
PROBLEMES NEUROSENSORIELS LIES A L'EXPOSITION AUX MACHINES VIBRANTES

Prof. J. Malchaire (Promotor)
N. Cock
A. Piette
F. Amaral
L.S Rodrigues Dias
D. de Schaetzen

Centre de Médecine et Hygiène du Travail et de l'Environnement,
Unité Hygiène et Physiologie du Travail -UCL-

TABLE DES MATIERES

AVANT PROPOS	1
I. INTRODUCTION	3
A. Position du problème	4
B. Evolution des études	4
C. Etudes concernant les pathologies liées à l'exposition aux vibrations	4
D. Etudes concernant les pathologies non liées à l'exposition aux vibrations	4
E. Etudes conjointes sur les vibrations et mouvements/efforts répétitifs	4
F. Objectifs de la revue de la littérature	4
II. PATHOLOGIES LIEES A L'UTILISATION DES MACHINES VIBRANTES (HAVS)	6
A. Définition	6
B. Lésions ostéo-articulaires	6
1. Arthrose	7
2. Maladie de Kienböck	7
3. Maladie de Köhler	7
4. Géodes	7
C. Lésions vasculaires	8
D. Lésions neurologiques	9
1. Phase réversible: troubles neurologiques à court terme	9
2. Phase irréversible: troubles neurologiques à long terme	9
3. Classification des troubles neurologiques	9
E. Examen clinique des HAVS	9
F. Tests neurologiques	10
1. La conduction nerveuse (NCV, TLM, TLS)	10
2. Le seuil de perception aux vibrations (SPV)	11
3. Le seuil de perception à la température (SPT)	12
4. Le seuil de perception à la pression (SPP)	13
5. Les esthésiomètres	13
6. La force maximale volontaire (FMV)	14
7. Le test de dextérité du Purdue Pegboard (PPg)	14
8. Synthèse des tests neurologiques	14

III. PATHOLOGIES MUSCULOSQUELETTIQUES DU MEMBRE SUPERIEUR (TMS)	16
A. Définition	16
B. Description et examen clinique des pathologies MS les plus fréquentes au niveau du membre supérieur et de la nuque	18
1. La nuque	16
a. La cervicarthrose	16
b. Syndrome tensionnel de la nuque (Tension neck syndrome)	16
c. Syndrome du défilé thoraco-brachial (Thoracic outlet syndrome)	16
2. Les épaules	16
a. Tendinite de la coiffe des rotateurs	16
b. Ténosynovite du long chef du biceps brachial	17
c. L'épaule gelée (Frozen shoulder)	17
d. Syndrome de l'articulation acromio-claviculaire	17
3. Les coudes	17
a. L'épicondylite (Tennis elbow)	17
b. L'épitrôchléite (Golfer's elbow)	17
4. Les poignets	17
a. Les ténosynovites	18
b. Syndrome du canal carpien	18
c. Le syndrome de la loge de Guyon	18
C. Tests fonctionnels et sensitifs	18
D. Facteurs associés aux TMS	19
1. Facteurs liés au poste de travail	19
2. Facteurs extraprofessionnels	20
3. Facteurs individuels	20
4. Facteurs psychosociaux et organisationnels	20
IV. EPIDEMIOLOGIE DES PLAINTES DU MEMBRE SUPERIEUR (TMS ET HAVS)	21
MATERIEL ET METHODES	23
I. SELECTION DE LA POPULATION	23
II. PROTOCOLE D'ETUDE	23
A. Le questionnaire	24
B. L'examen clinique	24
C. Les tests fonctionnels et sensitifs	26
1. La force de préhension maximale	26
2. Les angulations maximales du poignet	26
3. La sensibilité tactile à la pression	27
4. Le seuil de perception des vibrations	27
5. Le temps de latence sensitif	28
6. La dextérité manuelle	29
III. L'ANALYSE DES CONDITIONS DE TRAVAIL	29
A. Les vibrations des machines vibrantes	29
B. Les contraintes biomécaniques	30
1. Le Polylog	30
2. Etalonnage des goniomètres	30

3. Placement des capteurs et mesurage des valeurs maximales	31
4. Protocole de mesurages	31
5. Analyse des enregistrements	31
C. L'exposition réelle aux vibrations	32
IV. LES POSTES DE TRAVAIL	33
A. L'industrie automobile	33
1. Les boulonneurs (poste 1)	33
2. Les ponceurs (poste 2)	33
B. Les carrières	34
C. La construction (poste 5)	34
D. Travaux de menuiserie (poste 6)	34
E. Entreprises métalliques	35
1. Les sièges (poste 7)	35
2. Les wagons (poste 8)	35
F. La canonnerie (poste 9)	35
G. Entreprise sidérurgique (GR2 et GR3)	35
1. Groupe 2 (GR2): travaux lourds et répétitifs (poste 10)	35
2. Groupe 3 (GR3): travaux légers (poste 11)	35
<i>ANALYSE DES CONTRAINTES BIOMECANIQUES DES POIGNETS AUX POSTES DE TRAVAIL</i>	37
I. POPULATION	37
II. CARACTERISTIQUES DES GESTES PROFESSIONNELS	37
A. Moyennes globales	37
B. Moyennes et coefficients de variation par groupe de travailleurs	38
1. Moyennes des paramètres	39
2. Coefficients de variation des paramètres	40
III. COMPARAISON DES PARAMETRES DE CONTRAINTE BIOMECANIQUE	41
IV. COMPARAISON DES CONTRAINTES BIOMECANIQUES AUX DIFFERENTS POSTES DE TRAVAIL AVEC EXPOSITION AUX VIBRATIONS	42 43
V. PERCEPTION DES EFFORTS ET DE LA PENIBILITE PAR LES TRAVAILLEURS	47
A. Analyse des efforts perçus	47
B. Pénibilité physique et mentale	47
C. Relation avec les paramètres de contrainte biomécanique	47
<i>ANALYSE DES VIBRATIONS DES MACHINES VIBRANTES ET DE LA CONTRAINTE VIBRATOIRE AUX POSTES DE TRAVAIL</i>	49
I. DESCRIPTION DES MACHINES VIBRANTES	49
A. Poste 1: Les boulonneurs (secteur automobile)	49
B. Poste 2: Les ponceurs (secteur automobile) – finition	49
C. Poste 3: Les rocteurs de fond et de surface (carrières A et C)	50
D. Poste 4: Les tailleurs de pierre (3 carrières)	50
E. Poste 5: Construction: pas d'analyse des vibrations.	51

F. Poste 6: Travaux de menuiserie - réfection des palettes	51
G. Poste 7: Les sièges	51
H. Poste 8: Les wagons	51
I. Poste 9: La canonnerie	52

II. CARACTERISTIQUES VIBRATOIRES DES MACHINES VIBRANTES	52
A. Synthèse des mesurages	52
B. Analyses spectrales et temporelles des vibrations	56
1. Meuleuses, ponceuses (type 1)	56
2. Boulonneuses (type 2)	60
3. Foreuses, visseuses, ... (type 3)	60
4. Scie électrique (type 4)	60
5. Cloueuse électrique (type 5)	60
6. Marteaux perforateurs, frappeur (type 6)	60
III. EVALUATION DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS	66
A. Enregistrement des vibrations aux postes de travail	66
B. Comparaison des durées d'exposition aux vibrations estimées par l'observateur avec l'aide des travailleurs et celles mesurées au poste de travail	67
C. Estimation de la dose vibratoire personnelle	68
CHAPITRE 5 - RESULTATS DE L'ETUDE TRANSVERSALE	70
I. LA POPULATION ET SES CARACTERISTIQUES	70
A. Effectifs et caractéristiques personnelles	70
B. Caractéristiques générales relevées par le questionnaire et différences entre groupes	71
C. Caractéristiques concernant l'activité professionnelle actuelle et antérieure	72
1. Poste de travail actuel	72
2. Poste de travail antérieur	73
II. LES AFFECTIONS MUSCULOSQUELETTIQUES	74
A. Prévalences des plaintes MS	74
B. Prévalences des troubles relevés par l'examen clinique	77
C. Répartition des plaintes vasculaires selon l'échelle de Stockholm	79
D. Prévalences de plaintes neurologiques	79
1. Globalement, pour les 3 groupes	79
2. Répartition des plaintes neurologiques selon l'échelle de Stockholm	80
E. Relations entre les plaintes MS et neurologiques relatives aux poignets et les résultats du questionnaire	81
1. Plaintes musculosquelettiques au niveau des poignets/mains	81
2. Troubles neurologiques au niveau des poignets/mains	83
III. LES TESTS FONCTIONNELS ET SENSITIFS	84
A. Moyennes des différents tests	84
B. Relations entre les tests fonctionnels et sensitifs	86
C. Analyse multivariée entre les résultats des tests fonctionnels et sensitifs et les caractéristiques des travailleurs	89
D. Associations entre les plaintes neurologiques et les résultats des tests fonctionnels et sensitifs	91
E. Relation entre la définition subjective de l'atteinte neurologique (Stockholm) et les tests fonctionnels et sensitifs	92

IV. PROBABILITE DE PLAINTES MUSCULOSQUELETTIQUES ET NEUROLOGIQUES ET CONTRAINTES BIOMECANIQUES ET VIBRATOIRES AU POSTE DE TRAVAIL	94
CHAPITRE 6 - RESULTATS DE L'ETUDE PROSPECTIVE	98
I. INCIDENCES	98
A. Population	98
B. Incidences de plaintes musculosquellettiques au niveau de la nuque, des épaules, des coudes, des poignets et du dos et des plaintes neurologiques au niveau des mains	98
C. Incidences des pathologies au niveau du poignet relevées lors de l'examen clinique	100
D. Incidence de plaintes avérées MS et neurologiques au niveau du poignet	100
1. Définition du degré de sévérité des plaintes	100
2. Incidence du degré de sévérité des plaintes	100
3. Incidences de plaintes avérées en terme de poignets	101
II. PROBABILITE DE PLAINTES "AVEREES" MS, FACTEURS PERSONNELS ET CONTRAINTES BIOMECANIQUES ET VIBRATOIRES	102
A. Analyse sur base des groupes et des données des interviews	103
B. Analyse sur base des contraintes biomécaniques et vibratoires mesurées aux postes de travail	103
III. PROBABILITE DE PLAINTES "AVEREES" NEUROLOGIQUES, FACTEURS PERSONNELS ET CONTRAINTES BIOMECANIQUES ET VIBRATOIRES	105
A. Analyse sur base des données de l'interview	105
B. Analyse sur base des contraintes biomécaniques et vibratoires mesurées au poste de travail	106
IV. RELATIONS ENTRE LES INCIDENCES D'AGGRAVATION DES PLAINTES MS ET NEUROLOGIQUES ET LES TESTS FONCTIONNELS ET SENSITIFS COMPTE TENU DES FACTEURS PERSONNELS ET PSYCHOSOCIAUX	108
A. Comparaison des résultats des tests entre sujets (poignets) avec et sans plaintes avérées (MS ou neurologiques)	108
B. Analyses logistiques des relations entre plaintes et résultats des tests antérieurs	108
1. Plaintes MS	109
2. Plaintes neurologiques	109
CHAPITRE 7 - DISCUSSION	111
I. METHODOLOGIE	111
A. Schéma de l'étude	112
B. Sélection de la population	112
C. Entrevue avec les travailleurs	113
D. Mesurage des contraintes au poste de travail	114
1. Mesurage des contraintes biomécaniques au niveau des poignets	114
2. Mesurage des contraintes vibratoires au poste de travail	115
3. Représentativité des mesurages	116
E. Analyse statistique	117

