6,64	6,17	4,51	4,49	6,11	5,16		
Main	Amplitude (Ns/m)	12,11	11,51	15,87	16,03				
	Phase (degré)	5,75	5,64	3,07	3,03				

## ANNEXE A7

## La mesure des vibrations sur l'avant-bras avec le vibromètre SVAN 958 et par la méthode Moiré de projection

### A7.1. La mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge du tour SNA 500x1000 avec le vibromètre SVAN 958

Les valeurs qui ont résulté suite aux mesures avec le vibromètre SVAN 958 sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti de la machine-outil, à la vitesse de rotation de 800 rot/min, sont données dans les Tableaux A7.1., A7.2. et A7.3., elles ont été effectuées sur chaque canal.

Tableau A7.1.

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Ox

Canal 1 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.03556	0.06554	0.01778	0.01112	0.02713
2	0.02272	0.04046	0.01296	0.00776	0.01585
3	0.02667	0.05064	0.01309	0.00990	0.02262
4	0.02160	0.03648	0.00972	0.00677	0.01474
5	0.02861	0.05489	0.01401	0.01000	0.02366
6	0.02382	0.04232	0.01058	0.00784	0.01813

Tableau A7.2.

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Oy

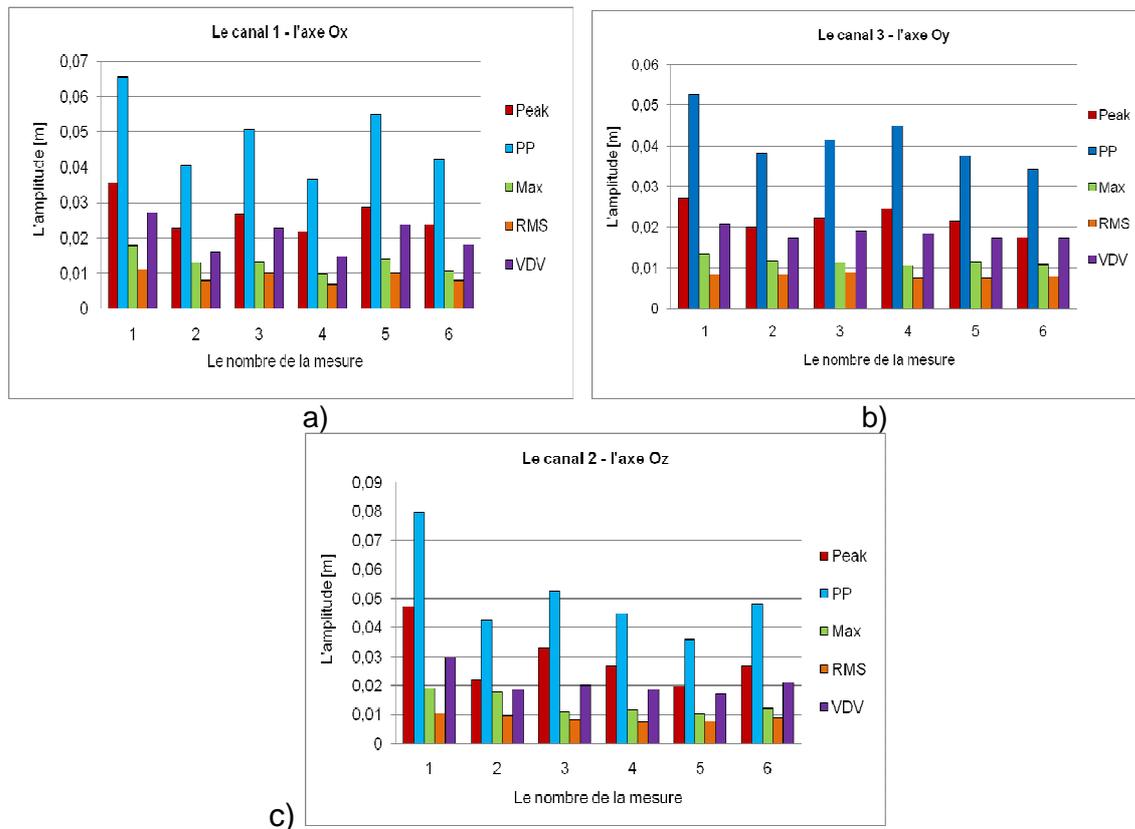
Canal 3 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02726	0.05266	0.01354	0.00848	0.02082
2	0.02007	0.03815	0.01163	0.00838	0.01742
3	0.02228	0.04154	0.01138	0.00887	0.01921
4	0.02460	0.04487	0.01079	0.00772	0.01851
5	0.02163	0.03754	0.01155	0.00761	0.01736
6	0.01760	0.03436	0.01091	0.00794	0.01732

Tableau A7.3.

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Oz

Canal 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.04732	0.07962	0.01895	0.01041	0.02965
2	0.02195	0.04256	0.01770	0.00955	0.01847
3	0.03292	0.05248	0.01090	0.00805	0.02009
4	0.02664	0.04472	0.01174	0.00730	0.01864
5	0.01988	0.03577	0.01026	0.00763	0.01696
6	0.02667	0.04803	0.01208	0.00888	0.02097

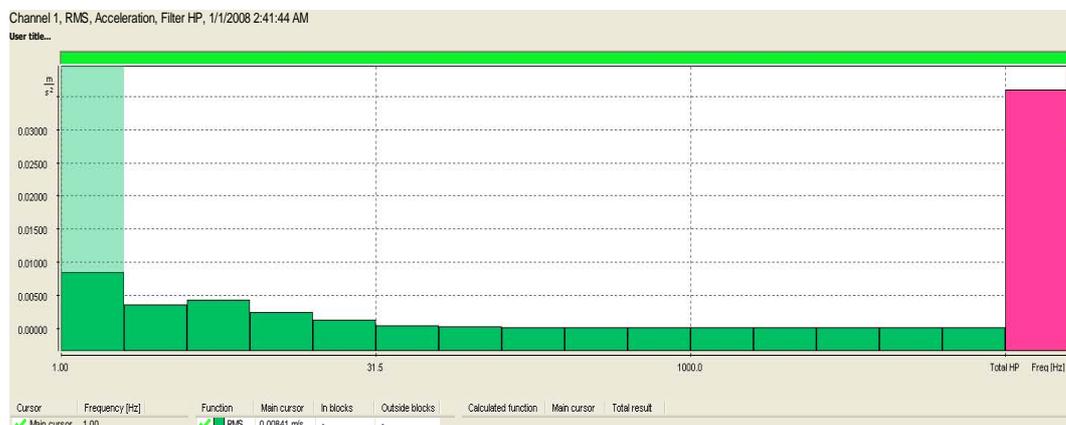
Les Figures A7.1. a, b, c, présentent les mesures des vibrations mécaniques effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les directions Ox (Fig. A7.1. a), Oy (Fig. A7.1. b) et Oz (Fig. A7.1. c).



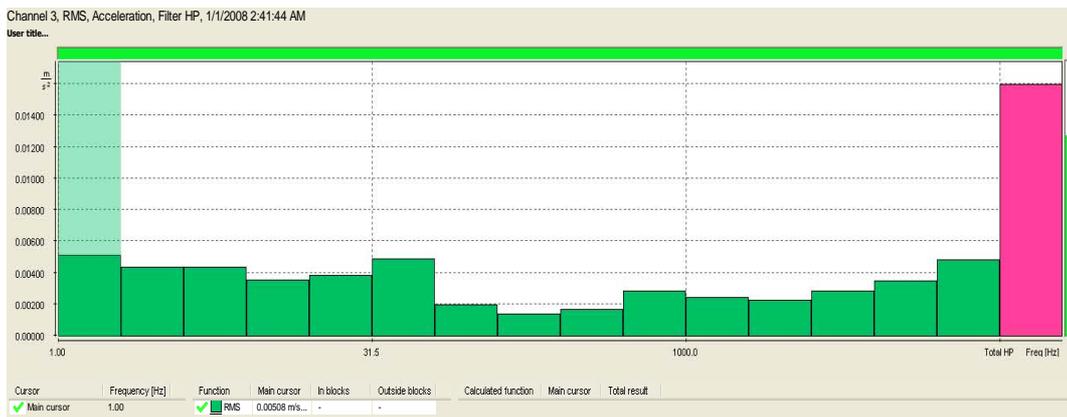
**Fig. A7.1.** Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [ $\text{m/s}^2$ ] et VDV [ $\text{m/s}^2$ ] correspondantes aux mesures effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les axes Ox, Oy et Oz

Si on compare les résultats d'après les trois directions de propagation Ox, Oy et Oz, on peut observer, dans les Figures A7.1. a, b et c, réalisées à l'aide les valeurs des Tableaux A7.1., A7.2. et A7.3., que d'après la direction Oz est la plus grande amplitude, c'est-à-dire les vibrations transmises se ressentent le plus fort sur la direction Oz, au fonctionnement au ralenti de la machine-outil.

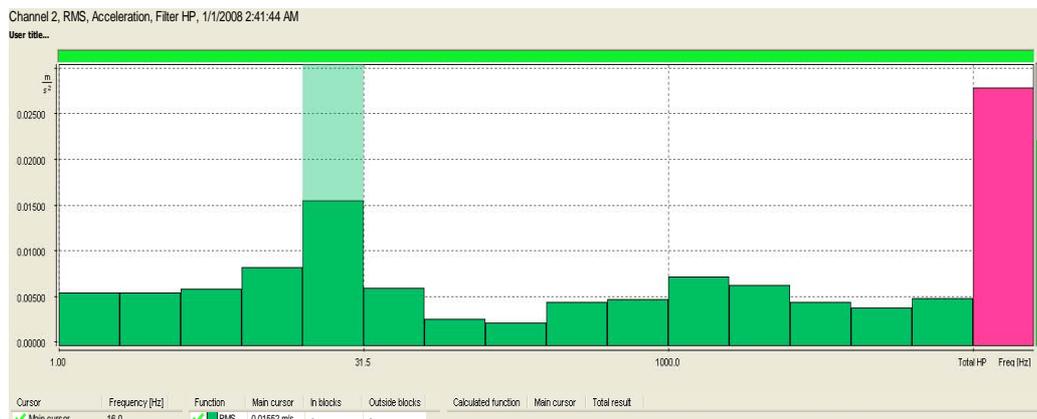
Dans les Figure A7.2., A7.3. et A7.4. sont donnés les spectres d'accélération pour les mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux du vibromètre.



**Fig. A7.2.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. A7.3.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



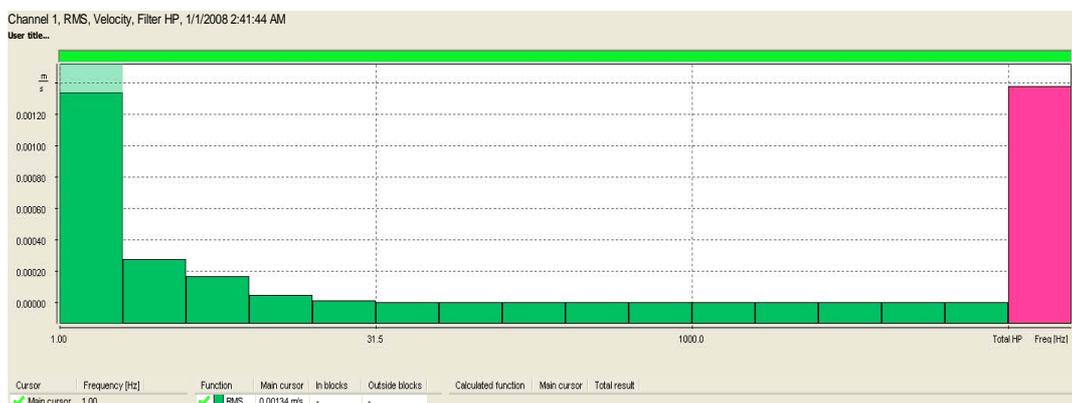
**Fig. A7.4.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Ox est de  $0,00841 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

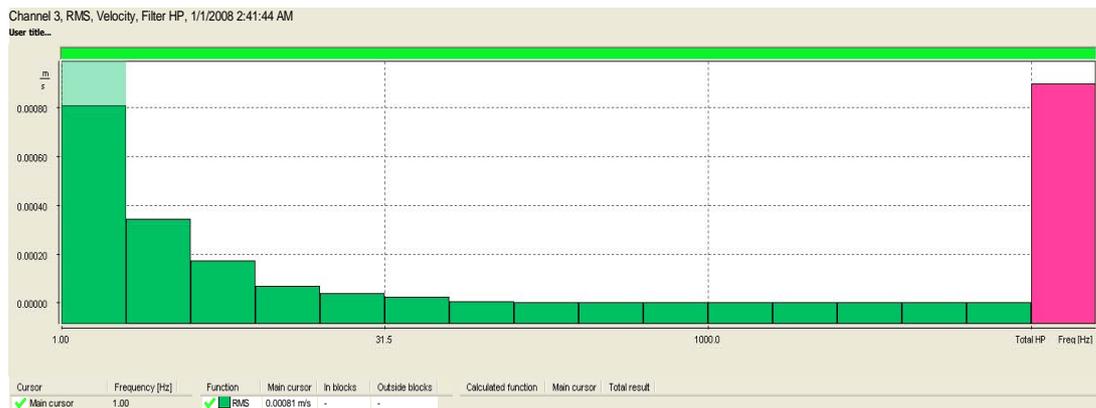
La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oy est de  $0,00508 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oz est de  $0,01552 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 16 Hz.

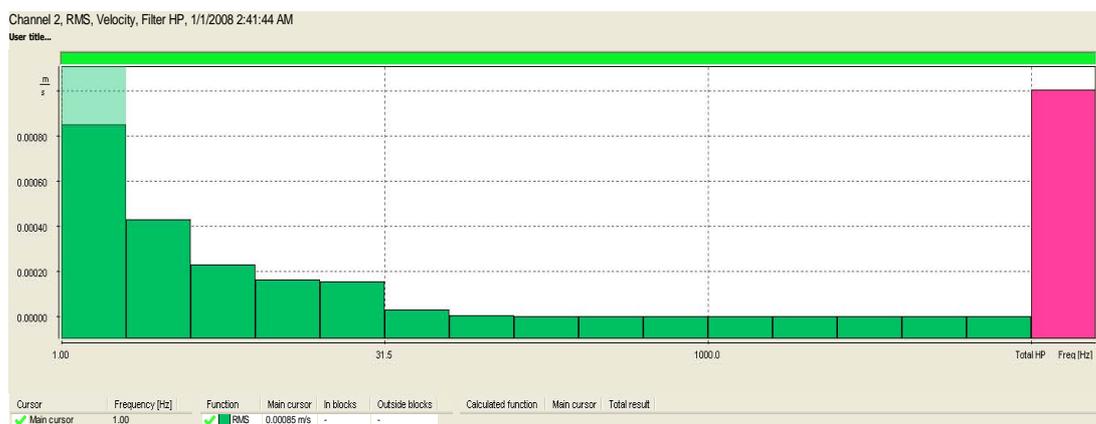
Dans les Figures A7.5., A7.6. et A7.7. sont donnés les spectres des vitesses pour les mesures effectuées à l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux de l'appareil. Les vitesses ont été obtenues par l'intégration des accélérations.