II. LES CONTRAINTES DE TRAVAIL	117
A. Contraintes biomécaniques	117
B. Contraintes vibratoires (groupe 1)	119
III. ETUDE TRANSVERSALE	121
A. Prévalence	121
B. Objectivation des plaintes MS et neurologiques à partir des tests fonctionnels et sensitifs	123
C. Associations entre les contraintes aux postes de travail et les plaintes MS (poignets) et neurologiques	124
IV. ETUDE PROSPECTIVE	124
A. Incidences	124
B. Prédiction des plaintes MS (poignets) et neurologiques avérées à partir des tests fonctionnels et sensitifs	125
C. Relations entre les contraintes biomécaniques et vibratoires et les plaintes MS (poignets) et neurologiques	125
 CHAPITRE 8 – CONCLUSIONS	 130
1. Faire la synthèse de la littérature sur les problèmes musculosquelettiques du membre supérieur chez les travailleurs avec et sans exposition aux vibrations	130
2. Etudier les prévalences de problèmes musculosquelettiques, vasculaires et neurologiques dans la population ouvrière belge	130
3. Etudier la relation entre ces prévalences de problèmes MS et neurologiques et les facteurs individuels, les facteurs biomécaniques et les caractéristiques d'exposition aux vibrations	130
4. Discuter la validité de la pondération fréquentielle proposée par la norme ISO 5349	130
5. Etudier la relation entre les différents stades d'atteinte neurologiques de l'échelle de Stockholm et les résultats de certains tests fonctionnels et sensitifs	131
6. Prédire l'atteinte neurologique en fonction de la nature de l'exposition aux vibrations	131
7. Déterminer des valeurs limites de l'exposition aux vibrations	131
 BIBLIOGRAPHIE	 132

*
* *

AVANT PROPOS

Sur base d'études réalisées à l'étranger, on peut estimer en Belgique à quelque 50.000 le nombre de travailleurs qui seraient exposés de manière très importante aux vibrations des machines vibrantes.

Cette exposition aux vibrations manubrachiales est connue comme pouvant entraîner:

- des problèmes ostéo-articulaires au niveau principalement des poignets et des coudes;
- des problèmes vasculaires: le phénomène du doigt blanc d'origine vibratoire au niveau des mains;
- des problèmes neurologiques.

La présente étude concerne la détection précoce de ces troubles neurologiques. Ils consistent en une neuropathie sensitive diffuse qui, à la différence de la polyneuropathie périphérique, ne concerne que les membres supérieurs, voire les mains. Cette neuropathie périphérique se traduit par une élévation des seuils de perception des vibrations, de la pression et de la chaleur. Elle reflète une perturbation fonctionnelle des nerfs périphériques et des terminaisons nerveuses sensibles sans atteinte du système nerveux central. Elle se traduit par des picotements et engourdissements des mains au début insignifiants mais susceptibles d'influencer par la suite la dextérité manuelle et dès lors les performances manuelles. Cette interférence pourrait tout autant apparaître suite à des modifications transitoires des seuils de sensibilité résultant d'une exposition à court terme aux vibrations. L'ampleur de ces élévations transitoires ainsi que leur récupération dans le temps reste à quantifier en fonction de l'intensité, de la fréquence et de la durée des vibrations.

Le but de la présente recherche prospective est d'étudier la relation de cause à effet entre les caractéristiques d'exposition tant biomécaniques que vibratoires, les caractéristiques anthropométriques et sociales et l'apparition et le développement de cette atteinte neurologique.

Les problèmes qui se posent sont:

1. la quantification de l'exposition aux vibrations et en particulier la validité de la pondération en fréquence préconisée par la norme ISO 5349 (1986);
2. la quantification de l'astreinte. Une échelle de gradation des symptômes neurologiques a été proposée (échelle de Stockholm) (Brammer et al., 1987), basée sur les plaintes des sujets. De même une échelle est utilisée en rapport avec certains tests pour décrire la sévérité de l'altération du toucher (toucher normal, diminution de la perception du toucher léger, sensation protectrice diminuée et perte de sensation protectrice).
Reste à corrélérer ces échelles subjectives avec des tests objectifs permettant de mieux authentifier et quantifier l'atteinte.

La présente étude est complémentaire à celle menée entre 1990 et 1994 (Malchaire, 1995) dans le cadre du programme "Risques pour la santé" des Services fédéraux des Affaires scientifiques, techniques et culturelles.

Cette étude précédente s'intéressait à la pathologie musculosquelettique et neurologique liée au travail de force et répétitif, à l'exclusion des vibrations. La présente recherche couvre cet aspect.

Les pathologies neurologiques rencontrées dans les deux cas présentent des points communs mais semblent d'origines différentes. Le syndrome du canal carpien est une des pathologies principales liées au travail répétitif. Il s'agit cependant d'une neuropathie de compression due à la compression du nerf médian dans le canal carpien lors d'efforts réalisés de manière répétitive avec des mouvements de flexion et d'extension du poignet. Au contraire, la neuropathie due aux vibrations résulte d'une perturbation fonctionnelle des nerfs et terminaisons nerveuses sensibles périphériques, perturbation qui n'est pas limitée aux zones innervées par le nerf médian, mais s'étend à toute la main.

Quoiqu'il en soit, cette neuropathie se traduit par des picotements et des engourdissements de la main qui peuvent avoir des répercussions du même ordre sur les conditions de travail.

Les principaux objectifs de la présente étude sont de:

1. Réaliser une synthèse de l'abondante littérature qui existe à la fois au sujet des problèmes musculosquelettiques du membre supérieur et des problèmes liés à l'utilisation des machines vibrantes.
2. Décrire les prévalences de problèmes vasculaires et neurologiques dans des populations ouvrières belges où le problème est largement ignoré.

3. Etudier la relation entre prévalences de problèmes neurologiques et facteurs individuels, facteurs biomécaniques et caractéristiques d'exposition aux vibrations (intensités, fréquences, durées).
4. Emettre un jugement quant à la validité de la pondération fréquentielle proposée par la norme ISO 5349.
5. Mettre en évidence si possible une valeur limite de la dose de vibration.
6. Etablir la relation entre la définition subjective de l'atteinte (échelle de Stockholm) et les résultats de tests quantitatifs portant sur l'atteinte isolée des mécanorécepteurs, sur la qualité de la sensibilité tactile ou sur la capacité fonctionnelle de la main.
7. Décrire l'évolution de l'atteinte neurologique en fonction de la nature de l'exposition aux vibrations.

I. INTRODUCTION

A. Etat du problème

Les mains et les membres supérieurs dans leur ensemble sont de loin les outils les plus essentiels de l'être humain. Leur fantastique structure leur permet l'exécution aussi bien de tâches de précision que de tâches de force, de mouvements lents et minutieux que de mouvements rapides. Au cours de ces tâches professionnelles ou extraprofessionnelles, les membres supérieurs sont soumis à un ensemble de contraintes biomécaniques.

De très longue date, des travaux (Loriga, 1911; Hamilton, 1918) ont décrit certaines de ces contraintes et les pathologies qui leur étaient associées. Ce n'est cependant que depuis quelque 30 ans que les études dans ce domaine se sont vraiment multipliées du fait d'un développement parfois endémique de ces pathologies alors que d'autres (silicose, empoisonnements chimiques, ...) s'estompaient. De nombreux laboratoires des pays industrialisés (C.E.E., pays scandinaves, U.S.A., Canada, Japon, ...) se sont préoccupés du problème et de nombreuses études, en laboratoire et en entreprise, ont été et sont toujours menées.

Ces études ont abouti fin des années 80, début 90 à de nombreux ouvrages de synthèse décrivant les contraintes auxquelles sont soumis les différents segments corporels, la manière de les évaluer, de les prévenir, les pathologies qui sont susceptibles d'en résulter et la façon de les diagnostiquer (Putz-Andersson, 1988; Griffin, 1990; Pelmeur et al., 1992; Gemne et al., 1993; Pujol, 1993; Tyler et al., 1993; Erdil et al., 1994; Hagberg et al., 1995; Bernard, 1997)

En Belgique, des études ont également été menées dans le cadre de programmes de recherche orchestrés par les Communautés Européennes et par l'état belge (Delavignette et al., 1993; Gomes Ferreira, 1993; Malchaire, 1995; Malchaire et Indestege, 1997).

Dans un premier temps, les pathologies musculosquelettiques (MS), vasculaires et neurologiques des membres supérieurs et des mains sont apparues comme étant liées à certaines professions particulières: bûcherons (Färkkilä, 1978), bouchers (Viikari-Juntura, 1983), main d'œuvre féminine comme les emballeuses (Luopajarvi et al., 1979) ou les caissières (Margolis et Kraus, 1987).

A présent, il est reconnu qu'elles peuvent se développer dans de très nombreux secteurs d'activité.

Différents facteurs ont été avancés pour tenter d'expliquer l'augmentation de ces pathologies.

- L'automatisation du processus industriel a redistribué les contraintes de travail en diminuant la charge physiologique globale de travail mais en localisant les efforts au niveau des membres supérieurs et surtout en augmentant la répétitivité des gestes.
- Comme déjà dit précédemment, les programmes de prévention et de surveillance médicale mis en place depuis 30 ans ont fait que certaines pathologies prioritaires ont régressé (silicose, coups de chaleur, intoxication, ...). Ces problèmes occultaient probablement en partie la reconnaissance des pathologies du membre supérieur et cela de manière plus ou moins importante selon les pays et les secteurs industriels concernés.
- Dans les pays industrialisés à tout le moins, les préoccupations des travailleurs ont porté de moins en moins sur le revenu et de plus en plus sur la qualité de vie au travail. Certaines pathologies, qui paraissaient intrinsèquement liées à une profession et qui, dans certains cas, étaient l'apanage de la profession, ne sont plus acceptées.
- De nouvelles techniques de travail (ordinateurs, scanner, ...) sont apparues, avec l'exacerbation de pathologies très anciennes.