**Fig. A7.5.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. A7.6.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



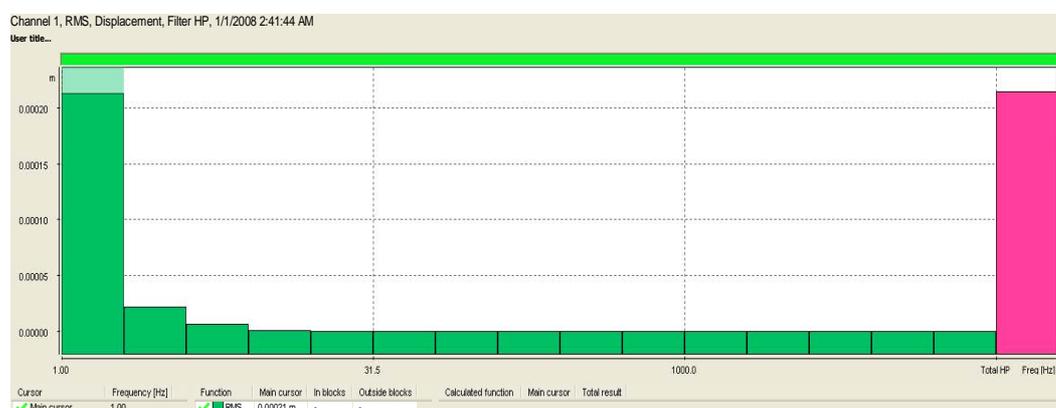
**Fig. A7.7.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Ox est de 0,00134 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

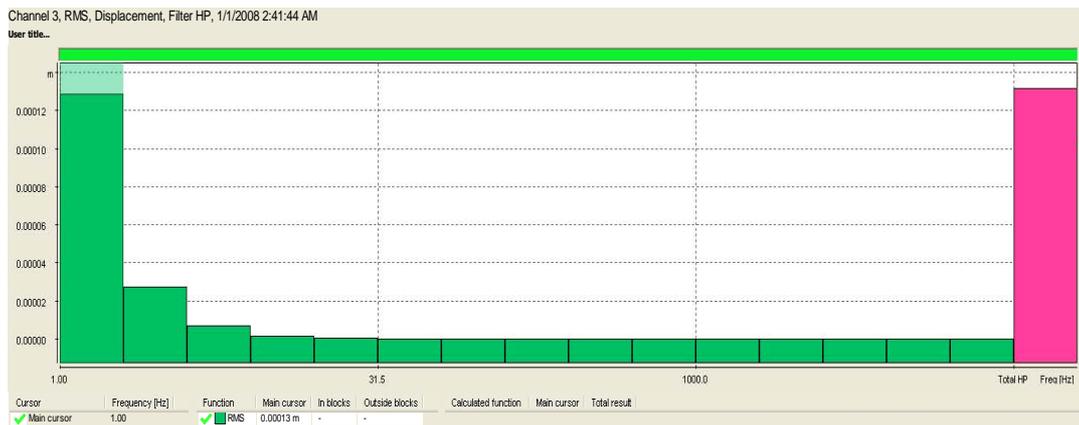
La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oy est de 0,00081 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oz est de 0,00085 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

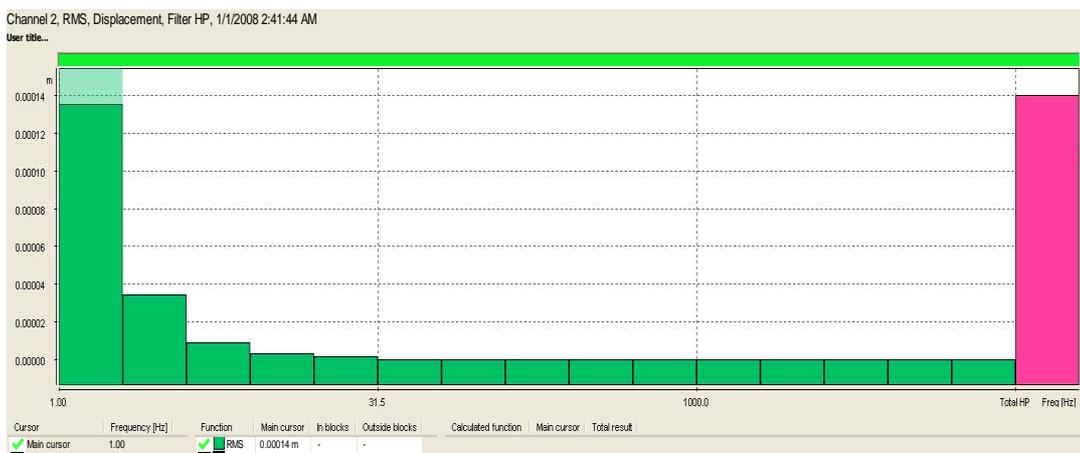
Dans les Figures A7.8., A7.9. et A7.10. sont donnés les spectres des déplacements pour les mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, aux trois canaux du vibromètre. Les vitesses ont été obtenues par l'intégration des accélérations.



**Fig. A7.8.** Le spectre du déplacement d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. A7.9.** Le spectre du déplacement d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. A7.10.** Le spectre du déplacement d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Ox est de 0,00021 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oy est de 0,00013 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oz est de 0,00014 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

Les valeurs qui ont résultées des mesures avec le vibromètre SVAN 958 sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge de la machine-outil à la vitesse de rotation de 800 rot/min, sont données dans les Tableaux A7.4., A7.5. et A7.6., mesures effectuées sur chaque canal.

**Tableau A7.4.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Ox

Canal 1 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.05012	0.09376	0.01881	0.01179	0.03083
2	0.03319	0.05702	0.01052	0.00738	0.01752
3	0.02252	0.04462	0.01064	0.00771	0.01786
4	0.02188	0.03758	0.01058	0.00689	0.01578
5	0.02521	0.04406	0.01225	0.00847	0.01957
6	0.01204	0.02382	0.00697	0.00639	0.00863

Tableau A7.5.

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Oy

Canal 3 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02667	0.05272	0.01352	0.00934	0.02241
2	0.02676	0.05248	0.01521	0.00998	0.02288
3	0.01963	0.03499	0.00955	0.00744	0.01637
4	0.02483	0.04932	0.01384	0.00897	0.02104
5	0.02435	0.04340	0.01194	0.00831	0.02011
6	0.02087	0.03277	0.00905	0.00716	0.01186

Tableau A7.6.

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Oz

Canal 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.03917	0.07430	0.01641	0.01127	0.02828
2	0.02742	0.05041	0.01452	0.00956	0.02145
3	0.02216	0.04178	0.00917	0.00714	0.01641
4	0.02388	0.04227	0.01127	0.00780	0.01841
5	0.02685	0.04786	0.01278	0.00832	0.01954
6	0.02320	0.04560	0.01323	0.01089	0.01687

Les Figures A7.11. a, b et c présentent les mesures des vibrations mécaniques effectuées au fonctionnement en charge de la machine-outil d'après les directions Ox (Fig. 6.34. a), Oy (Fig. 6.34. b) et Oz (Fig. 6.34. c).

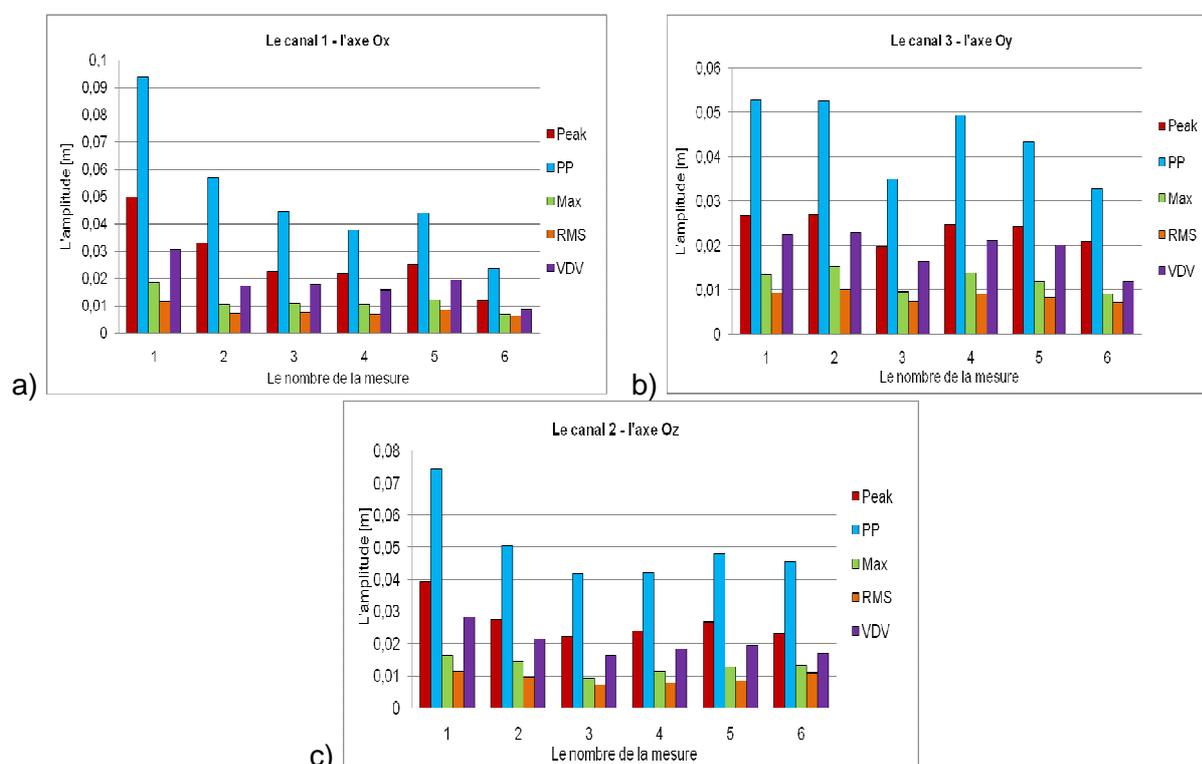
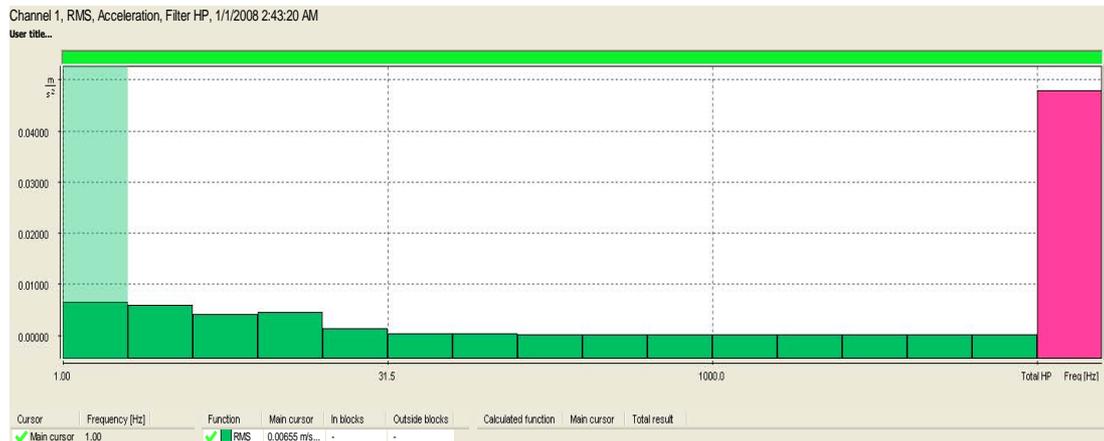


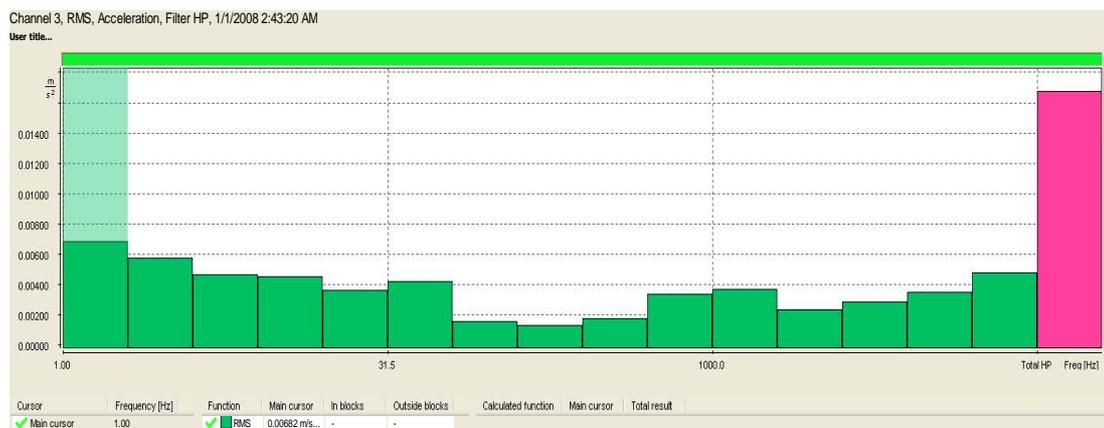
Fig. A7.11. Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [m/s<sup>2</sup>] et VDV [m/s<sup>2</sup>] correspondantes aux mesures effectuées au fonctionnement en charge de la machine-outil d'après les axes Ox, Oy et Oz

Si on compare les résultats d'après les trois directions de propagation Ox, Oy et Oz, on peut observer, dans les Figures A7.11. a, b et c, réalisées à l'aide des valeurs des Tableaux A7.4., A7.5. et A7.6., que d'après la direction Ox on retrouve la plus grande amplitude, c'est-à-dire, les vibrations transmises se ressentent le plus fort sur la direction Ox, au fonctionnement en charge de la machine-outil.

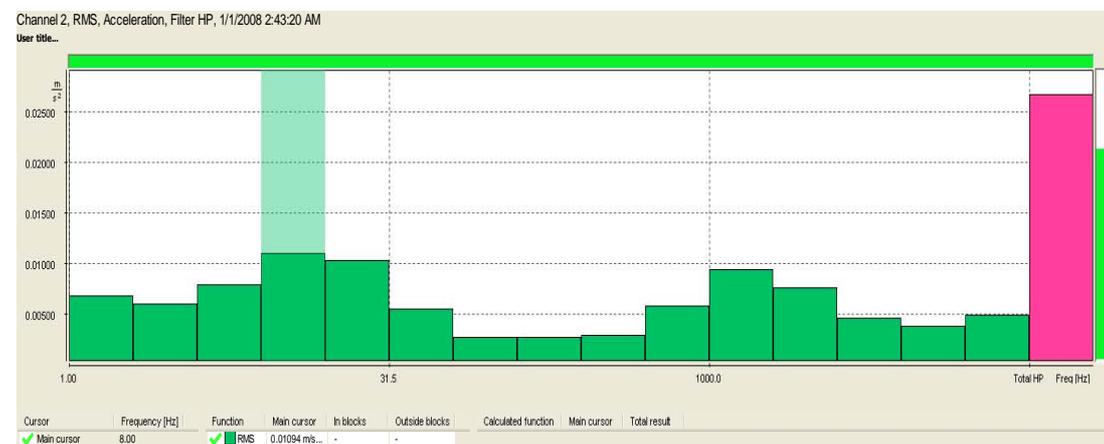
Dans les Figures A7.12., A7.13. et A7.14. sont donnés les spectres d'accélération pour les mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, enregistrés sur les trois canaux du vibromètre.



**Fig. A7.12.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. A7.13.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



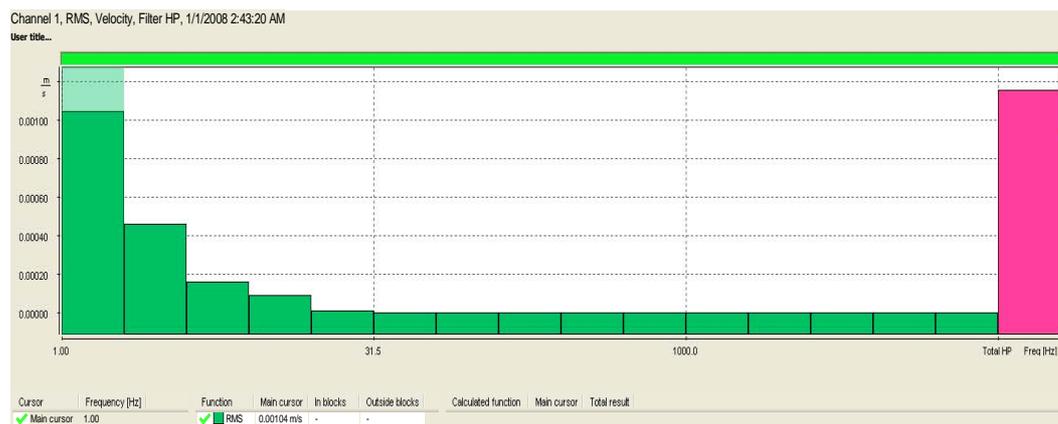
**Fig. A7.14.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Ox est de  $0,00655 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

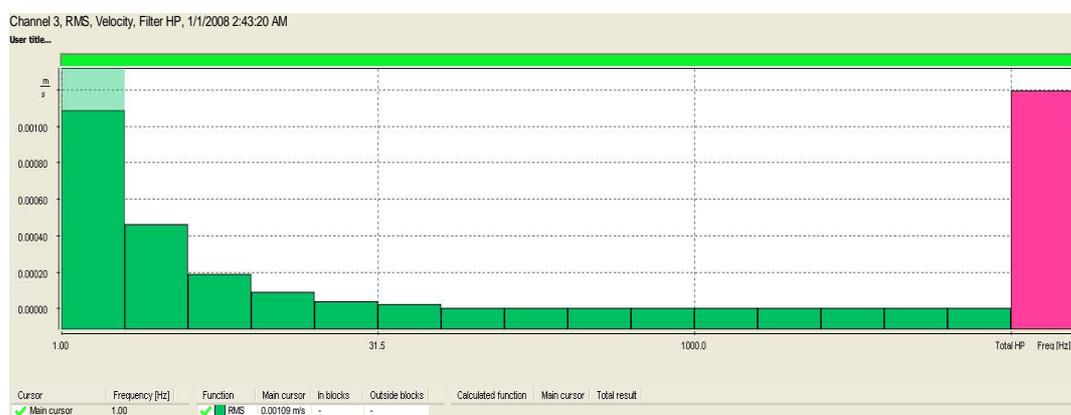
La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oy est de  $0,00682 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oz est de  $0,01094 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de 8 Hz.