Il est plus que probable que les pathologies dont il sera question ne sont ni neuves ni plus graves que par le passé. Le nombre de personnes qui les développent ou qui en prennent conscience serait simplement beaucoup plus grand.

B. Evolution des études sur les problèmes musculosquelettiques des membres supérieurs

L'examen de la littérature scientifique de ces trente dernières années, et en particulier des ouvrages de synthèse mentionnés ci-dessus, montre à toute évidence que deux domaines de recherche bien distincts existent:

- l'un, le plus important, concernant les troubles musculosquelettiques des mains et membres supérieurs liés au travail répétitif sans vibrations,
- l'autre concernant la pathologie chez les travailleurs exposés aux vibrations transmises par la main.

Ces études ont été et sont toujours actuellement menées essentiellement par des auteurs différents qui ont développé séparément et en parallèle des méthodologies (analyse des contraintes, diagnostics et tests cliniques, ...) parfois similaires mais différentes.

L'un des objectifs de la présente revue de la littérature est de faire la synthèse de ces deux catégories d'études.

C. Etudes concernant les pathologies liées à l'exposition aux vibrations

Les premières études relatives aux problèmes du membre supérieur ont concerné l'utilisation de certaines machines vibrantes telles que les tronçonneuses et les machines percutantes. Il s'agit essentiellement d'études dans les pays industrialisés et froids: les pays scandinaves (Färkkilä, 1978; Färkkilä et al., 1980), les U.S.A. (Radwin et Armstrong, 1985), le Canada (Pelmeur et al., 1992), la Grande Bretagne (Griffin, 1990), le Japon (Takamatsu et al., 1982),

Ces études concernaient au départ les problèmes ostéo-articulaires (Malchaire et al., 1986; Gemne et Saraste, 1987), mais surtout les troubles vasculaires: le syndrome de Raynaud d'origine vibratoire.

Ces dernières études ont mis en évidence l'existence d'autres troubles suite à l'exposition aux vibrations (Pyykko, 1986): picotements (Juntunen et al., 1983), diminution de la force de préhension (Färkkilä et al., 1980; Färkkilä et al., 1986), diminution de la sensibilité tactile (Lidström et al., 1982).

L'ensemble de ces pathologies liées à l'exposition aux vibrations mains-bras est repris sous l'appellation générale anglaise de "Hand Arm Vibration Syndrome (HAVS)" et, lors du congrès tenu à Stockholm (1986), des échelles de classification de l'importance de l'atteinte vasculaire (Gemne et al., 1987) et de l'atteinte neurologique (Brammer et al., 1987) ont été définies.

Fin des années 70, une norme internationale (ISO 5349, 1978) a été publiée pour standardiser les mesurages des vibrations des machines vibrantes à main. Elle a été revue en 1986 et comprend un modèle d'estimation du risque de troubles vasculaires. Ce modèle prédit le pourcentage de la population de salariés qui, après "T" années de travail, "d" heures par jour avec une machine vibrante donnant lieu à un niveau de vibration "a_{eq}", développera des troubles vasculaires de stade 1 de l'échelle de Stockholm (Gemne et al., 1987).

La validité de cette relation dose (vibration) – réponse (effet vasculaire) reprise par la norme ISO 5349 a été très fortement critiquée (Nilsson et al., 1989; Bovenzi et al., 1994; Bovenzi et Griffin, 1997). Cette relation dose-réponse en particulier ainsi que celles relatives aux autres pathologies sont difficiles à établir car, d'une part, l'exposition aux vibrations dépend de nombreux paramètres (Griffin, 1997): amplitude et fréquence des vibrations, durée journalière, nombre d'années d'exposition, force de préhension, ... et, d'autre part, d'autres facteurs tels que les contraintes de force ou de posture interviennent également dans le développement de ces pathologies (Gemne et al., 1993 et 1997).

D. Etudes concernant les pathologies non liées à l'exposition aux vibrations

Les études relatives aux pathologies musculosquelettiques non liées aux vibrations sont plus récentes (une vingtaine d'années) et à l'origine ont été menées aux Etats-Unis et dans les pays scandinaves.

Les pathologies du membre supérieur associées aux activités professionnelles sans exposition aux vibrations portent différents noms dans différentes langues:

- Cumulative Trauma Disorders CTD (Putz-Andersson, 1988);
- Repetitive Strain Injuries RSI (Asbury, 1995; Pujol, 1993);
- Lésions attribuables au travail répétitif LATR (Pujol, 1993);
- Pathologie professionnelle d'hypersollicitation (Pujol, 1993);
- Work related musculoskeletal disorders (Hagberg et al., 1995);
- Upper limb disorders (Cooper and Breker, 1996; Buckle, 1997).

Nous utiliserons quant à nous l'appellation troubles musculosquelettiques du membre supérieur (TMSMS) faisant abstraction ainsi de toute étiologie.

Les principaux facteurs tenus responsables de ces troubles musculosquelettiques (TMS) sont la force, la répétitivité, les postures et le manque de repos (Putz-Andersson, 1988). Les études de référence que sont devenues les études de Silverstein (Silverstein et al., 1986 et 1987) ont notamment montré une augmentation du risque de TMS proche de 3 pour les postes de travail requérant une force élevée et proche de 6 pour les postes avec un travail répétitif.

Les TMS dépendent également de facteurs individuels (âge, sexe, maladies systémiques, ...), extra-professionnels (sports, hobbies, jardinage, ...) et psychosociaux (ambiances de travail, monotonie,...) (Putz-Andersson, 1988; Malchaire, 1995; Malchaire et Cock, 1995).

L'association entre les activités professionnelles et la survenue de TMS apparaît à l'heure actuelle évidente en ce qui concerne la nuque, les épaules et les poignets et, dans une moindre mesure, pour les coudes (Hagberg et al., 1995; Bernard, 1997).

E. Etudes conjointes sur les vibrations et mouvements/efforts répétitifs

Comme dit précédemment, les études concernant les deux aspects vibrations et travaux répétitifs sont rares. Cependant, il y a un consensus pour considérer que l'exposition aux vibrations est un facteur supplémentaire et que, de plus, elle est susceptible d'interagir avec d'autres: la force de préhension (Tonic Vibration Reflex, Radwin et al., 1987) et l'allongement du temps de maintien des postures statiques (Gemne, 1997). Silverstein et al. (1987) ont montré que le risque de TMS était doublé chez les travailleurs exposés aux vibrations par rapport à ceux exposés uniquement à des forces et des répétitivités élevées.

Le risque de TMS est de 2 (Silverstein et al., 1987) à 5 (Bovenzi et al., 1991) fois plus important chez les travailleurs exposés aux vibrations en plus de leur exposition à des contraintes de force et de répétitivité élevées.

F. Objectifs de la revue de la littérature

Les principaux objectifs de la suite de cette revue de la littérature sont de décrire:

- les différentes pathologies du membre supérieur liées et non liées aux vibrations,
- les symptômes associés,
- les différents tests (cliniques, fonctionnels, vasculaires ou neurologiques) généralement utilisés pour leur dépistage,
- les prévalences pour situer l'ampleur du problème.

PATHOLOGIES LIEES A L'UTILISATION DES MACHINES VIBRANTES (HAVS)

A. Définition

Le Hand Arm Vibration Syndrome (HAVS) est défini comme étant l'ensemble des perturbations circulatoires (doigt blanc), sensibles et motrices (picotements, lourdeur, diminution de la dextérité, diminution de la force, ...) et musculosquelettiques (crampes, géodes, arthrose, ...) engendrées par l'exposition aux vibrations manubrachiales (Bovenzi, 1990; Pelmeur et Taylor, 1992; Taylor et al., 1993).

L'exposition aux vibrations lors de l'utilisation de machines vibrantes peut donc entraîner différents effets, allant de simples sensations gênantes à des altérations physiologiques, en favorisant l'apparition de certaines pathologies au niveau des membres supérieurs.

Les pathologies sont classées selon leur nature en lésions ostéo-articulaires, lésions vasculaires et lésions neurosensorielles. La gamme de fréquences susceptibles de produire ces altérations au niveau des membres supérieurs est très large: de 5 à 2000 Hz environ:

- pour les fréquences inférieures à 30 Hz, l'ensemble main - bras se comporte comme une simple masse rigide. L'absorption, et par conséquent les effets, se produisent essentiellement au niveau du coude et de l'épaule.
- pour les fréquences moyennes de 30 à 60 Hz, l'absorption se produit essentiellement au niveau du poignet et du coude;
- pour les fréquences élevées de plus de 60 Hz, les vibrations sont absorbées essentiellement au niveau de la main.

En termes généraux, les vibrations de basses fréquences, inférieures à 60 Hz, engendrent des lésions ostéo-articulaires, alors que les vibrations de plus de 60 Hz donnent lieu à des troubles vasculaires et neurosensoriels.

Les affections HAVS sont fonction des caractéristiques des machines comme les amplitudes et les fréquences des vibrations (vitesse de rotation, fréquences de percussion), leurs poids, leurs dimensions, ... (Griffin, 1997).

B. Lésions ostéo-articulaires

Les troubles ostéo-articulaires sont de quatre types: l'arthrose, la maladie de Kienböck, la maladie de Köhler et les géodes.

1. Arthrose

L'arthrose est caractérisée par trois lésions, à savoir l'atteinte du cartilage articulaire, l'atteinte de l'os et la formation d'ostéophytes.

Les lésions d'arthrose liées au travail se développent le plus souvent au niveau de l'articulation du coude. Cette atteinte est fréquente chez les travailleurs maniant des machines vibrantes et en particulier après l'utilisation de machines pneumatiques lourdes (Burke et al., 1977; Gemne et Saraste, 1987; Bovenzi et al., 1987). Les manifestations cliniques sont: gêne ou douleur à la flexion du coude, limitation à la flexion et à l'extension du coude, craquement et accentuation des douleurs lors du mouvement actif du coude. Le diagnostic se fait à partir des signes cliniques et radiographiques. Les signes radiographiques sont la diminution de l'espace articulaire et l'apparition d'ostéophytes marginaux.

Malchaire et al. (1986), dans une étude transversale basée sur des images radiologiques chez 82 travailleurs exposés aux machines vibrantes et 75 travailleurs sans exposition aux vibrations, n'ont pas constaté de cas arthrosiques significativement plus fréquents chez les exposés aux vibrations. Ils ont montré que les prévalences des altérations décelées à la radiographie augmentaient nettement après l'âge de 45 ans.

2. Maladie de Kienböck

La maladie de Kienböck ou nécrose du semi-lunaire est fréquente chez les travailleurs avec un travail lourd et exposition aux machines à percussion (Gaucher et Pere, 1986).

Les symptômes sont des douleurs à la pression sur le carpe, une limitation du mouvement et des douleurs au niveau du poignet, ainsi qu'une diminution de la force de préhension.

3. Maladie de Köhler

La maladie de Köhler ou pseudarthrose du scaphoïde est caractérisée par des micro-fractures du scaphoïde à cause des chocs mécaniques et des microtraumatismes provoqués par les vibrations des machines pneumatiques.

Les symptômes sont des douleurs lors des mouvements de la main et du poignet, ainsi que des limitations à la flexion et à la déviation radiale de la main (Allieu et al., 1992).

4. Géodes

Les géodes sont des kystes osseux apparaissant souvent au niveau du carpe (76%) et du poignet (20%).

Les géodes d'origine vibratoire se distinguent des autres en ce qu'elles sont plus grandes et plus fréquentes dans la main gauche (Kumlin et al., 1973).

Les études mettent cependant en question la vibration comme unique cause de l'apparition de ces kystes (Gemme et Saraste, 1987).

C. Lésions vasculaires

La composante vasculaire du HAVS a été la plus étudiée: elle a été désignée par l'appellation du syndrome du doigt blanc (vibration induced white finger VWF) au début des années 70 (Taylor et al., 1993).

Le phénomène du doigt blanc représente la pathologie la plus connue associée aux vibrations. Le mécanisme physiopathologique est la stimulation des mécanorécepteurs de la main et des axes ostéo-articulaires des membres supérieurs, après exposition aux vibrations dans une gamme de fréquences allant de 40 à 200 Hz. Un arc réflexe est ébranlé dont la voie est l'hypothalamus et les centres vasomoteurs bulbaires (Pyykkö et Hyvärinen, 1973; Gemme, 1982; Futatsuka et al., 1983). Il en résulte notamment un vasospasme localisé, surtout à l'extrémité des doigts. La température de la pulpe est ainsi diminuée de 3 à 4°C. L'installation de cette vasoconstriction entraîne une anoxie locale. Cette dernière, favorisant l'action directe des vibrations sur les parois vasculaires, aboutit à des lésions qui atteignent les artères, les artérioles, les capillaires et les shunts artério-veineux (Futatsuka et al., 1983). Après une durée d'exposition aux vibrations variable en mois ou en années et selon l'intensité des vibrations (Brammer, 1984), un déficit vasculaire s'installe, s'accompagnant parfois de nécroses. Le tableau clinique est finalement celui d'un syndrome de Raynaud.

L'attaque évolue en 3 phases successives: des picotements, l'ischémie et la pâleur cutanée. Le doigt est blanc, froid, puis, quand la crise se termine, apparaissent cyanose et douleur.

Les lésions atteignent surtout l'auriculaire, l'annulaire et le majeur. Les manifestations cliniques prédominent souvent du côté qui supporte le poids de la machine.

Si la responsabilité des vibrations ne fait aucun doute, il existe bien entendu un certain nombre de facteurs favorisants:

- le froid est un élément nécessaire à l'apparition du phénomène et est surtout un facteur déclenchant (Gemme, 1982; Brezinova et Quinton, 1991; Wieslander et al., 1996);
- le tabac (Taylor et al., 1971; Ekenvall et Lindblad, 1989);
- les perturbations hormonales (Harada et al., 1990);
- la prise de médicaments comme: l'ergotamine, les antihypertensifs ... (Marshall et al., 1976);
- le poids des machines;
- les postures contraignantes;
- le bruit (Miyakita et al., 1987; Pyykkö et al., 1989);
- les traumatismes locaux (Lasfargues, 1992);
- l'exposition aux toxiques comme le chlorure de vinyle (Carpentier et al., 1984).

Le diagnostic du syndrome se fait par l'interrogatoire en précisant la topographie et l'évolution des signes cutanés, l'anamnèse professionnelle qui permet de confirmer l'utilisation des machines vibrantes et des tests spécifiques comme la capillaroscopie dynamique ou la mesure de la pression systolique de l'artère digitale avec exposition au froid. Il faut cependant remarquer que ces tests sont très laborieux et coûteux et ne peuvent donc être réalisés que pour confirmer le diagnostic. Les tests de provocation sont bien-sûr exclus, les

tests de réchauffement sont longs et douloureux et, de plus, leur sensibilité et spécificité restent faibles (Malchaire, 1995).

La littérature sur ces tests est abondante (Bovenzi, 1987; Gautherie et al., 1992; Pelmeur et al., 1992; Bovenzi et al., 1995), notamment en ce qui concerne leur méthodologie et leur sensibilité-spécificité. Le présent travail s'intéressant principalement aux troubles neurologiques, ces points ne seront pas explicités plus en détail.

En conclusion, le dépistage en milieu professionnel reste basé sur la symptomatologie, les signes cliniques, l'anamnèse médicale et professionnelle, le contrôle périodique de la température cutanée des mains et doigts, le test d'Allen et le nail press test. L'atteinte vasculaire est mesurée au moyen de l'échelle de Stockholm (1986) (Gemme et al., 1987) donnée au tableau 1.1.

TABLEAU 1.1 - Classification de Stockholm - Composante vasculaire (d'après le Symposium de Stockholm, 1986)

Stade	Degré	Description de la crise
0	-	Pas d'attaque
1	Léger	Attaques occasionnelles affectant seulement l'extrémité d'un ou plusieurs doigts
2	Moyen	Attaques occasionnelles affectant les phalanges et les phalangettes d'un ou plusieurs doigts
3	Sévère	Attaques fréquentes affectant toutes les phalanges de la plupart des doigts.
4	Très sévère	Comme au stade 3 avec des modifications trophiques de la peau à l'extrémité des doigts

D. Lésions neurologiques

Les troubles neurologiques liés à l'utilisation des machines vibrantes peuvent apparaître au niveau des récepteurs sensoriels et au niveau des nerfs périphériques. Ces troubles se développent en deux phases: une phase réversible avec des troubles à court terme et une phase irréversible avec des troubles permanents (Brammer et Pyykkö, 1987).

1. Phase réversible: troubles neurologiques à court terme

Le premier symptôme neurosensoriel après l'exposition aux vibrations est l'apparition de picotements (Griffin, 1980; Takamatsu et al., 1982; Brammer, 1984; Pyykkö, 1986). Plus tard, en fonction de l'intensité, de la fréquence et de la durée de l'exposition, on peut observer une diminution temporaire de la sensibilité tactile aux vibrations et des symptômes comme: lourdeur, douleur, diminution de la force musculaire de préhension, diminution de la dextérité manuelle, diminution de la sensibilité thermique et altération de la coordination oculo-manuelle (Martin et al., 1991).

Ces troubles réversibles s'expliquent par une diminution temporaire de l'excitabilité des récepteurs sensoriels (Lundström, 1986) et par l'apparition d'œdèmes sur les fibres nerveuses, œdèmes qui disparaissent à court terme (Brammer et Pyykkö, 1987).

2. Phase irréversible: troubles neurologiques à long terme

A plus long terme, l'exposition aux vibrations entraîne des dommages irréversibles des nerfs périphériques et des récepteurs sensoriels.

Au niveau des fibres nerveuses périphériques, grâce à des expérimentations animales, certains auteurs (Lundborg et al., 1987; Takeuchi et al., 1988; Bovenzi, 1990) ont observé l'apparition d'un œdème périneural et d'une démyélinisation de certaines fibres nerveuses après l'exposition aux vibrations. Kwang-Yuang et al. (1994), après dissection des nerfs périphériques chez les rats, ont observé des altérations significatives au

niveau de l'axone comme le détachement de la myéline de l'axone, la constriction de l'axone et des changements dans les régions paranodales de la gaine de myéline. Ces modifications évoluaient en relation directe avec l'intensité et la durée de l'exposition aux vibrations.

Au niveau des récepteurs sensoriels, des dommages et une disparition partielle des fibres nerveuses terminales sont constatés (Brammer et Pyykkö, 1987; Lundborg, 1990).

Certaines études semblent montrer que les troubles vasculaires se développent en parallèle avec les troubles neurologiques, tandis que d'autres études indiquent le contraire (Bovenzi, 1990; Brezinova et Quinton, 1991). Cette controverse peut probablement s'expliquer par le fait que les premières études s'intéressaient aux troubles vasculaires, ce qui influait partiellement sur les méthodologies utilisées et sur la sélection des travailleurs (notamment dans les études cas-témoins). Les études plus récentes ne montrent pas de corrélation positive entre les anomalies vasculaires et neurologiques (Färkkilä et al., 1988; Brezinova et Quinton, 1991; Mirbod et al., 1997).

3. Classification des troubles neurologiques

L'échelle de Stockholm (tableau 1.2) proposée par Brammer et al. (1987) codifie la détérioration progressive des récepteurs sensoriels, après l'exposition aux vibrations. Cette classification est importante pour le dépistage des altérations neurosensorielles en milieu professionnel.

TABLEAU 1.2 - Classification des effets neurosensoriels selon l'échelle de Stockholm (Sn - sensorineural stage)

STADES	SYMPTOMES
0 SN	Exposé aux vibrations mais pas de symptômes
1 SN	Engourdissements intermittents avec ou sans symptômes de picotements
2 SN	Engourdissements intermittents ou persistants et perception sensorielle réduite
3 SN	Engourdissements intermittents ou persistants et discrimination tactile et/ou dextérité manuelle réduite

Les auteurs ont émis l'hypothèse que le stade 2 peut être confirmé grâce à des tests sensitifs subjectifs tels que la sensibilité tactile (toucher fin), à la douleur, aux températures et aux vibrations. Pour confirmer le stade 3, il faudrait effectuer des tests additionnels tels que l'esthésiométrie (discrimination entre 2 pointes), la dextérité manuelle et des mesures de vitesse de conduction nerveuse (Pelmeur et al., 1992).

E. Examen clinique des HAVS

Le but de l'examen clinique en milieu professionnel est de détecter de façon précoce la survenue de troubles HAVS. Pelmeur et al. (1992) ont proposé l'approche suivante en trois points:

- anamnèse concernant les caractéristiques du travailleur (tabagie, état des doigts et des mains, ...) et l'exposition aux vibrations (type de machines, nombre d'heures par jour d'exposition, nombre d'années, ...),
- classification des symptômes évoqués selon le degré de l'atteinte (échelle de Stockholm vasculaire et neurologique),
- la réalisation de tests vasculaires et neurologiques simples (nail press test, tests d'Allen, de Phalen, de Tinel, ...).

Sur cette base, l'examen clinique aboutit à classer le travailleur en non atteint ou en atteint probable, l'atteinte devant être confirmée par des tests cliniques spécialisés.