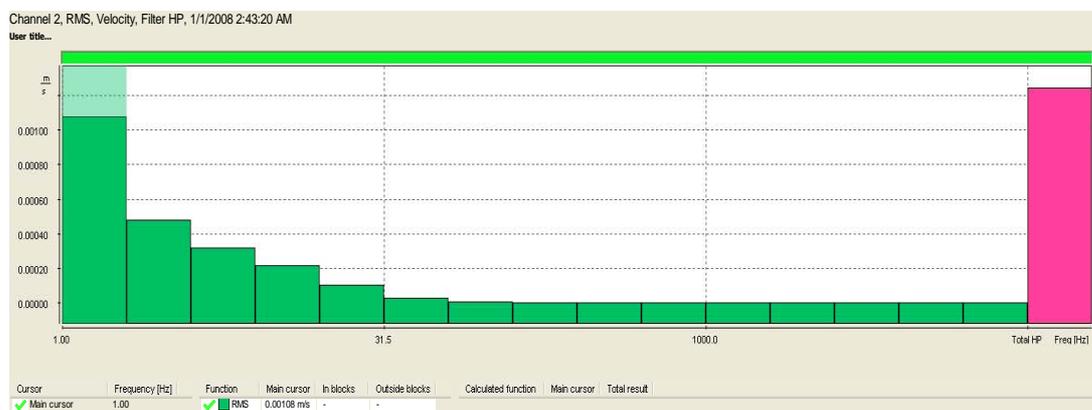
Dans les Figures A7.15., A7.16. et A7.17. sont donnés les spectres de vitesses pour les mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre. Les vitesses ont été obtenues par l'intégration des accélérations.



**Fig. A7.15.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. A7.16.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



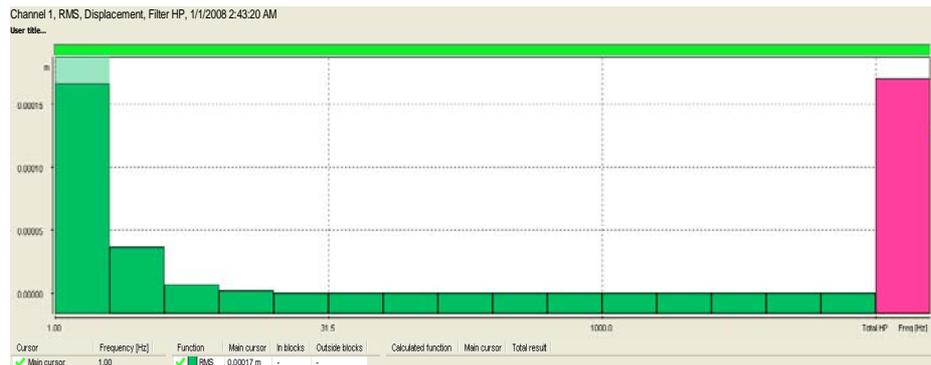
**Fig. A7.17.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Ox est de 0,00104 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

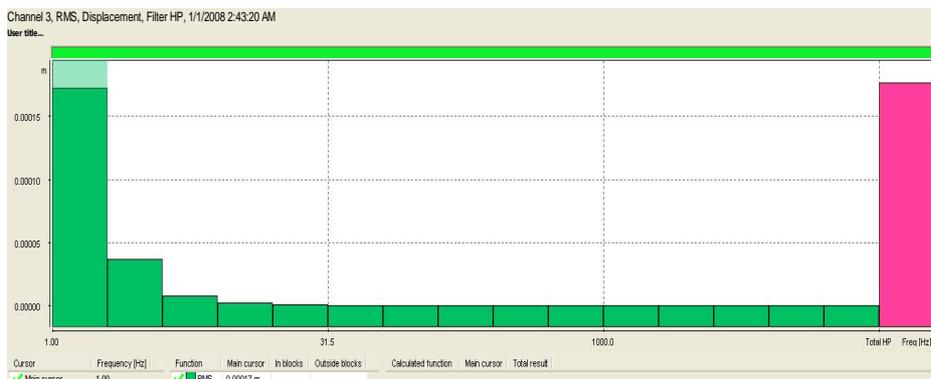
La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oy est de 0,00109 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oz est de 0,00108 m/s et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

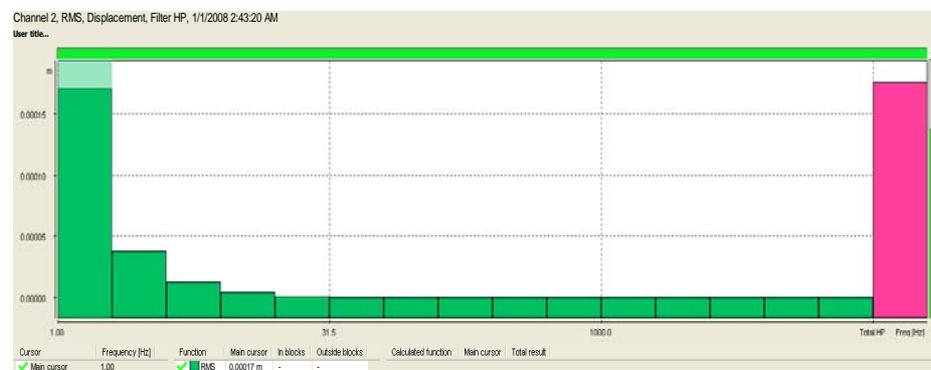
Dans les Figures A7.18., A7.19. et A7.20. sont donnés les spectres des déplacements pour les mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 800 rot/min, d'après les directions Ox, Oy et Oz, s trois canaux du vibrometre. Les déplacements ont été obtenus par l'intégration de la vitesse.



**Fig. A7.18.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. A7.19.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min



**Fig. A7.20.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 800 rot/min

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Ox est de 0,00017 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

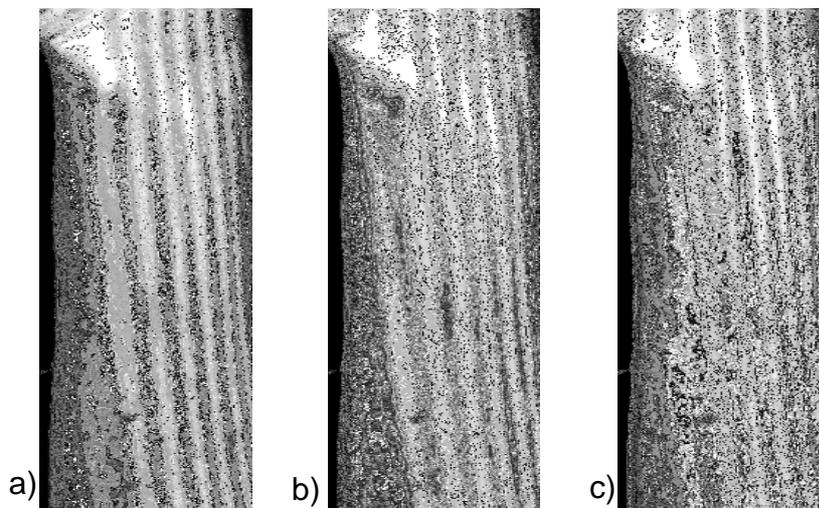
La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oy est de 0,00017 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

La valeur maximale du déplacement sur l'axe Oz est de 0,00017 m et on la trouve à la fréquence de 1 Hz.

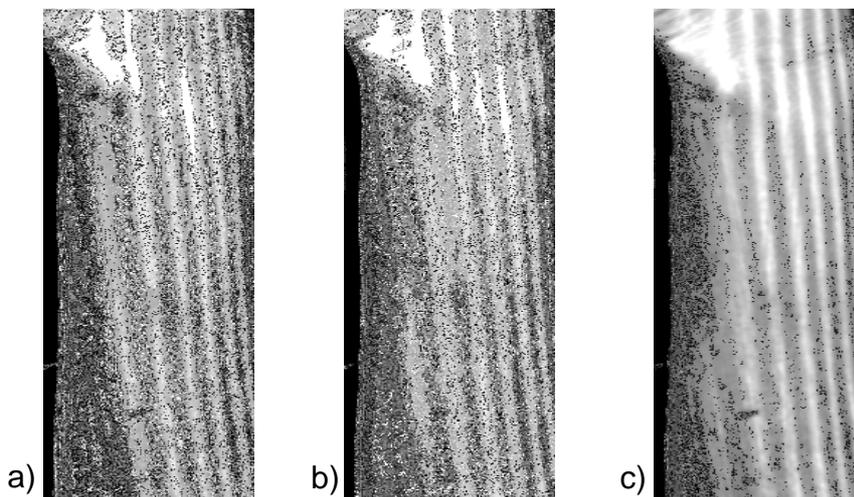
### A7.2. La mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge pour le tour SNA 500x1000, par la méthode Moiré de projection

On a parcouru les mêmes pas pour la mesure des vibrations sur l'avant-bras, comme pour la mesure des vibrations sur la main.

On a acquis trois images déphasées de 120° en état statique avec le tour arrêté (Fig. A7.21. a, b, et c), et trois images avec le tour au fonctionnement au ralenti (Fig. A7.22. a, b, et c) déphasées également entre elles de 120°.



**Fig. A7.21.** Les images de référence sur l'avant-bras, avec le tour arrêté, pour l'étalonnage, avec un déphasage l'une par rapport à l'autre de: a) 0°, b) 120° et c) 240°



**Fig. A7.22.** Les images acquises sur l'avant-bras, avec le tour fonctionnant au ralenti, avec un déphasage l'une par rapport à l'autre de: a) 0°, b) 120° et c) 240°

Dans la Figure A7.23. est montrée l'interface graphique du traitement des données d'acquisitions.

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale de 140 pixels et sur la verticale de 459 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le niveau de gris du seuil du masque de 15 et pour le seuil discontinu de 1.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 95 pixels et sur la verticale de 52 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont:

- Les distances entre:
  - Projecteur – Objet = 1310 mm;
  - Caméra CCD - Projecteur = 860 mm;
  - Caméra CCD - Objet = 820 mm.
- Le pas du réseau des lignes est de 0,5 mm.
- La distance focale est de 100 mm.

Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0,3 mm/pixel.

Les distances entre le projecteur et l'objet, la caméra CCD et le projecteur et la caméra CCD et l'objet, ont été mesurées avec une roulette et ont été introduites digital.

Le rapport entre la hauteur et la largeur des pixels est fourni par le producteur de la caméra, qui a, généralement, la valeur 0,73.

The screenshot shows a software window titled "Modifier l'Application" with several sections for configuring image processing parameters:

- DEPHASAGES ENTRE IMAGES:** Includes a checkbox for "Calcul des décalages de phase" and two columns of phase shift values: "Référence" and "Déformée".
 

	Référence	Déformée	Unité
Décalage entre l'image n°1 et n°2	129.772	128.64	degrés
Décalage entre l'image n°1 et n°3	-102.132	-118.627	degrés
- DEFINITION DE LA ZONE TRAITEE:** Includes a "SOURIS" button and fields for "Position horizontale" (0 pixels), "Position verticale" (0 pixels), "Taille horizontale" (140 pixels), and "Taille verticale" (459 pixels).
- CARACTERISTIQUES DU MASQUE:** Includes "Seuil du masque" (15 Niv. Gris) and "Seuil discontinuité" (1).
- POINT DE REFERENCE:** Includes "PHASE INITIALE" (0 degrés), "Position horizontale" (95 pixels), "Position verticale" (52 pixels), and a "SOURIS" button.
- CARACTERISTIQUES DU MONTAGE OPTIQUE:** Includes fields for "Distance: projecteur-épreuve" (1310 mm), "caméra-projecteur" (860 mm), "caméra-épreuve" (820 mm), "Pas du réseau" (0.5 mm), "Focale" (100 mm), and "Grandissement (mm/pixel)" (0.3). It also shows "Hauteur / largeur des pixels" (0.73).

Fig. A7.23. La fenêtre avec les paramètres modifiés et avec le déphasage calculé

Dans la fenêtre de calcul du déphasage et des déplacements (Fig. 6.27.) on peut examiner le relief de la déformation.

Dans la Figure A7.24. est donnée l'image en 3D réalisée par le logiciel „Surfer”.

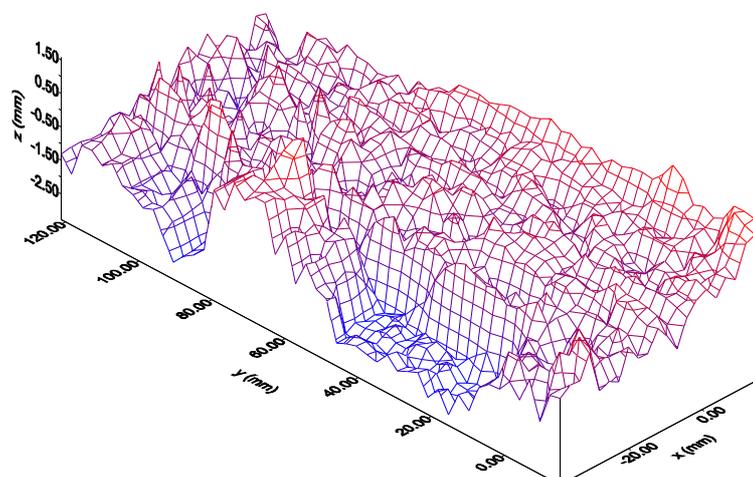
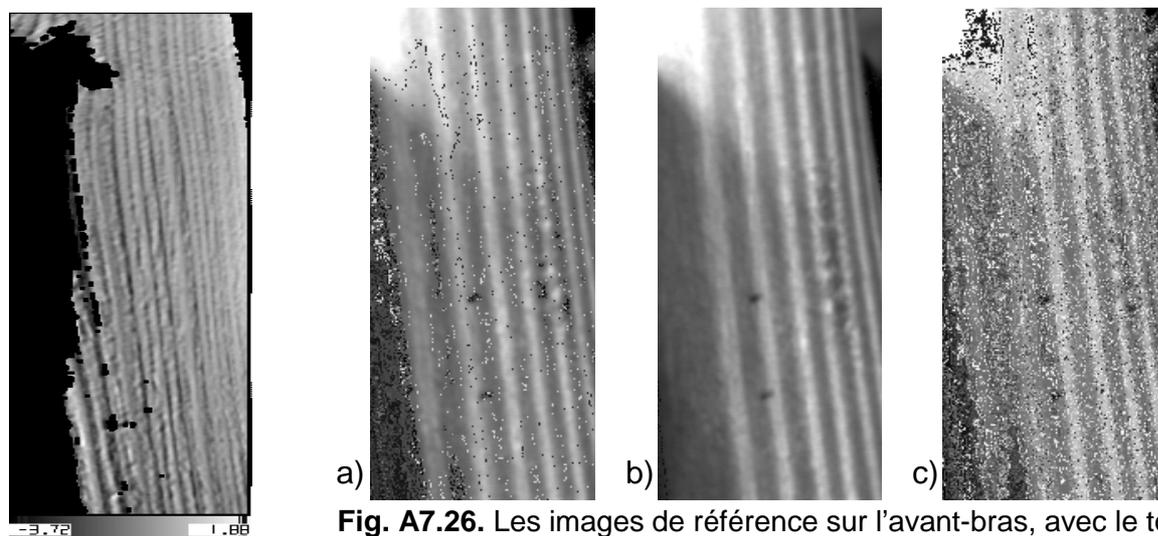


Fig. A7.24. L'image de la déformation en 3D

La Figure A7.25. donne la valeur de la déformation, qui est de  $5,60 \times 10^{-1}$  mm.

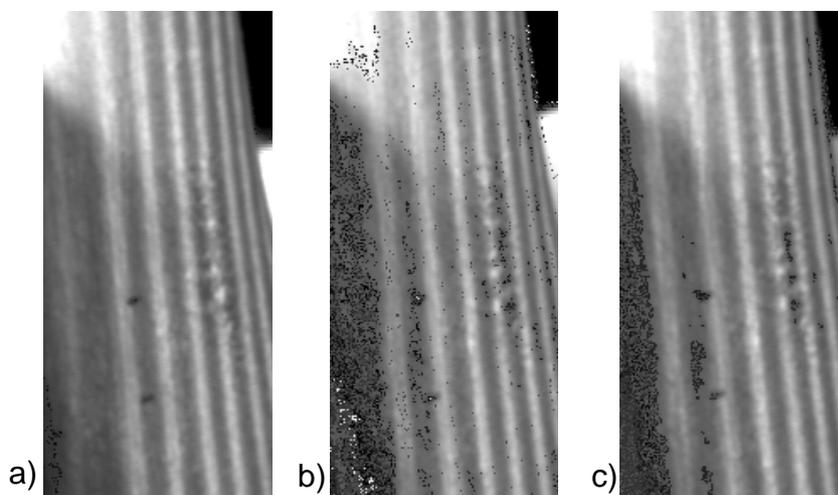
On a parcouru les mêmes pas pour la mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement en charge de la machine-outil, qu'avec ceux qui ont été parcourus pour la mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti de l'arbre principal du tour.

On a acquis six images, trois images en état statique, pour l'étalonnage (Fig. 6.58.) qui ont été déphasées entre elles de  $120^\circ$  et trois avec le tour au fonctionnement en charge (Fig. 6.59.) usinant une pièce cylindrique avec le diamètre de 25 mm, la vitesse d'avance  $a=0,7$  mm/rot et la profondeur de coupe de 3,8 mm.



**Fig. A7.25.** La valeur de la déformation

**Fig. A7.26.** Les images de référence sur l'avant-bras, avec le tour arrêté, pour calibrage, avec un déphasage l'une par rapport à l'autre de: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$



**Fig. A7.27.** Les images acquises sur l'avant-bras, avec le tour fonctionnant en charge, avec un déphasage l'une par rapport à l'autre de: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$

Dans la Figure A7.28. est montrée l'interface graphique du traitement des données acquises.

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale de 134 pixels et sur la verticale de 310 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le niveau de gris du seuil de 25 et pour le seuil discontinu de 1.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 58 pixels et sur la verticale de 143 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont:

- Les distances entre:
  - Projecteur – Objet = 1310 mm;
  - Caméra CCD - Projecteur = 860 mm;
  - Caméra CCD - Objet = 800 mm.
- Le pas du réseau des lignes est de 0,5 mm.
- La distance focale est de 100 mm.

Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0,31 mm/pixel.

Les distances entre le projecteur et l'objet, la caméra CCD et le projecteur et la caméra CCD et l'objet, ont été mesurées avec une roulette et ont été introduites digital.

Le rapport entre la hauteur et la largeur des pixels est fourni par le producteur de la caméra, il a la valeur 0,73.

**Modifier l'Application**

DEPHASAGES ENTRE IMAGES

Calcul des décalages de phase

	Référence	Déformée	
Décalage entre l'image n°1 et n°2=	140.476	120.539	degrés
Décalage entre l'image n°1 et n°3=	-103.065	-141.494	degrés

DEFINITION DE LA ZONE TRAITEE **SOURIS**

Position horizontale = 0 pixels    Position verticale = 0 pixels

Taille horizontale = 134 pixels    Taille verticale = 310 pixels

CARACTERISTIQUES DU MASQUE

Seuil du masque = 25 Niv. Gris    Seuil discontinuité = 2

POINT DE REFERENCE. PHASE INITIALE = 0 degrés

Position horizontale = 58 pixels    Position verticale = 143 pixels **SOURIS**

CARACTERISTIQUES DU MONTAGE OPTIQUE

Distance:

projecteur-épreuvette =	1310	mm	Pas du réseau =	0.5	mm
caméra-projecteur =	860	mm	Focale =	100	mm
caméra-épreuvette =	800	mm	Grandissement (mm/pixel) =	0.31	

Hauteur / largeur des pixels = 0.73

Cancel    OK

Fig. A7.28. La fenêtre des paramètres avec le déphasage calculé

On a lancé la fenêtre de calcul du déphasage et des déplacements (A7.28.) et, à la fin, on a obtenu le relief de la déformation.

Dans la Figure A7.29. a, est montrée l'image de la déformation en 3D et dans la Figure A7.29. b est montrée la valeur de la déformation, qui est de  $7,51 \times 10^{-1}$  mm.

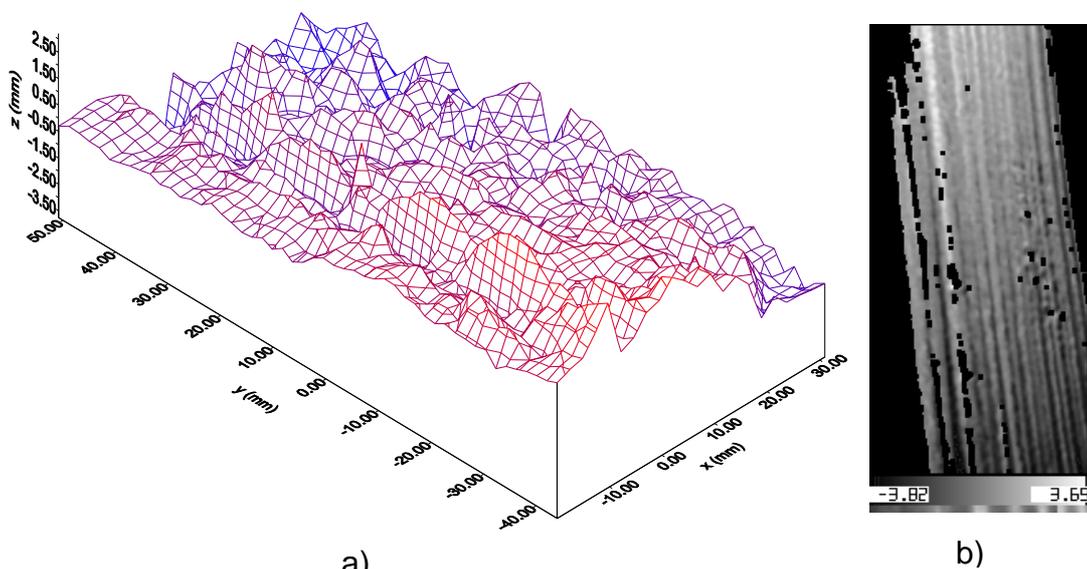


Fig. A7.29. a) L'image de la déformation en 3D; b) La valeur de la déformation

### 6.5.2. La mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge de la machine à percer verticale Mx750 avec le vibromètre SVAN 958

Les valeurs qui ont été obtenues suite aux mesures sur l'avant-bras avec le vibromètre SVAN 958, sont données dans les Tableaux A7.7., A7.8. et A7.9. Les valeurs sont obtenues à l'effectuation des mesures sur la machine à percer vertical, au fonctionnement au ralenti avec la vitesse de rotation de 355 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,1$  mm/rot, d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.

**Tableau A7.7.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Ox

Canal 1 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.01710	0.03323	0.01099	0.00801	0.01646
2	0.03065	0.05333	0.01642	0.01002	0.02371
3	0.02254	0.04251	0.01168	0.00841	0.01828

**Tableau A7.8.**

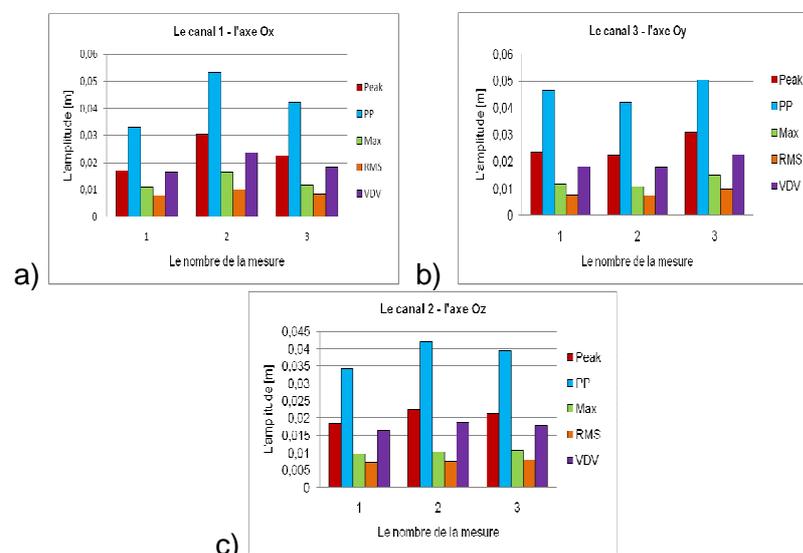
Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Oy

Canal 3 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02366	0.04651	0.01179	0.00764	0.01795
2	0.02223	0.04202	0.01047	0.00741	0.01774
3	0.03073	0.05023	0.01512	0.00963	0.02249

**Tableau A7.9.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Oz

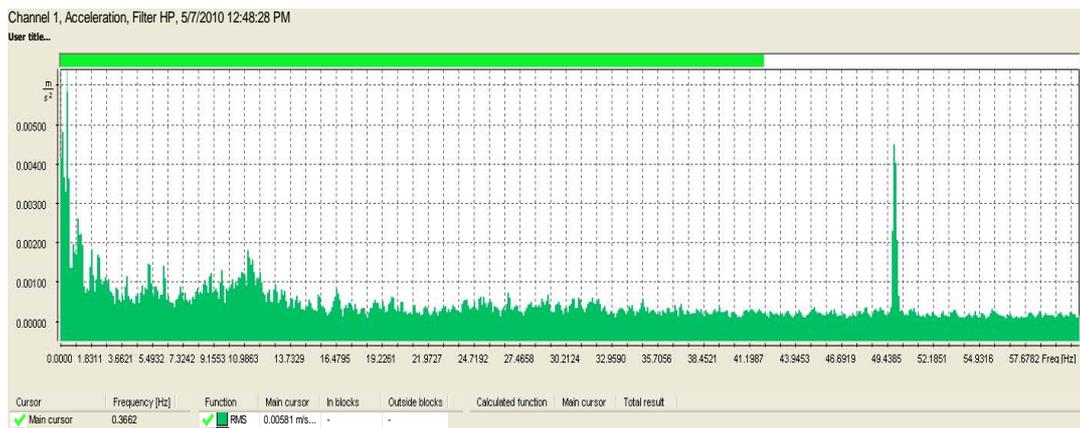
Canal 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.01847	0.03436	0.00958	0.00728	0.01646
2	0.02257	0.04193	0.01022	0.00735	0.01864
3	0.02116	0.03949	0.01076	0.00794	0.01791



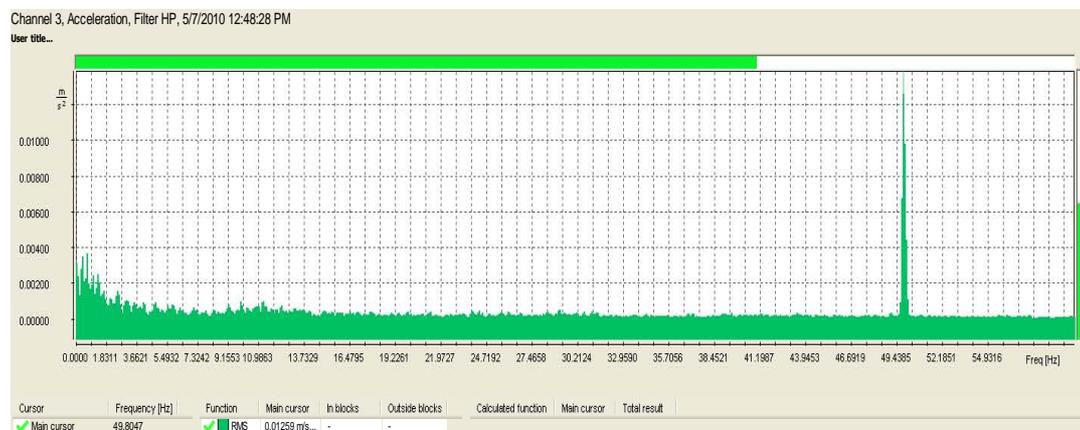
**Fig. A7.30.** Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [m/s<sup>2</sup>] et VDV [m/s<sup>2</sup>] correspondantes aux mesures effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les axes Ox, Oy et Oz

Si l'on compare les résultats d'après trois directions de propagation Ox, Oy et Oz, on peut observer, dans les Figures 6.82. a, b et c, réalisées à l'aide des valeurs des Tableaux A7.7., A7.8. et A7.9., que d'après la direction Ox on a la plus grande amplitude, c'est-à-dire les vibrations transmises se ressentent le plus fort d'après la direction Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil.

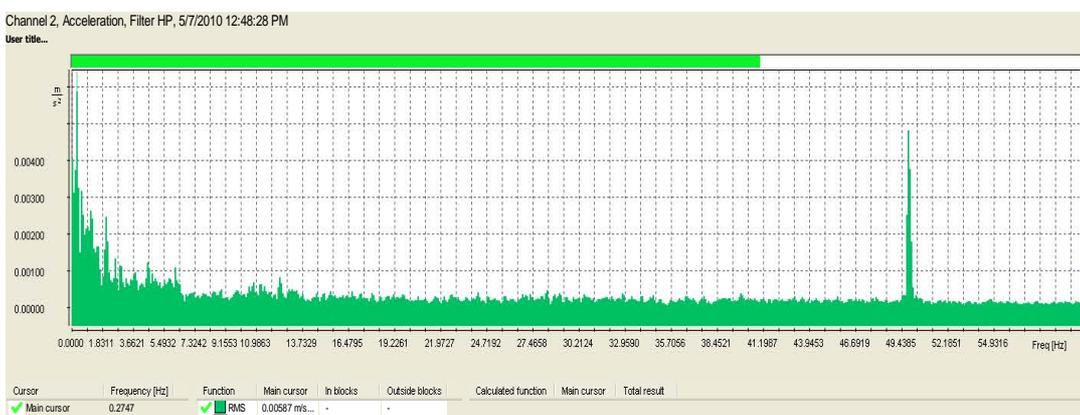
Dans les Figures A7.31., A7.32. et A7.33. sont montrés les spectres d'accélération pour la mesure effectuée sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 355 rot/min, avec la vitesse d'avance  $a=0,1$  mm/rot, avec l'interprétation des mesures d'après les directions Ox, Oy et Oz, sur les trois canaux du vibromètre.



**Fig. A7.31.** Le spectre des accélérations d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



**Fig. A7.32.** Le spectre des accélérations d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



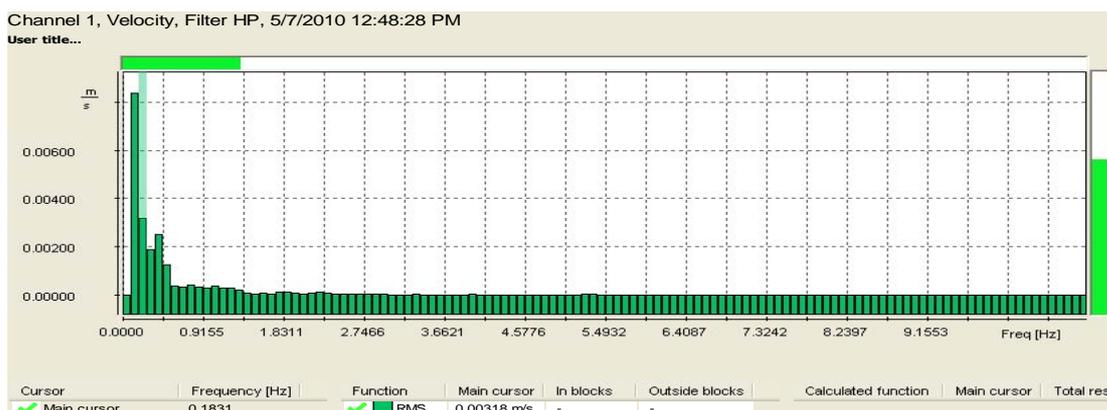
**Fig. A7.33.** Le spectre des accélérations d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Ox est de  $0,00581 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $0,3662 \text{ Hz}$ .

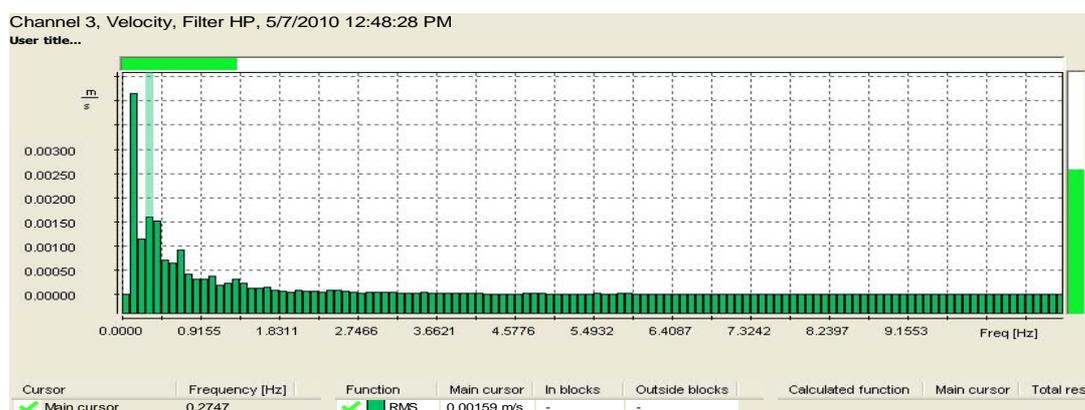
La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oy est de  $0,01259 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $49,8047 \text{ Hz}$ .

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oz est de  $0,00587 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $0,2747 \text{ Hz}$ .