F. Tests neurologiques

Le but ici n'est pas de décrire la méthodologie des tests neurologiques, mais plutôt de discuter la pertinence et les limites de ceux-ci dans le cadre du dépistage précoce de troubles neurologiques chez des personnes que ces troubles éventuels n'empêchent pas d'exercer leur activité professionnelle.

1. La conduction nerveuse (NCV, TLM, TLS)

Le mesurage de la conduction nerveuse au niveau des nerfs périphériques réalisé en milieu clinique est souvent considéré comme le test de référence auxquels sont comparés les autres tests (Pelmeur et al., 1992). L'appareillage complexe et sophistiqué permet de déterminer avec précision l'amplitude, le temps de latence et la vitesse de conduction nerveuse (NCV) aussi bien pour la fonction sensitive que motrice.

L'interprétation du test doit se faire en tenant compte de l'âge du sujet, tandis que le sexe de celui-ci ne semble pas influencer les résultats (Nathan et al., 1992).

De manière à pouvoir réaliser ce test en milieu professionnel, des appareils portables ont été développés pour mesurer le temps de latence moteur (TLM) et/ou sensitif (TLS). La corrélation entre les valeurs obtenues par ces appareils portables et celles mesurées en milieu clinique est excellente (R supérieur à 0,9) (Osterman et al., 1989; Steinberg et al., 1992; Rosecrance et al., 1993; Durnil et al., 1993). De plus, leur reproductibilité inter et intra examinateur est tout aussi bonne (Cook et al., 1991; Durnil et al., 1993).

Le mesurage de la conduction nerveuse a été et est toujours beaucoup employé pour diagnostiquer des syndromes du canal carpien (voir description ci-après des pathologies TMS). Werner et Albers (1995) ont montré que sur 480 cas de canal carpien diagnostiqués par EMG en milieu clinique (avec des électrodes à aiguilles), la sensibilité du TLM ou du TLS était de l'ordre de 65% et la spécificité de 60%. Sur un échantillon plus petit (28 patients), Steinberg et al. (1992) ont quant à eux trouvé une sensibilité du même ordre (70%), mais une spécificité de 100% du TLM. Osterman et al. (1989) citent Chrisanne et al. (1987) et Liebhurer (1986) pour lesquels 20% de sujets avec un canal carpien peuvent avoir un TLM normal.

En ce qui concerne l'exposition aux HAV, de nombreuses études (Brammer et Pyykkö, 1987 se basant sur 25 articles; Murata et al., 1990 et 1991; Nilsson et al., 1994) ont montré un ralentissement de la conduction nerveuse aussi bien sensitive que motrice.

Nilsson et al. (1994) proposent pour la détection précoce en milieu professionnel de considérer des critères d'atteintes moins sévères qu'en milieu clinique (TLM supérieur à 3,7 m/s au lieu de 4,2 m/s et NCV inférieure à 50 m/s au lieu de 39 m/s). Cependant, il est important dans le cas des HAVS de pouvoir distinguer l'atteinte des fibres nerveuses périphériques de la compression du nerf médian au niveau du canal carpien. Les mesurages de la conduction nerveuse entre les doigts et la paume de la main, entre la paume et le poignet, de même qu'entre le nerf médian et le nerf cubital, sont nécessaires pour poser un diagnostic différentiel (Blecker et Agnew, 1987; Brammer et Pyykkö, 1987; Sakakibara et al., 1994).

En conclusion, le mesurage de la vitesse de conduction nerveuse et/ou des temps de latence (NCV, TLS, TLM) présente une spécificité faible dans le cas des HAVS mais permet de distinguer les neuropathies périphériques d'origine vibratoire d'un syndrome du canal carpien ou de polyneuropathies générales (alcool, diabète, ...) (Bovenzi, 1990). Il est le prédicteur le plus fiable du syndrome du canal carpien (Nathan, 1997).

Pour le dépistage précoce, le mesurage de la conduction sensitive est préférable puisque les troubles neurologiques sensitifs surviennent généralement avant les troubles moteurs (Callahan, 1990).

2. Le seuil de perception aux vibrations (SPV)

Le mesurage du seuil de perception aux vibrations est un test de dépistage précoce de certaines altérations sensitives périphériques. Le test SPV consiste à exciter l'extrémité du doigt (pulpe) au moyen d'une tige soumise à une vibration sinusoïdale (fréquence de test) d'amplitude variable et à relever le seuil à partir duquel le sujet perçoit la vibration tout comme pour un test audiométrique en acoustique.

A son origine dans les années 70 (McQuillan, 1970; Dellon, 1981), ce test consistait à exciter les mécanorécepteurs de la peau au moyen d'un diapason. Depuis, vu l'intérêt du SPV aussi bien dans le diagnostic des TMS (syndrome du canal carpien) que des troubles neurologiques liés aux vibrations, la méthodologie et l'appareillage n'ont cessé d'évoluer, souvent séparément, dans les différents pays industrialisés et dans les différents laboratoires de ces mêmes pays (Beaumont et al., 1992; Lundström et al., 1992; Maeda et Griffin, 1993; Malchaire, 1995; Kamon, 1994; Sakakibara et al., 1996; Ricci, 1997).

Toutes ces études et la multiplication d'appareillages différents employés dans celles-ci ont conduit en 1995 à la standardisation du test SPV des doigts pour l'évaluation de la fonction nerveuse sensorielle (norme

ISO/CD 13091, 1995). Cette norme spécifie notamment les différents facteurs dont dépendent les résultats du test: les unités (ms^{-2} ou dB), les doigts à étudier (majeur, index, ...), la pression à exercer par le doigt sur l'excitateur, les fréquences de test, ... Des valeurs de référence de SPV pour une population normale seront également proposées dans la version finale de la norme.

La fréquence vibratoire générée lors du test est un élément fondamental car elle détermine les mécanorécepteurs et le type de fibres nerveuses qui seront excités. De nombreuses études sur les mécanorécepteurs de la main menées notamment par Johanson et Vallbo (1980a, 1980b, 1983, 1984, 1995) ont permis de répertorier et de classer les mécanorécepteurs de la main (tableau 1.3), ainsi que les fibres nerveuses périphériques (Guyton, 1984) qui, pour les mécanorécepteurs, sont de type A_α et A_β (grand diamètre (5 à 20 μm), fibres myélinisées et donc rapides (30 à 120 m/s)).

TABLEAU 1.3 – Principales caractéristiques des mécanorécepteurs de la main et principalement sur le bout des doigts

	Profondeur dans la peau:	
	de surface et principalement sur le bout des doigts (champ récepteur petit et bords nets) I	de profondeur et sur toute la main (champ récepteur plus grand et bords flous) II
à réponse dynamique (rapide) Fast Adapting FA	FAI: Meissner sensibilité tactile fine, texture des objets bande passante: inférieure à 40 Hz	FAII: Pacini mouvements rapides (vibrations), pression profonde bande passante: entre 40 et 500 Hz
à réponse statique (lente) Slow Adapting SA	SAI: Merkel détection continue du contact, discrimination précise de la forme et de la texture, objet fin, pression légère bande passante: 2 à 30 Hz	SAII: Ruffini détection des déformations prolongées et profondes de la peau et des tissus, contact ou pression continue bande passante: < 8 Hz

Afin de mettre en évidence une détérioration des mécanorécepteurs excités par les vibrations, il est indispensable de réaliser le test du SPV au minimum à deux fréquences (annexe B de la norme ISO/CD 13091, 1995): 125 Hz (Pacini) et 31 Hz (Meissner). Par contre, pour mettre en évidence un syndrome du canal carpien (compression nerveuse), une seule fréquence (120 Hz) est souvent utilisée (White et al., 1994; Gerr et al., 1995). Le test à cette seule fréquence permettrait d'obtenir des spécificités de 70 à 80% et des sensibilités de l'ordre de 60% (après flexion du poignet).

Lundborg et al. (1986) ont observé des modifications du SPV avant ou en même temps que des modifications des tests neurophysiologiques mais bien avant des altérations des tests esthésiométriques et recommandent d'évaluer le SPV à différentes fréquences pour la détection précoce de neuropathies par compression.

La validité du SPV en terme de reproductibilité (test-retest) est excellente même en milieu professionnel (Rosecrance et al., 1994). Grunert et al. (1990) recommandent toutefois un test de familiarisation au préalable.

De toutes les études citées ci-dessus, il ne fait aucun doute que le SPV dépend de l'âge du sujet (diminution de la densité des corpuscules de Meissner et de Pacini (Kershalo, 1986)). Peu ou pas de différences ont été notées entre les hommes et les femmes (Ricci, 1997) et la température de la peau a peu d'effet sur le SPV si elle est supérieure à 26°C (ISO/CD 13091, 1995). Ce test est également utilisé pour l'étude des neuropathies induites par l'exposition à des produits toxiques (Lundström et al., 1992; Deng et al., 1993) ou liées à certaines maladies (sclérodémie (Schedy et al., 1991)).

En résumé, le test de perception aux vibrations est un des tests les plus employés pour le diagnostic précoce de troubles neurosensoriels suite à l'altération des mécanorécepteurs (fibres nerveuses fines les premières atteintes) par l'exposition aux HAV (Ekenvall et al., 1989), ou des nerfs périphériques par compression

nerveuse (avec ou sans exposition aux HAV). En raison des variations individuelles associées à ce test, l'utilisation seule de celui-ci ne permet pas d'obtenir un diagnostic fiable sauf peut-être en cas d'atteinte sévère (Ekenvall et al., 1989), mais permet de montrer des différences entre des groupes de travailleurs (Bovenzi, 1990).

Dans certaines études (Ekenvall et al., 1989; Virokannas, 1995), des relations de type dose-réponse ont été observées entre le SPV et l'exposition aux vibrations.

Virokannas (1995) a montré une élévation significative (R de 0,6 à 0,8) du SPV à toutes les fréquences de mesures (16 à 500 Hz) avec la durée d'utilisation (nombre d'années multiplié par nombre d'heures par année) d'une part de tronçonneuses et d'autre part de machines utilisées pour damer les voies de chemin de fer. Ces dernières présentent une accélération pondérée (10 à 14 ms⁻²) nettement supérieure à celle des tronçonneuses (2 à 4 ms⁻²) qui explique que l'élévation du SPV avec la durée d'utilisation est pratiquement deux fois plus rapide chez les travailleurs des chemins de fer. Par exemple, une augmentation du SPV à 250 Hz de 20 dB est constatée après une utilisation de 20.000 heures des tronçonneuses pour seulement 10.000 heures des machines à damer.

Ekenvall et al. (1989) ont tenu compte dans leur calcul de dose d'exposition de l'amplitude des vibrations par un indice distinguant trois catégories (< 3ms⁻², 3 à 10 ms⁻² et > 10 ms⁻²), mais ont également pondéré la durée d'exposition. Ces scores de dose d'exposition obtenus sont en moyenne plus élevés chez les patients dont le degré d'atteinte neurologique ou vasculaire est important, patients qui présentent également un SPV plus grand. Une relation dose-réponse entre l'exposition aux vibrations et le SPV est donc suggéré par ces auteurs.