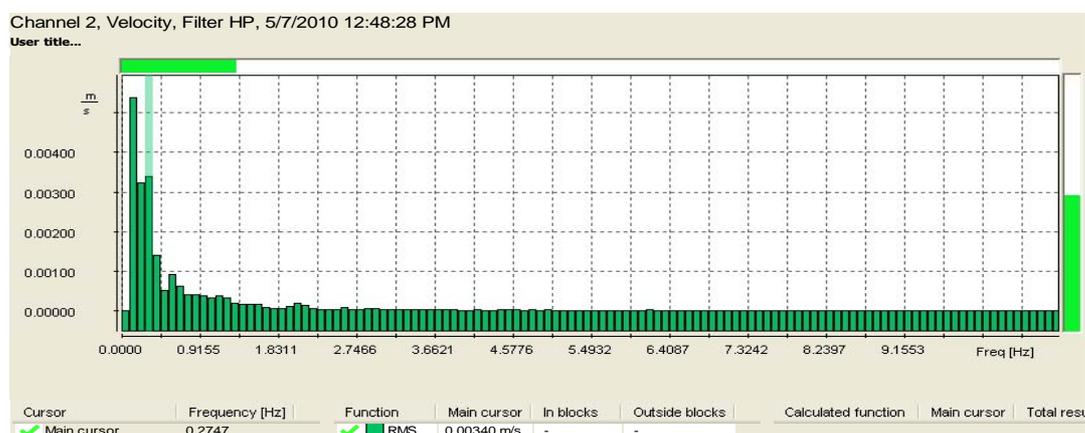
Dans les Figures A7.34., A7.35. et A7.36., sont données les spectres des vitesses pour les mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti de la machine à percer vertical avec la vitesse de rotation de l'axe principal de  $355 \text{ rot/min}$  et la vitesse d'avance  $a=0,1 \text{ mm/rot}$ , d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.



**Fig. A7.34.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



**Fig. A7.35.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



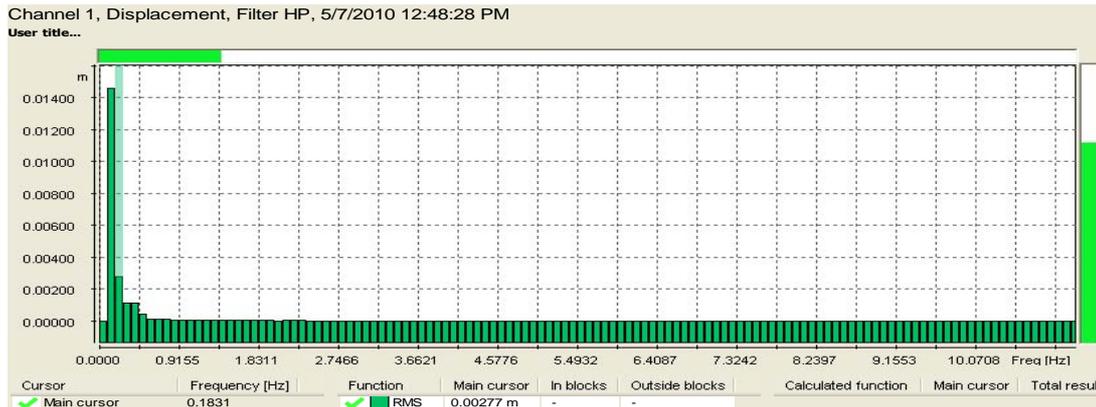
**Fig. A7.36.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Ox est de 0,00318 m/s et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

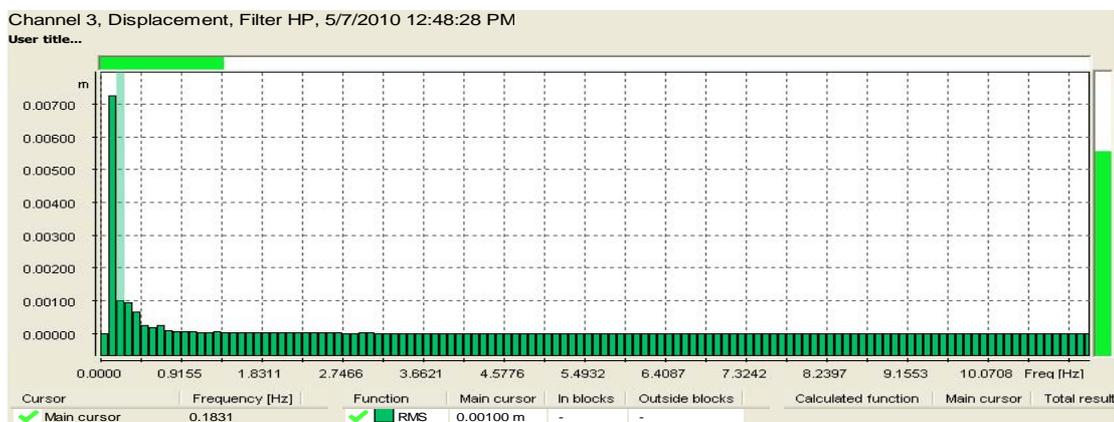
La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oy est de 0,00159 m/s et on la trouve à la fréquence de 0,2747 Hz.

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oz est de 0,00340 m/s et on la trouve à la fréquence de 0,2747 Hz.

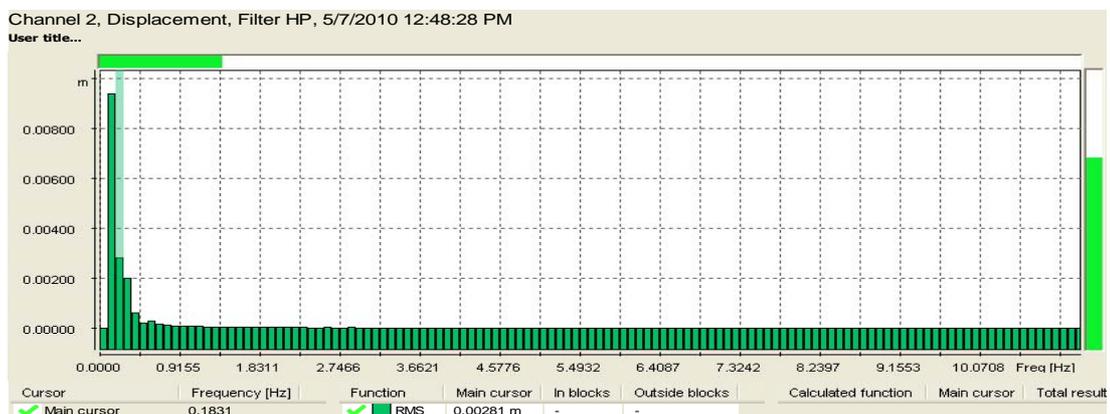
Dans les Figures A7.37., A7.38. et A7.39., sont donnés les spectres des déplacements pour les mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement au ralenti de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 355 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,1$  mm/rot, avec les enregistrements d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.



**Fig. A7.37.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Ox au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



**Fig. A7.38.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oy au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



**Fig. A7.39.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oz au fonctionnement au ralenti de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Ox est de 0,00277 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oy est de 0,00100 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oz est de 0,00281 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

Les valeurs qui ont été obtenues suite aux mesures sur l'avant-bras avec le vibromètre SVAN 958, sont données dans les Tableaux A7.10., A7.11. et A7.12. Les valeurs sont obtenues suite à l'effectuation des mesures sur la machine à percer vertical, au fonctionnement en charge avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 355 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,16$  mm/rot, avec les enregistrements d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.

**Tableau A7.10.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Ox

Canal 1 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.01780	0.03130	0.00761	0.00614	0.01016
2	0.02087	0.03664	0.01023	0.00833	0.01839
3	0.02294	0.04498	0.01032	0.00750	0.01746
4	0.07422	0.12750	0.02538	0.01046	0.04009

**Tableau A7.11.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Oy

Canal 3 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.02286	0.04320	0.01074	0.00871	0.01488
2	0.01824	0.03573	0.00962	0.00703	0.01596
3	0.02391	0.04775	0.01311	0.00874	0.01979
4	0.07031	0.13017	0.02767	0.01215	0.04078

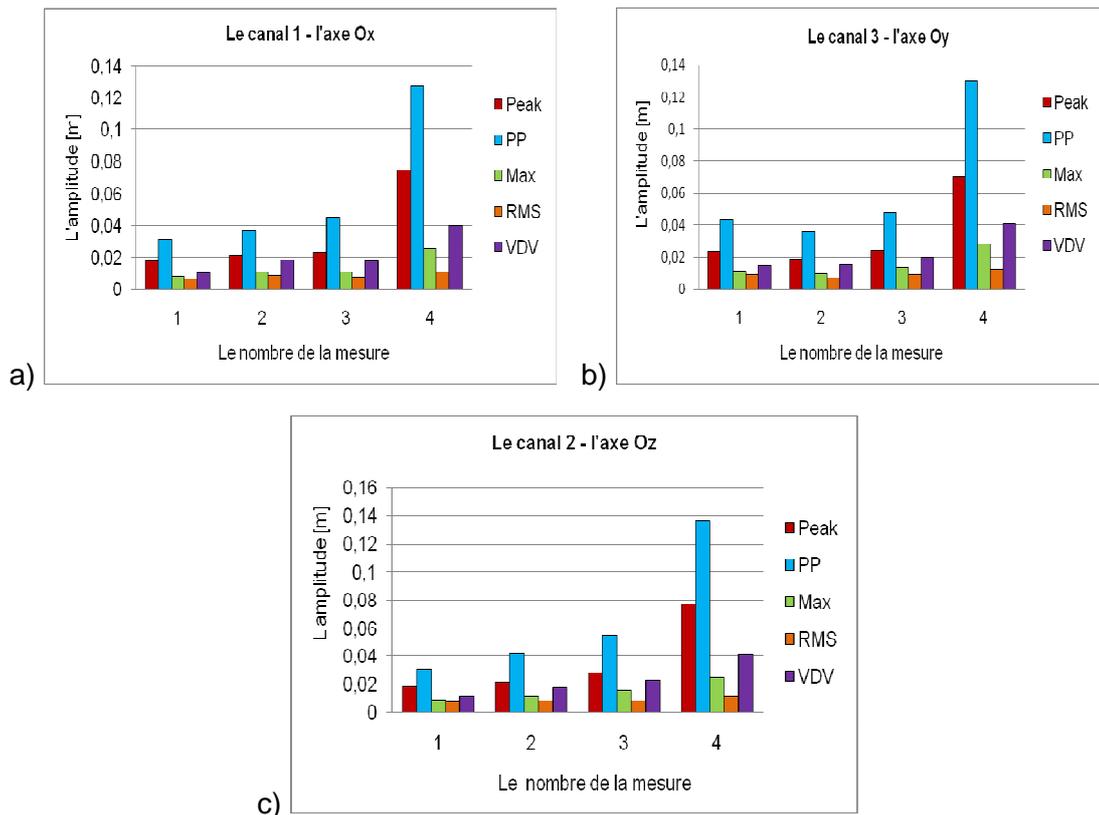
**Tableau A7.12.**

Les valeurs des accélérations obtenues sur l'avant-bras pour les mesures d'après l'axe Oz

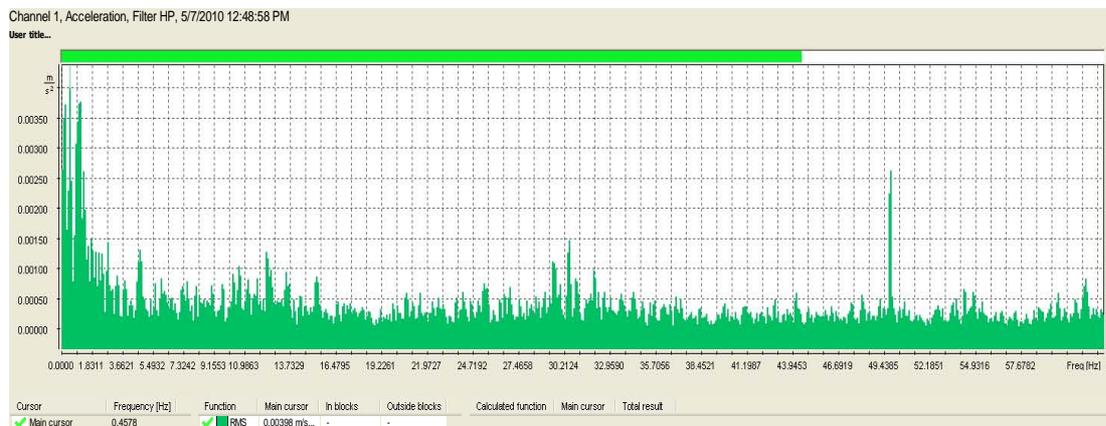
Canal 2 (VLM)					
	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)	P1 (Wd, 1 s)
No.	Peak [m/s <sup>2</sup> ]	PP [m/s <sup>2</sup> ]	Max [m/s <sup>2</sup> ]	RMS [m/s <sup>2</sup> ]	VDV [m/s <sup>2</sup> ]
1	0.01816	0.03105	0.00867	0.00758	0.01127
2	0.02126	0.04135	0.01147	0.00814	0.01795
3	0.02838	0.05508	0.01543	0.00837	0.02241
4	0.07656	0.13662	0.02446	0.01151	0.04078

Si on compare les résultats d'après les trois directions de propagation Ox, Oy et Oz, on peut observer des Figures A7.40. a, b et c, réalisées à l'aide des valeurs des Tableaux A7.10., A7.11. et A7.12., que d'après la direction Oz on a la plus grande amplitude, c'est-à-dire les vibrations transmises se ressentent le plus fort sur la direction Oz, au fonctionnement en charge de la machine-outil.

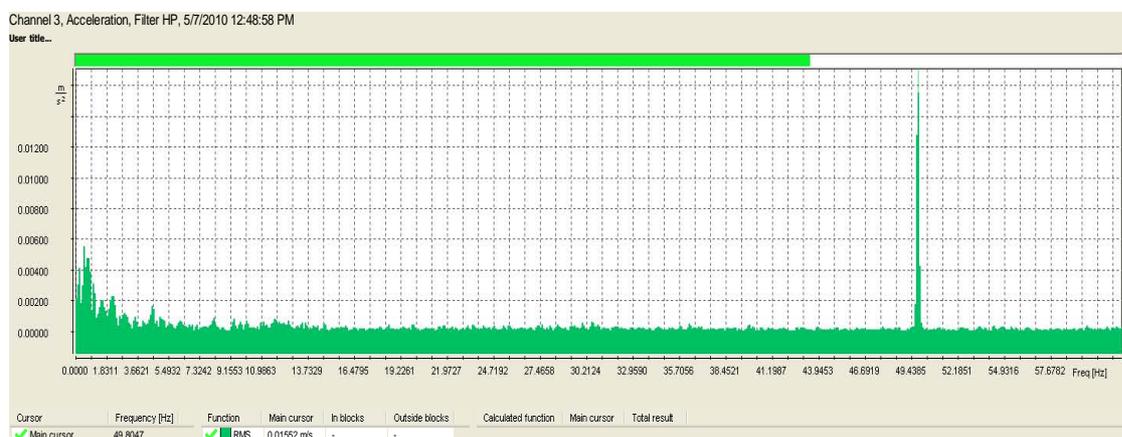
Dans les Figures A7.41., A7.42. et A7.43., sont montrés les spectres d'accélération pour la mesure effectuée sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge de la machine à percer vertical avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 355 rot/min, avec la vitesse d'avance  $a=0,16$  mm/rot, d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.



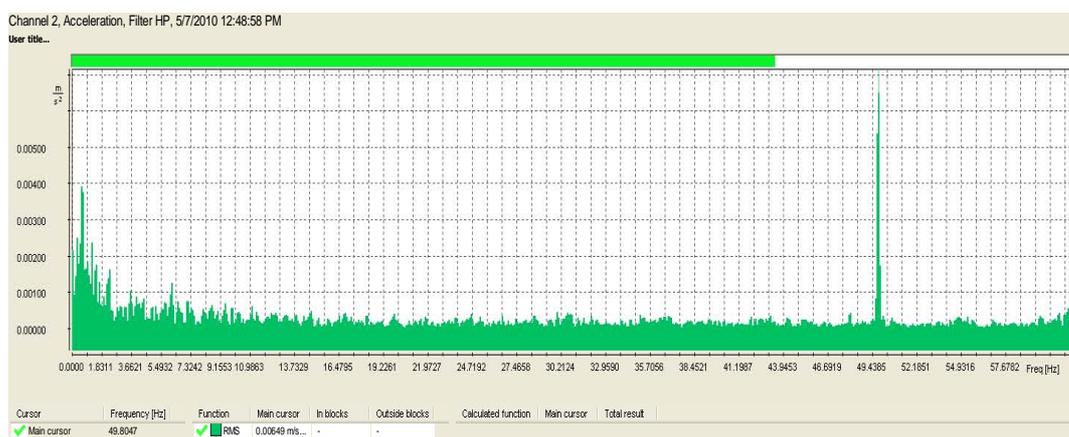
**Fig. A7.40.** Les accélérations Peak, Peak to Peak, Max, RMS [ $m/s^2$ ] et VDV [ $m/s^2$ ] correspondantes aux mesures effectuées au fonctionnement au ralenti de la machine-outil d'après les axes Ox, Oy et Oz



**Fig. A7.41.** Le spectre d'accélérations d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



**Fig. A7.42.** Le spectre d'accélérations d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



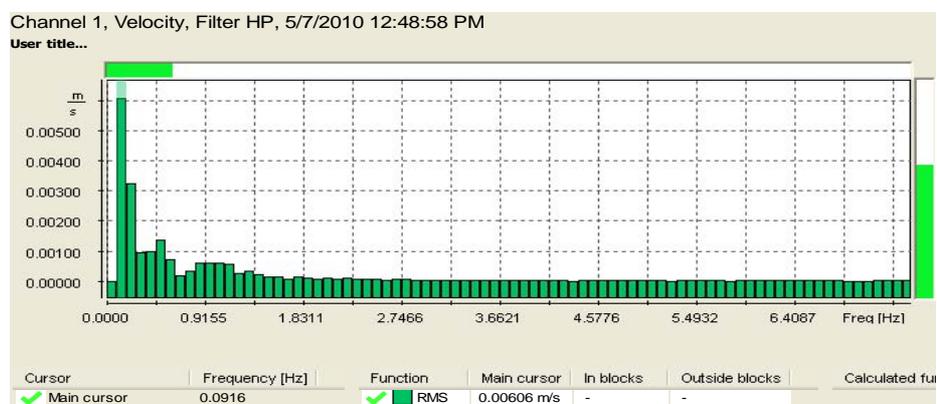
**Fig. A7.43.** Le spectre d'accélération d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Ox est de  $0,00398 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $0,4578 \text{ Hz}$ .

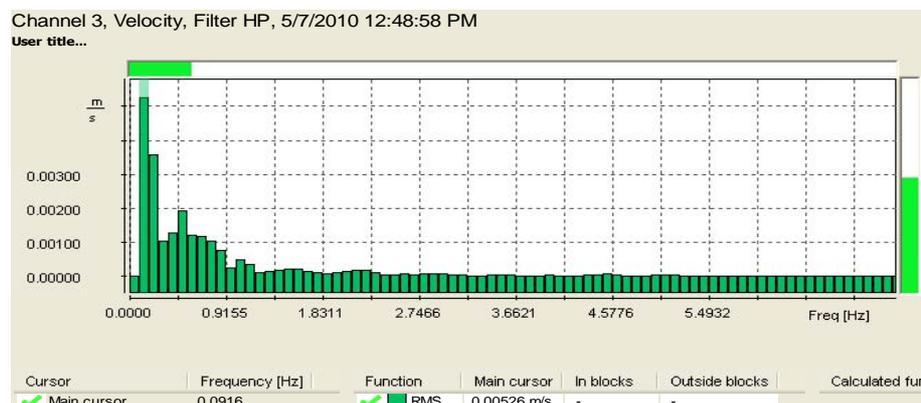
La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oy est de  $0,01552 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $49,8047 \text{ Hz}$ .

La valeur maximale de l'accélération d'après l'axe Oz est de  $0,00649 \text{ m/s}^2$  et on la trouve à la fréquence de  $49,8047 \text{ Hz}$ .

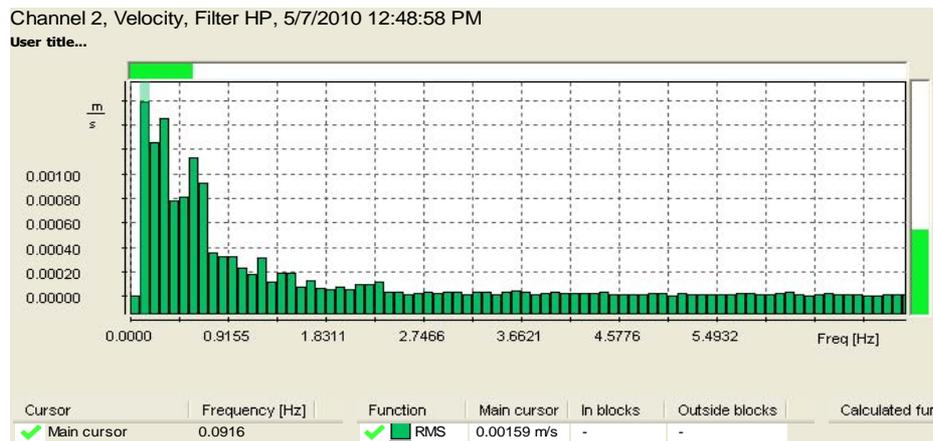
Dans les Figures A7.44., A7.45. et A7.46., sont montrés les spectres de vitesses des mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 355 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,16 \text{ mm/rot}$ , avec les enregistrements d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.



**Fig. A7.44.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



**Fig. A7.45.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



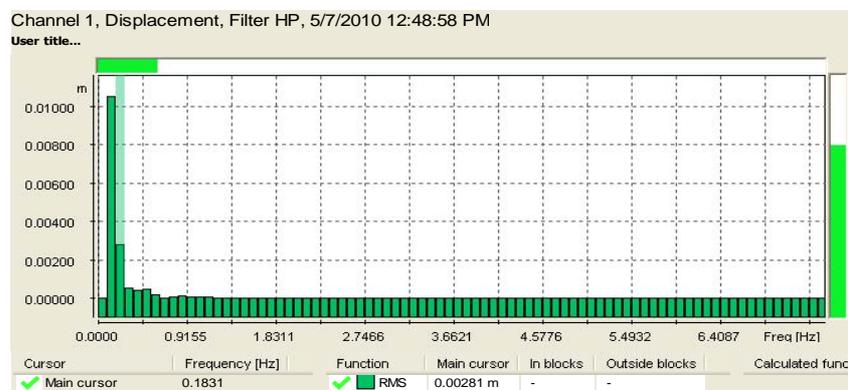
**Fig. A7.46.** Le spectre des vitesses d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Ox est de 0,00606 m/s et on la trouve à la fréquence de 0,0916 Hz.

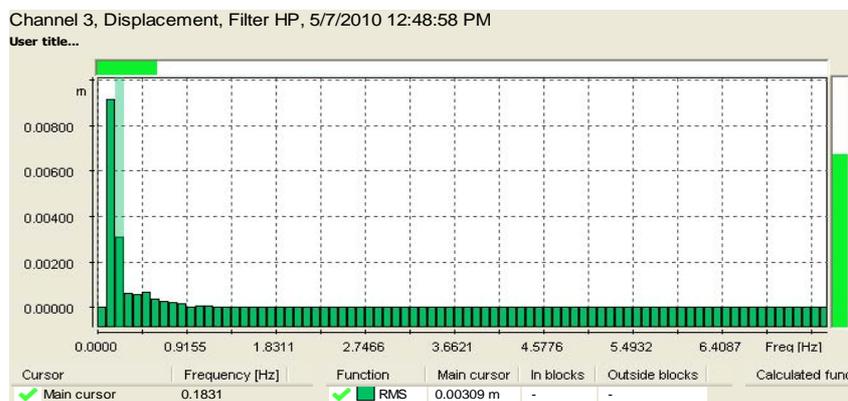
La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oy est de 0,00526 m/s et on la trouve à la fréquence de 0,0916 Hz.

La valeur maximale de la vitesse d'après l'axe Oz est de 0,00159 m/s et on la trouve à la fréquence de 0,0916 Hz.

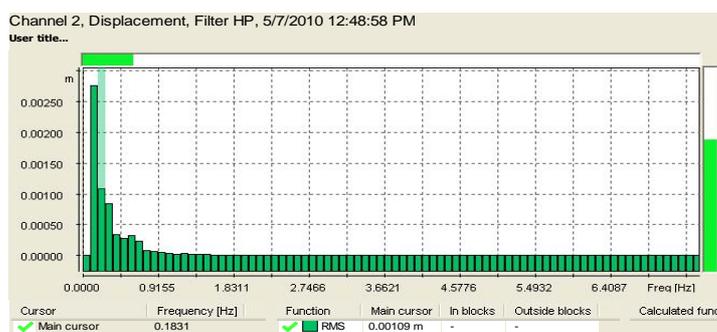
Dans les Figures A7.47., A7.48. et A7.49., sont montrés les spectres des déplacements pour les mesures effectuées sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge de la machine à percer verticale avec la vitesse de rotation de l'axe principal de 355 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,16$  mm/rot, avec les enregistrements d'après les directions Ox, Oy et Oz, des trois canaux du vibromètre.



**Fig. A7.47.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Ox au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



**Fig. A7.48.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oy au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min



**Fig. A7.49.** Le spectre des déplacements d'après l'axe Oz au fonctionnement en charge de la machine-outil avec la vitesse de 355 rot/min

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Ox est de 0,00281 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

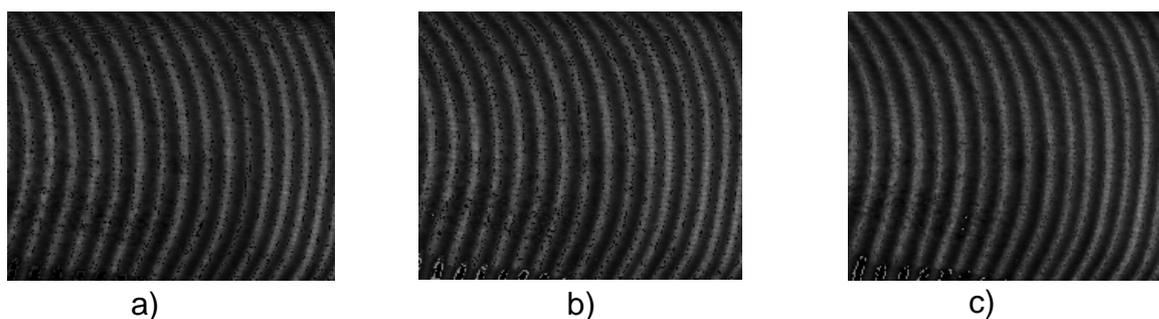
La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oy est de 0,00309 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

La valeur maximale du déplacement d'après l'axe Oz est de 0,00109 m et on la trouve à la fréquence de 0,1831 Hz.

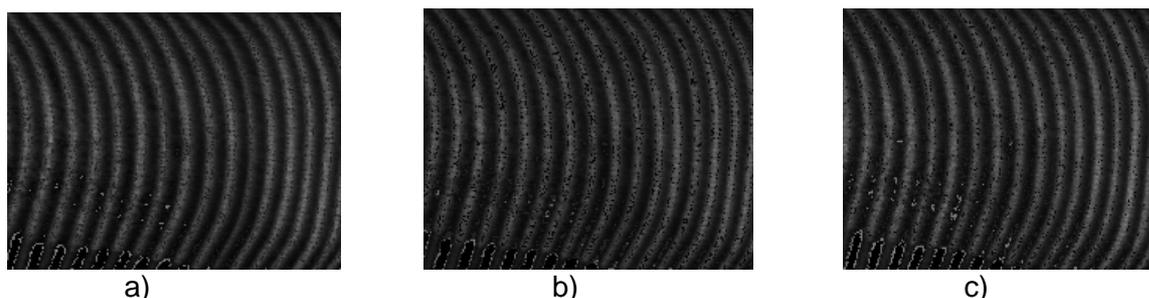
### **A7.3. La mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti et en charge de la machine à percer verticale MAx750 par la méthode Moiré de projection**

On a parcouru les mêmes pas pour la mesure des vibrations sur l'avant-bras, qu'on a parcouru pour la mesure des vibrations sur la main.

Pour le traitement des résultats a été nécessaire d'acquisitions des trois images en état statique, avec la machine à percer verticale arrêtée (Fig. A7.50. a, b, et c) qui ont été déphasées de 120°, trois images avec la machine à percer verticale au fonctionnement au ralenti (Fig. A7.51, a, b, et c), faisant le perçage avec une perceuse de  $\varnothing 14$  mm dans une pièce cylindrique avec le diamètre de 60 mm, ayant la vitesse de rotation de 355 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,1$  mm/rot, déphasées également entre elles de 120°.



**Fig. A7.50.** Les images de référence sur l'avant-bras, avec la machine à percer arrêtée, pour l'étalonnage, déphasées entre elles de: a) 0°, b) 120° et c) 240°



**Fig. A7.51.** Les images acquises sur l'avant-bras, la machine à percer au fonctionnement au ralenti déphasées entre elles de: a) 0°, b) 120° et c) 240°

Dans la Figure A7.51. est montrée l'interface graphique du traitement des données acquises, qui contient toutes les données utilisées pour le calcul des vibrations.

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale de 139 pixels et sur la verticale de 158 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le niveau de gris, le seuil du masque de 15 et pour le seuil discontinu de 3.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 27 pixels et sur la verticale de 71 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont:

- Les distances entre: – Projecteur – Objet = 1050 mm;
  - Caméra CCD – Projecteur = 945 mm;
  - Caméra CCD – Objet = 815 mm.
- Le pas du réseau des lignes est de 0,5 mm.
- La distance focale est de 100 mm.

Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0.499375 mm/pixels.

Les distances entre projecteur et objet, la caméra CCD et projecteur et la caméra CCD et objet, ont été mesurées avec une roulette et ont été introduites digital.

Le rapport entre la hauteur et la largeur des pixels est fourni par le producteur de la caméra, qui a, généralement, la valeur 0,73.

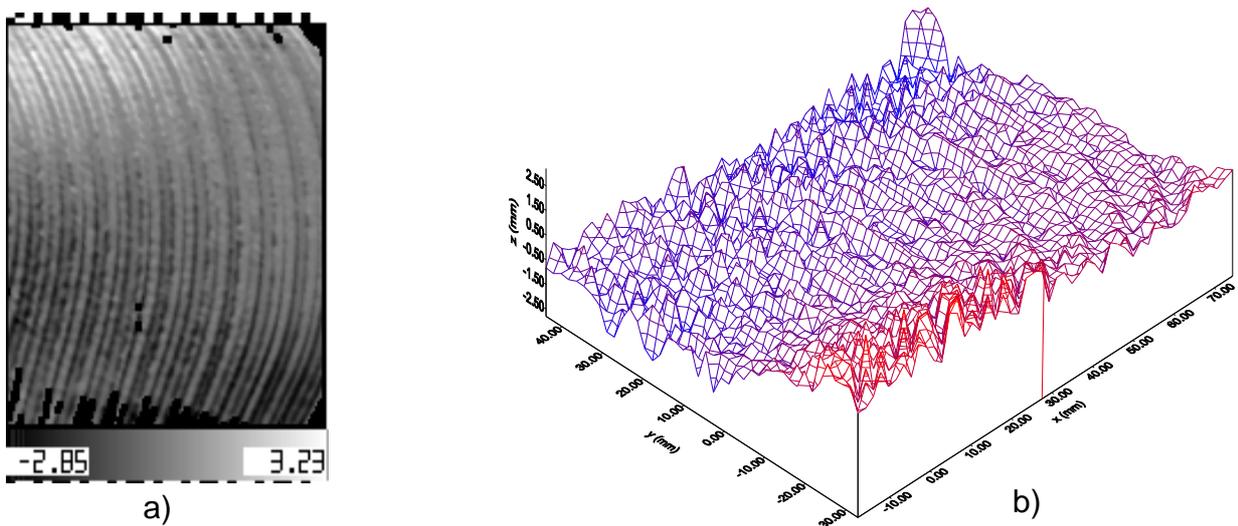
The screenshot shows a dialog box titled "Modifier l'Application" with several sections for parameter configuration:

- DEPHASAGES ENTRE IMAGES:** Includes a checkbox for "Calcul des décalages de phase". Below it, a table shows phase shifts:
 

	Référence	Déformée	Unité
Décalage entre l'image n°1 et n°2=	126.668	125.302	degrés
Décalage entre l'image n°1 et n°3=	-102.835	-101.129	degrés
- DEFINITION DE LA ZONE TRAITEE:** Includes a "SOURIS" button and fields for Position horizontale (0 pixels), Position verticale (4 pixels), Taille horizontale (139 pixels), and Taille verticale (158 pixels).
- CARACTERISTIQUES DU MASQUE:** Includes "Seuil du masque = 15 Niv. Gris" and "Seuil discontinuité = 3".
- POINT DE REFERENCE, PHASE INITIALE:** Includes "PHASE INITIALE = 0 degrés", "Position horizontale = 27 pixels", "Position verticale = 71 pixels", and a "SOURIS" button.
- CARACTERISTIQUES DU MONTAGE OPTIQUE:** Includes "Distance:" with fields for projecteur-éprouvette (1050 mm), caméra-projecteur (945 mm), and caméra-éprouvette (815 mm). It also includes "Pas du réseau = 0.5 mm", "Focale = 100 mm", and "Grandissement (mm/pixel) = 0.499376".
- At the bottom, "Hauteur / largeur des pixels = 0.73" is shown, along with "Cancel" and "OK" buttons.