3. Le seuil de perception à la température (SPT)

Le mesurage du seuil de perception à la température est similaire à celui du SPV, l'extrémité du doigt étant soumise à une variation de température d'une pièce métallique plutôt qu'à une vibration mécanique. Trois paramètres sont généralement mesurés lors du test: le seuil de température à partir duquel le sujet perçoit une sensation de chaud, le seuil de perception au froid et la zone neutre, c.à.d. la différence entre les deux seuils déterminés.

Tout comme pour le SPV, le test du SPT a été développé à la fin des années 70 de manière assez séparée dans de nombreux laboratoires recourant à des méthodes souvent différentes (Fruhstorfer et al., 1976; Hirokawa et al., 1983 et 1992; Kenshalo, 1986; Ekenvall et al., 1986 et 1989; Claus et al., 1987; Schady et al., 1991; Lindsell et Griffin, 1997).

Les uns utilisèrent une barre de cuivre refroidie à un bout et chauffée à l'autre, présentant ainsi un gradient de température permettant de mesurer de manière discrète le SPT. Les autres ont utilisé une surface métallique dont la température est réglée électriquement (effet Joule et effet Peltier), ce qui permet de déterminer le SPT de manière continue.

Les paramètres principaux liés au test qui influencent les résultats sont le type d'algorithme psychophysique de recueil du seuil, la température de référence au départ du test, la vitesse d'élévation ou de diminution de la température, la température cutanée et la localisation précise de la source thermique sur l'extrémité du doigt (Lindsell et Griffin, 1997).

En ce qui concerne le sujet, l'âge semble avoir peu d'effet sur les seuils recueillis, tandis que la tabagie a un effet uniquement à long terme (Lindsell et Griffin, 1997).

Ce test a surtout été utilisé pour la quantification des polyneuropathies liées à la consommation d'alcool (Hilz et al., 1995) ou à certaines maladies (sclérodémie (Schady et al., 1991)). Il a été utilisé par certains auteurs en milieu professionnel pour des sujets exposés aux HAV. Les résultats principaux rapportés dans la littérature sont les suivants: suite à une exposition de courte durée (heures) aux vibrations de sujets sains, le seuil au chaud augmente mais pas celui au froid (Hirokawa et al., 1992), la zone neutre augmentant fort logiquement. Par contre, en cas d'atteinte sévère (stade 3N, échelle de Stockholm) liée à une exposition de longue durée (années) aux vibrations, le seuil au froid est également modifié (diminution) (Hirokawa et al., 1983) et s'avère discriminant entre des groupes cas-contrôle (Ekenvall et al., 1986).

La constitution des fibres nerveuses des thermorécepteurs est différente: les fibres des récepteurs au froid sont de type A_δ (myélinisées, 6 à 30 m/s, et de taille de l'ordre de 5 μm) et C (non myélinisées, donc plus lentes, 1 m/s, et plus petites < 2μm), tandis que les fibres des récepteurs au chaud sont essentiellement de type C (Guyton, 1984). Ces fibres plus petites sont par conséquent plus rapidement perturbées par les vibrations.

De plus, la densité de récepteurs au froid est plus grande (jusqu'à 10 fois) que celle des récepteurs au chaud (Duclaux, 1977).

L'intérêt majeur du test SPT en neurologie est qu'il permet de mettre en évidence une altération des petites fibres (myélinisées A_{δ} et non myélinisées C). Il est donc complémentaire au test SPV (Dyck et al., 1993) et au mesurage des potentiels d'action nerveux sensoriels (Verdugo et Ochoa, 1992) qui tous deux montrent des altérations des fibres larges.

4. Le seuil de perception à la pression (SPP)

Le seuil de perception à la pression évalue le toucher fin à l'aide de filaments (filaments de Semmes Weinstein) de différents diamètres et donc de raideurs différentes. Ces filaments ont été classés en 4 classes d'atteinte: toucher normal, diminution de la perception du toucher léger, diminution de la sensation de protection et perte de cette sensation (Bell-Krotoski, 1990b).

Ce test, reproductible, stimule à la fois les mécanorécepteurs superficiels de la peau à adaptation rapide (FAI) et lente (SAI) (Bell-Krotoski, 1990a) qui, par leur champ récepteur, sont très discriminants et permettent de localiser exactement les stimulations tactiles.

Une diminution du toucher léger mise en évidence par ce test suggère soit une diminution de l'excitabilité des unités tactiles FAI et SAI suite à une exposition à long terme aux vibrations (Lundström et Johansson, 1986), soit une atteinte des fibres nerveuses larges (A_{β}) par compression nerveuse notamment au niveau du canal carpien (Gelberman et al., 1983; Koris et al., 1990). Ces auteurs ont par ailleurs montré une augmentation de la sensibilité à détecter des patients atteints de compression nerveuse en combinant le test SPP avec le test de Phalen (hyperflexion du poignet). L'hyperflexion du poignet entraîne une ischémie à laquelle les fibres plus larges (A_{β}) sont plus sensibles que les plus petites (A_{δ} et C).

5. Les esthésiomètres

De nombreux esthésiomètres ont été développés pour évaluer la discrimination tactile de deux pointes, d'une rainure, de deux bords, ... L'esthésiomètre à deux pointes est le plus fréquemment employé. Dans le cas de l'évaluation du HAVS, Haines et Chong (1987) ont revu la littérature relative à ces esthésiomètres et ont observé une sensibilité et une spécificité entre 90 et 95% pour certains d'entre eux. Cependant, lors de la comparaison entre un groupe de mineurs exposés et un autre non exposés aux vibrations, ces auteurs n'ont pas mis en évidence des différences de seuils esthésiométriques (esthésiomètre à deux pointes et de profondeur). L'esthésiomètre permet donc de mettre en évidence une altération sensitive qu'à un stade d'atteinte sévère, le seuil esthésiométrique se modifiant plus tard que les tests SPV et SPP (Callahan, 1990; Gelberman et al., 1983; Szabo et al., 1984).

6. La force maximale volontaire (FMV)

A l'aide d'un dynamomètre tenu en main, le sujet exerce une force maximale volontaire. La posture du bras (avant-bras fléchi à 90 degrés, sans appui), le modèle de dynamomètre (JAMAR), la façon de le prendre en main (Mathiowetz dans Admundsen, 1990; Desrosiers et al., 1995), le réglage de la largeur de la poignée (position II du JAMAR (Janda et al., 1987), la durée du test (Dalahan et Fernandez, 1993), ainsi que le temps de repos (2 minutes) entre deux tests consécutifs influencent considérablement les valeurs de FMV obtenues. L'influence des caractéristiques individuelles (âge, sexe, main dominante, ...) a été tout particulièrement étudiée par Mathiowetz (dans Admundsen, 1990) qui donne des tables de référence pour une population normale.

Les études menées par Färkkilä et al. (1978, 1980, 1986) sur un groupe de travailleurs forestiers exposés aux vibrations ont montré, après deux années supplémentaires d'exposition, une diminution de 20% de la FMV chez les sujets atteints de troubles vasculaires par rapport aux sujets non atteints. Cette diminution résulterait de l'atteinte neurologique (Aatola et al., 1990), plutôt que de l'atteinte vasculaire. La relation entre l'exposition aux vibrations et cette diminution de la FMV n'est cependant pas clairement établie. Radwin et al. (1987) ont montré par des études en laboratoire que la force de préhension de la poignée augmente de 10 à 30% selon la fréquence et l'amplitude de la vibration générée. Ils ont également observé, suite à l'exposition aux HAV, une contraction involontaire des muscles (tonic vibration reflex) qui augmente par conséquent la contrainte musculaire.

Dans le cas de troubles neurologiques suite à une compression nerveuse, l'atteinte motrice (FMV) ne survient que bien plus tard après l'atteinte sensitive (Gelberman et al., 1983; Callahan, 1990; Pranski et al. 1997).

7. Le test de dextérité du Purdue Pegboard (PPg)

Le test du Purdue Pegboard est un test de dextérité manuelle consistant à placer des petites tiges dans des trous et à réaliser des assemblages avec tiges, cylindres et rondelles en un temps déterminé. Plusieurs protocoles de test sont possibles (une main ou deux mains, tiges seules ou assemblages (Desrosiers et al., 1994)). Ce test, employé au début pour l'analyse de l'habileté psychomotrice des sujets (Fleishman, 1954; Fleishman et Ellison, 1962), est influencé par l'âge mais surtout par le sexe, les femmes ayant une meilleure dextérité (Yendall, 1986).

En 1972, Banister et Smith (1972) ont montré avec ce test une diminution de la dextérité manuelle chez des travailleurs exposés aux HAV. Cette diminution surviendrait après une exposition à long terme aux vibrations, Hammarskjold et al. (1991) n'ayant montré aucune réduction de performance dans la réalisation de tâches fines après une exposition de courte durée. Cette diminution de la dextérité, généralement peu étudiée, pourrait engendrer des problèmes notamment liés à la sécurité lors de l'exécution de tâches avec des machines vibrantes.

8. Synthèse des tests neurologiques

Dans le cas de l'exposition aux vibrations, l'utilisation de différents tests sensitifs permet de mettre en évidence des altérations de différents récepteurs et fibres nerveuses périphériques (SPV et SPP pour les fibres A_{α} et A_{β} , SPT au froid pour les A_{δ} et SPT au chaud pour les C) (Lawson et Nevell, 1997).

Lors d'une atteinte neurologique et notamment d'une compression nerveuse, les premiers symptômes sont des picotements et des engourdissements. Au fur et à mesure que l'atteinte progresse, certains tests deviennent "anormaux": en premier lieu la sensibilité aux vibrations (SPV), puis la sensibilité à la pression (SPP) bien avant les modifications des seuils esthésiométriques ou de la force motrice (FMV) (Gelberman et al., 1983; Szabo et al., 1984).

Pour évaluer les pathologies liées à l'exposition aux vibrations et notamment les troubles neurologiques, une batterie de plusieurs tests est nécessaire pour établir un diagnostic complet et fiable. Harada (1987) a notamment montré qu'une sensibilité de 85% et une spécificité de 95% pouvaient être obtenues en combinant 4 tests différents (anormalité observée à chacun des tests). La sensibilité et la spécificité d'un test peuvent également être augmentées en réalisant ce test après provocation par exemple par immersion dans de l'eau froide (Harada, 1987) ou par compression du nerf médian (Szabo et al., 1984).

L'utilisation d'un test seul n'est donc pertinente que pour la comparaison de groupes de travailleurs mais pas sur le plan individuel (Wenemark et al., 1996).