Fig. A7.51. La fenêtre des paramètres avec le déphasage calculé

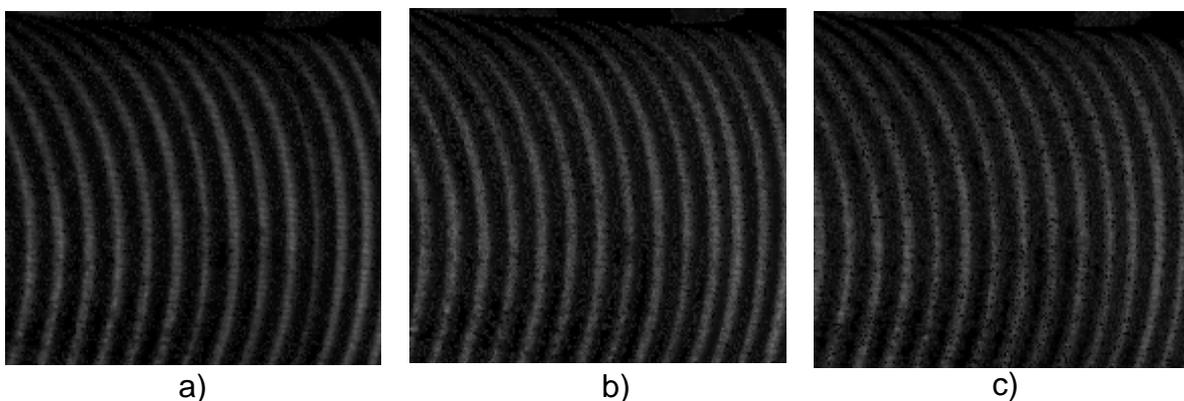
On lance la fenêtre de calcul du déphasage et des déplacements (Fig. 6.27.) et, à la fin, on obtient la valeur de la déformation de  $6,08 \times 10^{-1}$  mm (Fig. A7.52. a) et sa représentation sur le graphique réalisée par le logiciel "Surfer" (Fig. A7.52. b).



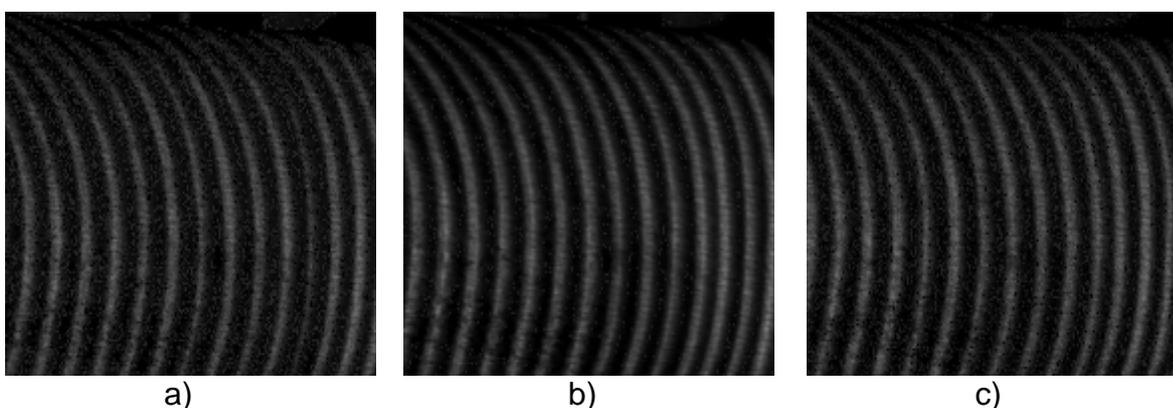
**Fig. A7.52.** a) La valeur de la déformation; b) L'image de la déformation en 3D

On a parcouru les mêmes pas pour la mesure des vibrations sur l'avant-bras, au fonctionnement en charge de la machine qu'on a parcouru pour la mesure des vibrations sur l'avant-bras au fonctionnement au ralenti.

On a acquis six images dont trois images en état statique (Fig. 6. A7.53. a, b, c) qui ont été déphasées l'une par rapport à l'autre de  $120^\circ$  et trois images avec la machine à percer au fonctionnement en charge (Fig. A7.54. a, b, c) le perçage avec une perceuse de  $\varnothing 14$  mm dans une pièce cylindrique avec le diamètre de 60 mm, ayant la vitesse de rotation de 355 rot/min et la vitesse d'avance  $a=0,16$  mm/rot.



**Fig. A7.53.** Les images de référence sur la main, avec la machine à percer arrêtée, pour l'étalonnage, déphasées entre elles de: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$



**Fig. A7.54.** Les images acquises sur la main, avec la machine à percer au fonctionnement en charge, déphasées entre elles de: a)  $0^\circ$ , b)  $120^\circ$  et c)  $240^\circ$

Dans la Figure A7.55. est donnée l'interface graphique du traitement des données acquises qui contient tous les paramètres utilisés pour calculer les vibrations et les déplacements.

La zone d'étude a été définie sur l'horizontale de 143 pixels et sur la verticale de 166 pixels.

Les caractéristiques du masque ont été établies pour le niveau de gris du seuil du masque de 10 et pour le seuil discontinu de 1.

Le point de référence au changement de la phase est 0, la position sur l'horizontale est de 24 pixels et sur la verticale de 86 pixels.

Les caractéristiques du montage optique sont les mêmes que pour la mesure au fonctionnement au ralenti.

Le pas du réseau des lignes est de 0,5 mm.

La distance focale est de 100 mm.

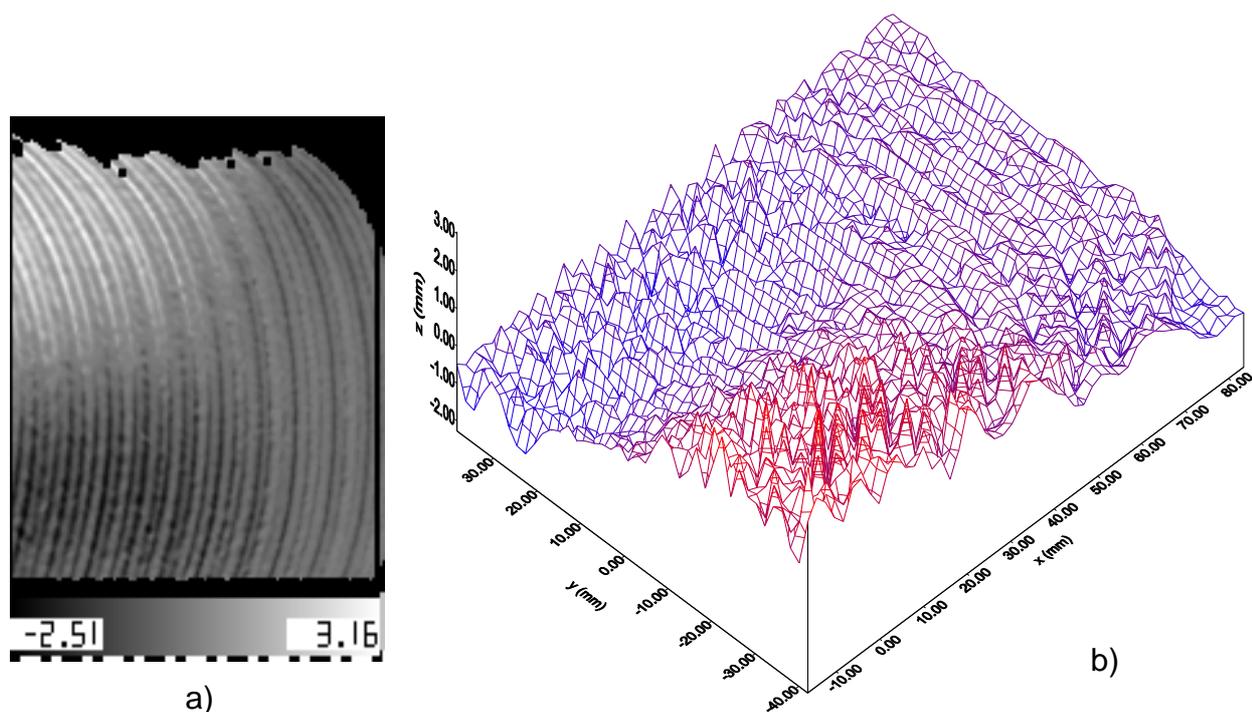
Ces grandeurs sont nécessaires pour calculer le relief et la déformation de la pièce. Le grandissement choisi a été de 0.525588 mm/pixels.

The screenshot shows a dialog box titled "Modifier l'Application" with several sections for parameter configuration:

- DEPHASAGES ENTRE IMAGES:** Includes a checkbox for "Calcul des décalages de phase" (unchecked). Below are two rows of phase shift values: "Décalage entre l'image n°1 et n°2" (Référence: 121.496, Déformée: 127.086) and "Décalage entre l'image n°1 et n°3" (Référence: -116.214, Déformée: -112.745), both in degrees.
- DEFINITION DE LA ZONE TRAITEE:** Includes a "SOURIS" button. Parameters: Position horizontale = 0 pixels, Position verticale = 0 pixels, Taille horizontale = 143 pixels, Taille verticale = 166 pixels.
- CARACTERISTIQUES DU MASQUE:** Parameters: Seuil du masque = 10 Niv. Gris, Seuil discontinuité = 1.
- POINT DE REFERENCE, PHASE INITIALE:** Parameters: PHASE INITIALE = 0 degrés, Position horizontale = 24 pixels, Position verticale = 86 pixels, and a "SOURIS" button.
- CARACTERISTIQUES DU MONTAGE OPTIQUE:** Parameters: Distance projecteur-éprouvette = 1050 mm, caméra-projecteur = 945 mm, caméra-éprouvette = 815 mm, Pas du réseau = 0.5 mm, Focale = 100 mm, Grandissement (mm/pixel) = 0.525588.
- Bottom row: Hauteur / largeur des pixels = 0.73, and "Cancel" and "OK" buttons.

Fig. A7.55. La fenêtre des paramètres avec le déphasage calculé

On a lancé la fenêtre de calcul du déphasage et des déplacements (Fig. 6.47.) et après il a résulté la valeur de la déformation de  $5,67 \times 10^{-1}$  mm (Fig. 6.121. a) et sa représentation sur le graphique avec le logiciel "Surfer" (Fig. 6.121. b).



**Fig. A7.56.** a) La valeur de la déformation; b) L'image de la déformation en 3D

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [ARG 07] Arghir, M., Runcan, M., *Study over the surface traffic inside the Cluj-Napoca Municipality*, The 1<sup>st</sup> International Conference Advanced Engineering In Mechanical Systems ADEMS'07, Gilău, 7-8 June 2007, Acta Tehnica Napocensis, nr. 50, vol. II, pag. 19-26, ISSN: 1221-5872, Editura UT Pres, Cluj-Napoca, România, 2007.
- [ARG 08] Arghir, M., Borza, D., Blaga, F., Vesseleny, T., Solea G., and Runcan, M., *Evaluation models for the noise reduction due to the phonique barrier walls*, Proceedings of Acoustic08, Paris, June – 4 July, issue 5, vol. 123, pag. 265-270, ISSN: 1520-852429, Paris, France, 2008.
- [ARG 99] Arghir, M., *Mechanics. Statics & material point kinematics.*, 186 pag., Editura U.T.Press, Cluj-Napoca, 1999.
- [BAR 01] Bartl, J., Fira, R., Hain, M., *Inspection of surface by the moirè method*, Measurement Science Review, 4 pag., Vol. 1, No. 1, 2001.
- [BER 04] Bergonnier, S., Hild, F., et Roux, S., *Essais mécaniques sur laine de verre crépée analysés par corrélation d'image*, Colloque National Mecamat "Mécanismes et Mécanique des Matériaux et Structures à Longueur Interne : Comportement et Effets d'Echelles", 2004.
- [BAD 07] Badea, M., C., *Studiul tensiunilor prin metode optice cu aplicații în construcția de mașini*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2007.
- [BOC 05] Bocquillon, B., Chambon, S., Alain C., *Segmentation semi-automatique en plans pour la génération de cartes denses de disparités*, Rapport IRIT/2005-23-R, IRIT, Université Paul Sabatier, 2005.
- [BOR 01] Borza, D., N., Laboratoire de Photomécanique du Laboratoire et département de Mécanique de l'INSA de Rouen, <http://photomeca.free.fr/>.
- [BOR 05] Borza, D., N., *Mechanical vibration measurement by high-resolution time-averaged digital holography*, Measurement Science & Technology, vol. 16, No. 9, Pages 1853-1864, ISSN: 0957-0233, 2005.
- [BOR 06] Borza, D., N., *Evolutions in Full-field Optoelectronic Coherent Metrology as Applied in Numerical Model Validation, Microscopy and Vibroacoustics*, Automation, Quality and Testing, Robotics, IEEE International Conference on Volume 2, Pages: 99 – 104, Cluj-Napoca, Romania, 2006.
- [BRA 90] Bratu, P., *Sisteme elastice de rezemare pentru mașini și utilaje*, Editura Tehnică, București, 1990.
- [BRE 01] Brèque, C., Brémand, F., *Modélisation de forme 3D par méthode de Moiré de projection et analyse par quasi- hétérodynage*, ORASIS, Cahors, 2001.
- [BRE 02] Brèque, C., *Développement et mise en œuvre de méthodes optiques pour la mesure de relief et de champ de déformations en vue de la modélisation d'organes biologiques*. Thèse de Doctorat de l'Université de Poitiers, Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées, 2002.
- [BRE 03] Brenders, P., and Sauzeix, M., *Cours Optique MP-PC-PSI-PT Physique, Methodes. Exercices résolus*. Collection: Les nouveaux précis Bréal, 319 Pages, ISBN 2-7298-1430-2, Éditeur Bréal, Paris 2003.

- [BRE 04] Brèque, C., Dupré, J., C., Brémand, F., *Calibration of a system of projection Moiré for relief measuring: biomechanical applications*. Optics and Lasers in Engineering, Vol. 41, Issue 2, Pages 241–260, ISSN: 0143-8166, 2004.
- [BRE 99] Brémand, F., *Cours de Photomécanique*, Université de Poitiers, 1998-1999.
- [BRI 06] Brillaud, J., et Lagattu, F., *Digital correlation of grainy shadow images for surface profile measurement*, International Journal for Light and Electron Optics, vol. 117, No. 9, Pages 411-417, ISSN: 0030-4026, 2006.
- [BUZ 79] Buzdugan, Gh., Mihăilescu, E., Radeş, M., *Măsurarea vibrațiilor*, Editura Academiei Republicii Socialiste Romania, 1979.
- [BUZ 82] Buzdugan, Gh., Fetcu, L., Radeş, M., *Vibrații mecanice*, 250 pag., Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982.
- [CHA 06a] Charrière, F., Pavillon, N., Colomb, T., et Depeursinge, C., *Living specimen tomography by digital holographic microscopy: morphometry of testate amoeba*, Optics Express, Vol. 14, No. 16, Pages 7005-7013, 2006.
- [CHA 06b] Charrière, F., A. Marian, A., Montfort, F., Kuehn, J., et Colomb, T., *Cell refractive index tomography by digital holographic microscopy*, Optics Letters, Vol. 31, No. 2, Pages 178-180, 2006.
- [CRE 92] Creath K., et Wyant, J., C., *Moiré and Fringe Projection Techniques*. Optical Shop Testing, ed. D Malacara (New York: Wiley), ISBN: 0-471-52232-5, 1992.
- [CRI 09] Cristea, A., F., *Transmisibilitatea vibrațiilor mecanice asupra organismului uman, cu referire la sistemul mână-braț*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2009.
- [DAR 83] Darabont, Al., Iorga, I., Ciodaru, M., *Măsurarea zgomotului și vibrațiilor în tehnică*, pag.1-113, Editura Tehnică, București, 1983.
- [DIN 4150] DIN 4150, *Erschütterungen im Bauwesen*, Teil 1, 2, 3, May 1986.
- [FRI 00] Fritz, M., *Simulating the response of a standing operator to vibration stress by means of a biomechanical model*, Journal of Biomechanics, No. 33, pag. 795-802, Elsevier science Ltd., U.K. 2000.
- [GAF 89] Gafițanu, M., Crețu, S., Drăgan, B., *Diagnosticarea vibroacustică a mașinilor și utilajelor*, Editura Tehnică, București, 1989.
- [GIL ] Gillich, G.,R., Potoceanu, N., Brie, M., *Modelarea comportării corpului uman supus la vibrații*, A XXVIII-a Conferință Națională de Mecanica Solidelor, pag. 61-66.
- [GRI 90] Griffin, M. J., *Handbook of Human Vibration*, pag., 1-781, Human Factors Research Unit, Institute of Sound and Vibration Research, The University, Southampton, Academic Press, U.K., 1990.
- [GUH 01] Gühring, J., *Dense 3-D surface acquisition by structured light using off-the-shelf components*, Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering, vol. 4309, pages 220-231, 2001.
- [GUI 06a] Guide des bonnes pratiques UE, *Guide des bonnes pratiques en matière de Vibrations mains-bras, Guide consultatif des bonnes pratiques en vue de l'application de la Directive 2002/44/EC relative aux exigences minimales d'hygiène et sécurité pour l'exposition des employés aux risques résultant d'agents physiques (vibrations)*, 2006.
- [GUI 06b] Guide des bonnes pratiques UE, *Guide des bonnes pratiques en matière de Vibrations globales du corps, Guide consultatif des bonnes pratiques en vue de l'application de la Directive 2002/44/EC relative*

- aux exigences minimales d'hygiène et sécurité pour l'exposition des employés aux risques résultant d'agents physiques (vibrations), 2006.
- [HAR 02] Harris, C., M., *Harris' shock and vibration handbook*, ISBN: 0-07-137081-1, 2002.
- [HAR 68] Harris, C., M., Crede, C., Șocuri și vibrații, Vol. I, Bazele teoretice. Măsurări, pag., 1- 63, Vol. II, Analiza rezultatelor măsurărilor. Încercări. Metode de combatere a șocurilor și vibrațiilor, pag. 267-321, Vol. III, Șocuri și vibrațiile mașini, vehicule și construcții, pag. 267-320, Traducere din limba Engleză, Editura Tehnică, București, 1968.
- [HER 07] Hertigova, E., *Vibrații Mecanice*, Capitolul 1 – Noțiuni fundamentale, 22 pag., Capitolul 2 - Cinematica vibrațiilor, 24 pag., 2007.
- [HOT 06] Hotărâre de Guvern, nr. 1876, 22 dec. 2005 privind cerințele minime de securitate și sănătate la expunerea lucrătorilor la riscurile generate de vibrații, Publicat în monitorul Oficial, Partea I, nr. 81, Secțiunea a 2-a, 2006.
- [ISP 84] Ispas, C., Ionescu, I. A., Ionescu, V. A., și al., *Ergonomia mașinor-unelte*, Editura Tehnică, București, 1984.
- [ISP 97] Ispas, V., Olea, G., Arghir, M., și al., *Mecanică*, pag. 389-429, Editura Dacia și autorii, ISBN: 973-35-0697-4, Cluj-Napoca, 1997.
- [KAI 05] Kaifu, Wang, *Speckle Metrology Techniques and Applications*, Teză de Doctorat, University of Wollongong, Faculty of Engineering, School of Mechanical, Materials and Mechatronic Engineering, 2005.
- [LEB 06] Lebrun, D., Allano, D., Salah, N., Nicolas, E., Coëtmellec, S., Brunel, M., et Godard, G., *Holographie numérique appliquée aux écoulements, granulométrie et vélocimétrie*, Congrès Francophone de Techniques Laser – CFTL, 7 Pages, Toulouse, 2006.
- [LEV 06] Leval, J., *Etude et Développement de Capteurs Holographiques Numériques pour l'Analyse de Vibrations*, Thèse de Doctorat de l'Université du Maine-Académie de Nantes, 192 Pages, 2006.
- [MAL 07] Malacara, D., *Optical Shop testing*, 3rd Edition, Wiley-Interscience, A John Wiley and Sons, Inc., Publication, 862 Pages, ISBN: 978-0-471-48404-2, New York, 2007.
- [MAL 98] Malchaire, J., *Stratégie d'évaluation et de prévention des risques liés aux vibrations mains – bras*, l'Université catholique de Louvain Clos Chapelle aux Champs 3038, Commissariat général à la Promotion du Travail, Ministère fédéral de l'Emploi et du Travail, 62 pages, B-1200 Bruxelles, 1998.
- [MAR 04] Martínez-Celorio, R., A., Joris, J., Dirckx, J., and all, *Out-of-plane displacement measurement by means of endoscopic moiré interferometry*, American Institute of Physics, Review of Scientific Instruments, Volume 75, Number 2, 2004.
- [MAT 03] Matsumoto, Y., Griffin, M.J., *Mathematical models for the apparent masses of standing subjects exposed to vertical whole-body vibration*, Journal of Sound and Vibration 260, Elsevier Science Ltd., pag. 431-451, U.K. 2003.
- [MOU 07] Moulart, R., *Développement et mise en œuvre d'une méthode de mesure de champs de déformation à l'échelle micrométrique*, Thèse de Doctorat de L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Université du Maine – Académie de Nantes, Faculté des Sciences et Techniques - ENSIM, 162 Pages, Paris, 2007.
- [PER 09] Perez, F., Bissonnette, B., Gagne, R., *Parameters affecting the debonding risk of bonded overlays used on reinforced concrete slab*

- subjected to flexural loading*, Journal Materials and structures, ISSN 1359-5997, Vol. 42, No. 5, pages 645-662, Springer, Dordrecht, PAYS-BAS, 2009.
- [PIC 08] Picart, P., *Holographie. Applications à la mesure sans contact et aux CND optiques*, Optique pour l'Ingénieur: Interférences et Diffraction, Université du Maine – ENSIM, cours en ligne, 2008.
- [POI 06] Poidsvet, L., "Stagiu de master", la INSA (Institutul Național de Știință Aplicată din Rouen), în laboratorul LMR (Mecanică), director, D. Borza, 2006
- [PUR 06] Purcell, D., Davies A., et Farahi, F., *Effective wavelength calibration for Moiré fringe projection*. Applied Optics, Vol. 45, No. 34, Pages 8629-8635, 2006.
- [RAS 83] Rasmussen, G., *Human Body Vibration Exposure and its Measurement*, The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 73, Issue 6, pp. 2229-2235, 1983.
- [ROD 99] Rodella R., et Sansoni, G., *3D Shape Recovery and Registration Based on the Projection of Non-Coherent Structured Light*, Second International Conference on 3-D Imaging and Modelling - 3DIM'99, Ottawa, Canada, Pages 77-83, ISBN: 0-7695-0062-5, 1999.
- [ROȘ 06a] Roș, L., Arghir, M., *Study About G forces*, Acta Tehnica Napocensis, Nr. 49, vol. I, pag. 67-73, ISSN 1221-5872, Editura UT Pres, Cluj-Napoca, 2006.
- [ROȘ 06b] Roș, L., Arghir, M., *Efectele dăunătoare ale vibrațiilor asupra manipulatorului motostivitorului*, A VI-a Conferință Națională Multidisciplinară – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2 – 4 iunie 2006, pag. 481 – 484, Vol. 9, ISBN: 973-720-029-2, ISBN: 973-6130-62-4, Editura AGIR, București, 2006.
- [ROȘ 06c] Roș, L., Referat, *Contribuții la studiul vibrațiilor asupra omului și mediului ambiant cu localizare în Municipiul Cluj-Napoca*, U.T.C.N., Cluj-Napoca, România, 2006.
- [RUN 07] Runcan, M., *Cinematica mișcării vibratorii cu implicații asupra organismului uman*. Proiect de cercetare științifică, U.T.C.N., Cluj-Napoca, România, 2007.
- [RUN 08a] Runcan, M., Raport de cercetare. *Studiu privind acțiunea vibrațiilor asupra organismului uman în mediul vibrațional*. Stadiul actual, Referat nr. 1, U.T.C.N., Cluj-Napoca, România, ianuarie 2008.
- [RUN 08b] Runcan, M., *Mesures locales et de champs dans l'interaction homme - structure*, Rapport d'avancement de la thèse, Referat nr. 2, 63 pag., Rouen, France, juin 2008.
- [RUN 08c] Runcan, M., *Mărimi cinematice locale și de câmp în interacțiunea om-structură*, Raport de cercetare științifică nr. 3, 56 pag., Cluj-Napoca, România, octombrie 2008.
- [RUN 08d] Runcan, M., Arghir, M., *La technique moiré de projection*, publicată în Acta Technica Napocensis, Seria: Applied Mathematics and Mechanics, Vol. IV, Nr. 51, pag. 117-120, ISSN: 1221-5872, Cluj-Napoca, 2008.
- [RUN 08e] Runcan, M., Arghir, M., *La mesure de vibration par la technique de l'interférométrie de speckle*, publicată în Acta Technica Napocensis, Seria: Applied Mathematics and Mechanics, Vol. IV, Nr. 51, 2008, pag. 121-124, Technical University of Cluj-Napoca, ISSN: 1221-5872.
- [RUN 09a] Runcan, M., Arghir, M., *Aplicație de măsurare a deplasărilor în câmp*

- prin corelație de imagini numerice*, Lucrările celei de A IX Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională– „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii ramânești”, Sebeș, Publicat în Știință și Inginerie, vol. 16, pag. 187-192, Ed. AGIR, București, ISBN: 973-8130-82-4, ISBN: 978-973-720-246-8, 2009
- [RUN 09b] Runcan, M., Botean, A., Arghir, M., *Contribution à l'étude expérimentale par méthode Moiré de projection sur production et transmission les vibrations mécaniques sur le corps humain*, The 2<sup>ND</sup> International Conference Advanced Engineering In Mechanical Systems ADEMS'09, Cluj-Napoca, Gilău, 24-25 September, Technical University of Cluj-Napoca, Acta Technica Napocensis, Series: Applied Mathematics and Mechanics 52, Vol. III, ISSN: 1221 – 5872, Pag. 53 – 56, Romania, 2009.
- [SAN 97] Sansoni, G., Corini, S., Lazzari, S., Rodella, R., and Docchio F., *Three-dimensional imaging based on Gray-code light projection: characterization of the measuring algorithm and development of a measuring system for industrial applications*, Applied Optics, Vol. 36, Issue 19, pages 4463-4472, 1997.
- [SAN 99] Sansoni, Giovanna, Carocci, Matteo, and Rodella, Roberto, *Three-dimensional vision based on a combination of gray-code and phase-shift light projection: analysis and compensation of the systematic errors*, Applied Optics, Vol. 38, Issue 31, pages 6565-6573, 1999.
- [SCH 02] Schnars, U., Werner, P., Jüptner, O., *Digital recording and numerical reconstruction of holograms*, Measurement Science and Technology, Vol. 13, Issue 9, pp. R85-R101, Editeur Institute of Physics Publishing, Bristol, Royaume-UNI, ISSN: 0957-0233, 2002.
- [SMI 76] Smigielki, P., *Holographie et Applications*. Université Louis-Pasteur de Strasbourg, Paris, France, 66 Pages, Conf. on Inform. sur les Appl. de l'Holographie au Control non Desctructif, Paris, 1976.
- [SMI 98a] Smigielski, P., *Interférométrie holographique*. Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle, Université Louis-Pasteur de Strasbourg, Référence AF3345, 13 Pages, Paris, France, 1998.
- [SMI 98b] Smigielski, P., *Holographie optique*, Techniques de l'ingénieur. Sciences fondamentales, Université Louis-Pasteur de Strasbourg, vol. AF3, 19 Pages, Paris, France, 1998.
- [SMI 01a] Smigielski, P., *Holographie optique. Interférométrie holographique*. Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle, Université Louis-Pasteur de Strasbourg, Référence R6330 vol. RD3, 28 Pages, ISSN: 0399-4147, Paris, France, 2001.
- [SMI 01b] Smigielski, P., *Interférométrie de speckle*. Université Louis-Pasteur de Strasbourg, Techniques de l'ingénieur. Mesures et contrôle ISSN 0399-4147, vol. RD3, 10 Pages, Paris, France, 2001.
- [SUR 98] Surrel, J., et Surrel, Y., *La technique de projection de franges pour la saisie des formes d'objets biologiques vivants*. Journal of Optics, Volume 29, No. 1, Février, Pages 6–13. Publisher: Institute of Physics, Bristol, ISSN: 0150-536X: 6, 1998.
- [SUR 00] Surrel, Y., *Métrologie optique par décalage de phase: mesure de formes, de champs de déplacements et de déformations*. Conservatoire National des Arts et Métiers, Optique C1 – 1999/2000, 64 Pages, 2000.
- [SUR 03] Surrel, Y., *Optique C1— 18851 Images optiques; mesures 2D et 3D*, Polycopié de cours— 2003/2004, 171 Pages, 2003.

- [SUR 05] Surrel, Y., *Les techniques optiques de mesure de champ: essai de classification*. Congrès Photomécanique, 31 Pages, ISBN : 2-9511591-3-7. Editeur: École des mines d'Albi Carmaux, Albi, France, 2005.
- [SVA 07] Svantek, Instrumentation for sound and vibration measurements, *SVAN PC+ software User Manual*, ver. 1.0, SVAN 958 Four Channels Sound and Vibration Analyser, [www.svantek.com](http://www.svantek.com), 2007.
- [ȘOL 08] Șolea G., Arghir M., Borza D. and Runcan M., *Study of the surface traffic inside the Cluj-Napoca urban agglomeratio*, Proceedings of Acoustic08, vol. 123, issue 5, pag. 1767-1772, Paris, 29 June – 4 July, ISSN: 1520-8524, Franța, 2008.
- [TRI 07] Triconnet, K., *Identification des propriétés mécaniques a partir de mesures de champs dans un matériau multi-phase*, Thèse de Doctorat de L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 222 Pages, Paris, 2007.
- [TRU 06] Truță, A., Arghir, M., *Operatorul uman în mediu vibrațional*, Simpozionul național cu participare internațională, „Mediul – Cercetare, Protecție și Gestiune”, “Environment & Progress”, Ediția a VI-a, Rezumatul publicat în programul sesiunii de comunicări, Secțiunea S3, Subsecțiunea T3 – Analiza mediului și sănătatea umană, fișier htm (pe CD), Universitatea Babeș - Bolyai, Facultatea de Știința Mediului, Cluj-Napoca, 28 – 29 Oct. 2006.
- [TRU 09] Truță, A., *Modelări biomecanice ale organismului uman sub acțiunea vibrațiilor mecanice în mediul de lucru*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, 2009.
- [URS 84] Ursu, N., F., *Vibrații mecanice*, Institutul Politehnic Cluj-Napoca, Facultatea de Mecanică, Cluj-Napoca, 252 pag., 1984.
- [URS 98] Ursu-Fischer, N., *Vibrațiile sistemelor mecanice. Teorie și aplicații*, Casa Cărții de Știință, 452 pag., Cluj-Napoca, România, 1998.
- [VAN 01] VanSickle, D.P., Cooper, R.A., Boninge, L.R., DiGiovine, C.P., *Analysis of vibrations induced during wheelchair propulsion*, Journal of Rehabilitation Research and Development, Vol. 38, No. 4, July/August 2001.
- [VOI 83] Voinea, R., Voiculescu, D., Ceaușu, V., *Mecanică*, Pag. 476-518, Editura Didactica si Pedagogica Bucuresti, 1983.
- [WEI 05] Wei, Z., Zhang, G., *Inspecting verticality of cylindrical work pieces via multi-vision sensors based on structured light*, Optics and lasers in engineering ISSN: 0143-8166, vol. 43, No. 10, Pages 1167-1178, 2005.
- [WUH 06] Wu, H., B., Chen, Y., Wu, M., Y., Guan, C., R., and Yu, X., Y., *3D Measurement Technology by Structured Light Using Stripe-Edge-Based Gray Code*, International Symposium on Instrumentation Science and Technology, Institute of Physics Publishing, Journal of Physics: Conference Series, Volume 48, Issue 1, Pages 537–541, Shanghai Jiao Tong University, China, 2006.

**Standarde:**

- [SR ISO 2631/1] SR ISO 2631-1:2001, Evaluarea expunerii umane la vibrațiile globale ale corpului. Partea 1. Condiții generale. 2001.
- [SR ISO 2631/2] SR ISO 2631-2:1997, Evaluarea expunerii umane la vibrațiile globale ale corpului. Partea 1. Condiții generale. 1997.
- [SR ISO 2631/3] SR ISO 2631-3:1997, Evaluarea expunerii umane la vibrații globale verticale ale corpului pe axa z în domeniul de frecvență de la 0,1 Hz până la 0,63 Hz. 1997.
- [SR ISO 5349/1] SR EN ISO 5349-1, Vibrații mecanice. Măsurarea și evaluarea expunerii umane la vibrații transmise prin mână. Partea 1: Cerințe generale. 2003.
- [SR ISO 5349/2] SR EN ISO 5349-2, Vibrații mecanice. Măsurarea și evaluarea expunerii umane la vibrații transmise prin mână. Partea 2: Indicații practice pentru măsurarea la locul de muncă. 2003.
- [SR ISO 8041] SR ISO 8041-2005, Răspunsul uman la vibrații. Aparatură de măsurare, 2005.
- [SR ISO 8727] SR ISO 8727, Vibrații și șocuri mecanice. Expunere umană. Sisteme de coordonate biodinamice. 2001.
- [SR ISO 10819] SR ISO 10819, Mechanical Vibration and Shock-Human Exposure-Biodynamic Coordinate Systems. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 1996.