McGeoch et al.(1994) ont proposé un modèle logistique de prédiction d'une atteinte neurologique sévère (classe 2 ou 3 de l'échelle de Stockholm) à partir de 3 tests (esthésiométrie, SPT (zone neutre) et force de préhension). Lawson et Nevell (1997) ont amélioré ce modèle en utilisant en plus le test SPV (test le plus significatif) pour classer les patients dans les 4 classes de l'échelle de Stockholm.

PATHOLOGIES MUSCULOSQUELETTIQUES DU MEMBRE SUPERIEUR (TMS)

A. Définition

La définition la plus couramment utilisée pour les TMS du membre supérieur est celle de Putz-Andersson (1988): les TMS sont l'ensemble des troubles qui résultent de l'accumulation de microtraumatismes, c'est-à-dire de blessures provoquées par des contraintes mécaniques (terme anglais: cumulative trauma disorders, CTD) et touchant une ou plusieurs parties du membre supérieur (mains, poignets, coudes et épaules) ou la nuque.

Description et examen clinique des pathologies MS les plus fréquentes au niveau du membre supérieur et de la nuque

La nature, les symptômes et les tests cliniques des différentes pathologies TMS du membre supérieur et de la nuque ont été décrits par Cock et Masset (1994) sur base d'une synthèse de la littérature. Le texte ci-dessous ne reprend que l'essentiel de cet article à savoir une brève description de la pathologie, des symptômes et l'énumération des tests cliniques recommandés.

1. La nuque

a. La cervicarthrose

La cervicarthrose est une dégénérescence chronique, non inflammatoire, localisée aux articulations de la colonne cervicale. Elle est cliniquement caractérisée par une douleur localisée dans la nuque, irradiant vers les bras.

Le test de mobilité active assistée dans les trois axes de mouvements s'avère douloureux et montre une limitation de la mobilité.

b. Syndrome tensionnel de la nuque (Tension neck syndrome)

Le "tension neck syndrome" regroupe un ensemble de symptômes douloureux non articulaires, perçus dans la région de la nuque. C'est une myalgie cervicobrachiale atteignant le plus souvent le trapèze supérieur et l'angulaire de l'omoplate.

Le symptôme le plus courant est une douleur ressentie, au repos, dans la région de la nuque et s'étendant de l'occiput à l'épaule. Cette douleur peut irradier et être à l'origine de maux de tête.

A la palpation, l'examineur détecte au moins deux points indurés ou douloureux pour le sujet, au niveau des muscles de la nuque; les mêmes muscles semblent contracturés ou tendus lors de la palpation.

c. Syndrome du défilé thoraco-brachial (Thoracic outlet syndrome)

Il s'agit d'une compression ou d'un étirement vasculo-nerveux au sein du défilé thoracique, situé entre le cou et l'épaule.

Les premiers symptômes, sensitifs, se manifestent par des douleurs irradiant vers le membre supérieur, accompagnées de picotements ou d'engourdissements souvent localisés au bord cubital de l'avant-bras et de la main.

Le test de Morley et l'épreuve d'Adson sont recommandés pour le diagnostic.

2. Les épaules

a. Tendinite de la coiffe des rotateurs

La coiffe des rotateurs est formée de quatre muscles dont le sus-épineux. Celui-ci s'insère sur la partie supérieure de la tête humérale, directement sous l'acromion.

Le symptôme principal est la douleur localisée à la partie antéro-externe de l'épaule. Le sujet se plaint de cette douleur lors de la palpation et lors de l'exécution d'un effort en abduction latérale de l'épaule

L'épreuve de la chute du bras et le signe de Neer sont les tests cliniques conseillés.

b. Ténosynovite du long chef du biceps brachial

Le long chef du biceps est le tendon qui permet l'insertion supérieure du biceps brachial, au niveau du tubercule sus-glénoïdien de la cavité articulaire de l'omoplate. Il est fréquemment le siège d'une ténosynovite et, à un stade plus avancé, d'une désinsertion.

Le symptôme le plus commun est une douleur localisée à la face antérieure de l'épaule

L'étirement du tendon réveillant la douleur et le signe de Yergason positif sont associés à cette pathologie.

c. L'épaule gelée (Frozen shoulder)

L'articulation gléno-humérale est entourée d'une capsule en forme de manchon de structure fibreuse qui s'insère sur le pourtour de la cavité glénoïde de l'omoplate. L'épaule gelée est une algoneurodystrophie réflexe localisée à l'épaule entraînant un épaissement et une rétraction de cette capsule articulaire.

C'est pendant la phase d'installation que l'on a encore la possibilité de rencontrer les personnes au travail.

A ce stade, le symptôme prédominant est la douleur dans la région de l'épaule, douleur exacerbée par le mouvement.

A l'examen, on observe une limitation dans la mobilité active et passive de l'épaule surtout en élévation, en rotation externe et en abduction.

d. Syndrome de l'articulation acromio-claviculaire

Le syndrome de l'articulation acromio-claviculaire est une dégénérescence non inflammatoire ou "arthrose" de cette articulation.

Le sujet se plaint d'une douleur localisée à l'articulation. Cette douleur est exacerbée par la pression lors de la palpation ainsi que par les mouvements de l'épaule qui sollicitent l'articulation (notamment lors de l'antépulsion maximale, l'abduction horizontale et la rotation interne forcées). La percussion de la clavicule est douloureuse.

3. Les coudes

a. L'épicondylite (Tennis elbow)

Il s'agit d'une inflammation des tendons reliant les muscles extenseurs des doigts et du poignet à l'épicondyle de l'humérus.

Les symptômes décrits par le sujet sont tout d'abord une douleur, localisée à l'épicondyle, mais pouvant irradier vers l'avant-bras, qui se manifeste au repos et/ou au mouvement.

La palpation de l'épicondyle ainsi que les mouvements d'extension du poignet et des doigts et la supination de l'avant-bras réveillent cette douleur

b. L'épitrôchléite (Golfer's elbow)

Il s'agit d'une inflammation des tendons reliant les muscles fléchisseurs des doigts et du poignet à l'épitrôchlée de l'humérus.

Les symptômes douloureux sont les mêmes que ceux décrits pour l'épicondylite. Les différences concernent leur localisation, au niveau de l'épitrôchlée, et les mouvements provoquant cette douleur, c'est-à-dire la flexion des doigts et du poignet.

4. Les poignets

a. Les ténosynovites

Les ténosynovites sont des inflammations de gaines tendineuses. Au niveau du poignet elles concernent les tendons musculaires croisant la face dorsale et palmaire de cette articulation.

Au niveau de la face palmaire, les ténosynovites les plus communes concernent les tendons des muscles cubital antérieur, grand palmaire et fléchisseurs des doigts. Dans ce dernier cas, la ténosynovite est souvent associée au syndrome du canal carpien. Une autre forme particulière, souvent observée, est la ténosynovite sténosante crépitante au niveau des fléchisseurs des doigts ou du pouce qui est encore appelée "doigt ou pouce en ressort".

Les tendons du court extenseur du pouce et du long abducteur du pouce peuvent également être concernés: cette ténosynovite sténosante est encore appelée syndrome de de Quervain.

Les quatre signes cardinaux (douleur, gonflement local, rougeur cutanée et élévation locale de la température cutanée) de l'inflammation font partie des symptômes de la ténosynovite.

Le diagnostic est posé sur base des douleurs lors de la palpation et de mouvements étirant le tendon. Dans le cas du syndrome de de Quervain, le test de Finkelstein est aussi réalisé.

b. Syndrome du canal carpien

Le syndrome du canal carpien est caractérisé par la compression du nerf médian à l'intérieur du canal carpien.

Ce canal, situé au niveau du poignet, est formé à l'avant par le ligament annulaire du carpe et à l'arrière par les os du carpe. Ce tunnel fibro-osseux, au travers duquel transitent le nerf médian et son artère satellite ainsi que les tendons et les gaines des fléchisseurs superficiels et profonds des doigts est inextensible.

Une diminution de la taille du canal carpien ou l'augmentation de volume des structures contenues dans le tunnel sont à l'origine de la compression du nerf médian qui est la plus commune des compressions nerveuses.

La ténosynovite des fléchisseurs des doigts est souvent associée au syndrome.

Le diagnostic du syndrome du canal carpien est surtout basé sur l'anamnèse du sujet, renforcé par un résultat positif à l'application de certains tests spécifiques.

Dans un premier temps, les symptômes sont surtout sensitifs et d'apparition nocturne. Le sujet se plaint d'engourdissements, de picotements dans le territoire cutané innervé par le nerf médian.

L'innervation sensitive, à la face palmaire, concerne les trois premiers doigts et la moitié radiale de l'annulaire: à la face dorsale, elle concerne les dernières phalanges de ces mêmes doigts et la moitié de la troisième phalange pour l'annulaire ainsi que la moitié cubitale de l'ensemble du pouce.

Progressivement, les symptômes s'aggravent et perturbent l'activité fonctionnelle de la main. A un stade plus avancé, la douleur peut irradier jusqu'à l'épaule. Les troubles de la sensibilité s'aggravent et les troubles moteurs apparaissent.

Le diagnostic se base d'une part sur les douleurs et picotements évoqués et le réveil de ceux-ci lors de la compression du nerf médian et, d'autre part, sur deux tests cliniques: le signe de Phalen et le signe de Tinel.

c. Le syndrome de la loge de Guyon

Il s'agit d'un syndrome compressif moins fréquent que celui du nerf médian. Il affecte le nerf cubital lors de son passage à travers le canal de Guyon. Le tableau clinique est marqué par des picotements dans le territoire innervé par le nerf cubital c.à.d. la face palmaire et dorsale de l'auriculaire, de la moitié cubitale de l'annulaire et du bord cubital de la main.

L'examen clinique est semblable à celui du syndrome du canal carpien, la compression et la percussion (signe de Tinel) s'effectuant au niveau de la loge de Guyon.

Tests fonctionnels et sensitifs

La plupart des tests fonctionnels et sensitifs utilisés pour le dépistage des TMS du membre supérieur ont déjà été présentés et discutés ci-avant dans le cadre des pathologies liées aux HAV.

Les tests sensitifs (SPV, SPP) sont principalement employés pour le dépistage précoce de compression nerveuse (syndrome du canal carpien) (Lundborg et al., 1986; Brammer et al., 1987; Pelizzoni, 1990; Erdil et al., 1994; Gerr et al., 1995). Erdil et al. (1994), mais aussi Gellman et al. (1986), en étudiant plusieurs tests cliniques et sensitifs, citent une sensibilité (de 80 à 90%) et une spécificité (de 90 à 100%) élevées pour le SPP et pour la conduction nerveuse (TLM, TLS) pour le diagnostic du syndrome du canal carpien. Ils montrent aussi que 20% des sujets atteints peuvent avoir une conduction nerveuse normale.

La diminution de la force de préhension maximale (FMV) suite à une atteinte neurologique (canal carpien) a été montrée chez des patients par Fernandez (1991). Il a également mis en évidence une limitation de la mobilité articulaire du poignet.

Etant donné, d'une part, le trop grand nombre de faux positifs détectés par un seul test (Pransky et al., 1997) et, d'autre part, l'évolution de l'atteinte (Callahan, 1990), plusieurs tests sont à nouveau nécessaires pour pouvoir réaliser un diagnostic valable. Young et al. (1995) proposent par exemple un score global basé sur 12 mesures d'anormalité provenant de différents tests, un score faible correspondant à une détection précoce et un score élevé à une altération à un stade avancé.

Facteurs associés aux TMS

Deux ouvrages importants (Hagberg et al., 1995; Bernard, 1997) ont revu la littérature en ce qui concerne les facteurs associés aux TMS. Leurs conclusions ne permettent plus de mettre en doute la relation entre l'exposition professionnelle et certains facteurs de risque avec l'apparition de TMS même si des facteurs personnels et psychosociaux y sont aussi associés.

1. Facteurs liés au poste de travail

Les principaux facteurs professionnels cités dans la littérature (Putz-Anderson, 1988; Hagberg et al., 1995, Bernard, 1997) sont la force, la répétitivité, la posture ainsi que le manque de repos. L'exposition aux vibrations apparaît comme un facteur supplémentaire.

L'implication de ces facteurs y est illustrée pour différents secteurs industriels.

Dans leur synthèse de la littérature, Hagberg et al. (1995) rapportent des odds ratios (OR) supérieurs à 5 pour la survenue de tendinites au niveau des épaules, des poignets ou des mains, tandis que l'association serait moins évidente en ce qui concerne les coudes (épicondylites, épitrochléites). De même, des OR entre 4 et 10 ont été observés pour le syndrome du défilé thoraco-brachial et de 4 à 15 pour le syndrome du canal carpien (en fonction de la force et de la répétitivité).

Au terme d'une synthèse de 49 articles, Stock (1991) rapporte des OR compris entre 8 et 19 entre l'exposition à la force, la répétitivité, les postures (statiques) et le développement de tendinites et téno-synovites au niveau des poignets et des mains.

Moore et Garg (1994) rapportent un risque relatif de 12 de développer une pathologie TMS et jusqu'à 7 pour une pathologie spécifique en fonction de la force. Silverstein et al. (1986 et 1987), sur un échantillon de plus de 600 travailleurs de différentes entreprises, ont obtenu des OR de 5 pour les TMS en général et de 3 pour le syndrome du canal carpien en fonction de la force.

En comparant dans la même étude les postes avec une répétitivité élevée et faible, les OR sont légèrement supérieurs (respectivement 5,5 et 3,3). Pour Putz-Anderson (1988), la répétitivité des mouvements, des gestes, est un facteur tout aussi si pas plus important que la force quand on sait que certains postes de travail peuvent entraîner jusqu'à 25.000 mouvements par jour. Dans une étude cas (600) – contrôles (1000), English et al. (1995) ont notamment montré une augmentation du risque par un facteur de 1,4 lorsque la fréquence des mouvements en flexion-extension augmentait de 20 par minute.

L'interaction de la force et de la répétitivité est considérable, le OR de 29 obtenu dans l'étude de Silverstein et al. (1986 et 1987) étant nettement supérieur au produit des OR (9) observés séparément pour les deux facteurs.

Si la posture apparaît un peu en retrait par rapport à la force et la répétitivité, notamment dans le cas du syndrome du canal carpien (Bernard, 1997), l'interaction de ces trois facteurs joue un rôle essentiel dans la survenue d'une pathologie TMS (Tanaka et McGlothlin, 1993).

Les postures contraignantes sont surtout associées aux pathologies de la nuque et des épaules, mais aussi aux pathologies tendineuses des poignets et des mains (Hagberg et al., 1995; Bernard, 1997).

L'utilisation de machines vibrantes augmente le risque notamment d'un syndrome du canal carpien avec des OR observés entre 2 (Silverstein et al., 1987) et 7 (Canon et al., 1981), tandis que selon Buckle (1997) ce risque est multiplié par 5.

De nombreuses méthodes ont été proposées pour étudier et pour quantifier ces facteurs de risque. Malchaire (1998) a recensé plus d'une vingtaine de ces méthodes qu'il propose de classer en quatre étapes successives, en fonction de l'objectif visé par l'utilisateur de la méthode et de sa compétence en ergonomie des TMS.

Ces quatre étapes sont:

- **Dépistage:** méthode simple, peu rapide et peu coûteuse, à utiliser par des personnes peu spécialisées en ergonomie des TMS, mais connaissant particulièrement bien les différents postes de travail. Le but est de cibler les postes où un risque de TMS pourrait exister et qui nécessitent une analyse plus détaillée. Exemple: Méthode Renault (1979) ou différentes check-lists (Lifshitz et Armstrong, 1986; Kilböm, 1994 et 1997; Ahonen et al., 1989).
- **Observation:** observation plus systématique des différents facteurs de risque, par région corporelle, dans le but de déterminer des mesures de prévention. Ces méthodes sont encore à utiliser par des personnes de l'entreprise. Exemple: Keyserling et al., 1993, Silverstein, 1997, Malchaire et Indestege, 1997 (étape 1).
- **Analyse:** quantification plus précise des facteurs de risque souvent à partir d'enregistrements vidéo dans le but de déterminer des mesures de prévention qui n'auraient pas pu être établies lors de l'observation.

Méthodes à utiliser par des personnes ayant reçu une formation spécialisée en ergonomie et notamment vis-à-vis des problèmes de TMS du membre supérieur.

Exemple: Rodgers, 1992; Moore et Garg, 1995; Malchaire et Indestege, 1997 (étape 2).

- **Expertise:** quantification réalisée à l'aide d'instruments de mesurage (EMG de surface, goniomètres électroniques, ...) par des experts provenant de laboratoires de recherche spécialisés dans l'analyse des TMS.
Exemple: Malchaire et Indestege, 1997 (étape 3); Marras et Schoenmarklin, 1991 et 1993; Pichené, 1995;

Ces 4 étapes ne sont pas toutes nécessaires à chaque poste de travail, l'analyse des TMS s'arrêtant à une des étapes dès que des mesures de prévention jugées suffisantes ont été prises.

2. Facteurs extraprofessionnels

L'exposition aux facteurs de risque liés au poste de travail peut exister en dehors du milieu professionnel (jardinage, bricolage, instrument de musique, sports particuliers (tennis, ...), activités ménagères, ...). Pujol (1993) notamment cite ces facteurs et reprend entre autres les pathologies MS liées à différents sports. Les plus connues sont le "tennis elbow" (épicondylite) et le "golf elbow" (épitrochléite).

3. Facteurs individuels

De nombreux facteurs individuels (Hagberg et al., 1995) peuvent être associés à un TMS: âge, sexe, anthropométrie (exemple: taille liée au syndrome du canal carpien (Buckle, 1997)), différences anatomiques, consommation d'alcool, tabagie, maladies systémiques (diabète, hypertension, ...).

Les deux principaux facteurs cités et étudiés sont d'une part l'âge en raison de la dégénérescence des tissus (l'âge est associé aux pathologies de la nuque et des épaules dans un échantillon de près de 1500 travailleurs belges (Malchaire, 1995)) et, d'autre part, le sexe. Des prévalences de TMS supérieures sont souvent relevées chez les travailleuses (English et al., 1995) avec des OR de l'ordre de 5 vis-à-vis des travailleurs (Silverstein et al., 1986). Cependant, ces différences s'expliquent généralement par des postes de travail présentant des contraintes plus importantes pour les femmes, notamment en terme de répétitivité. Lorsque cet effet poste de travail est contrôlé (comparaison dans des postes mixtes), ces différences diminuent ou disparaissent (Silverstein et al., 1986; Malchaire, 1995; Hagberg et al., 1995).

4. Facteurs psychosociaux et organisationnels

Des facteurs psychosociaux (irritation, état dépressif, monotonie du poste, stress, mauvaises relations de travail, ...) sont souvent rapportés comme associés aux TMS bien que peu d'études s'y intéressent spécifiquement (Malchaire, 1995; Hagberg et al., 1995).

Une relation de cause à effet n'est pas scientifiquement prouvée et, par exemple pour l'état dépressif, il n'est pas établi si une personne dépressive est plus sujette à développer un TMS ou si une personne atteinte d'un TMS est plus susceptible de devenir dépressive (Hagberg et al., 1995). Les plaintes MS sont souvent recueillies par un questionnaire (Kuorinka et al., 1987) et dès lors une personne irritée, déprimée pourrait être sujette à se plaindre plus de petits problèmes TMS tandis que pour d'autres, il pourrait s'agir d'un report de plaintes liées aux conditions de travail (monotonie, mauvaise ambiance, ...).

EPIDEMIOLOGIE DES PLAINTES DU MEMBRE SUPERIEUR (TMS ET HAVS)

Depuis 20 ans, toutes les statistiques montrent une augmentation du nombre de TMS. Ainsi, aux U.S.A., ce nombre était en 1981, 1989 et 1991 respectivement de 18, 52 et 61% (Erdil et al., 1994). Putz-Andersson (1990) cite des chiffres similaires (15% en 1981 et 50% en 1988). Selon Rempel et al. (1992), les TMS représenteraient 50% des maladies professionnelles aux U.S.A. et seraient passés de 5 à 20 cas pour 100.000 travailleurs. Sur 127 millions de travailleurs en 1988, 1,5% auraient rapporté par eux-mêmes des symptômes du syndrome du canal carpien, tandis que 0,5%, soit plus de 600.000 travailleurs, auraient recouru au diagnostic d'un médecin (Tanaka et al., 1995). En moyenne, cela correspondait fin des années 80 (Putz-Andersson, 1988) à 2 jours d'incapacité de travail par an et par travailleur.

Pour les compagnies d'assurance, le coût représente 15% des paiements privés aux U.S.A. dont 65% en indemnités et 33% en coûts médicaux (Webster et Snook, 1994). Selon Hagberg et al. (1995), les coûts indirects (production, remplacement de personnel, ...) liés aux TMS sont de deux à trois fois supérieurs aux coûts directs (indemnités, assurances, ...).

L'abondance des informations sur la situation aux U.S.A. provient de la prise en compte très tôt de l'importance du problème par les pouvoirs publics. Cette prise de conscience existe également dans d'autres pays tels que la Suède (législation spéciale), le Japon (programme de recherche) ou le Canada (Pujol, 1993; Hagberg et al., 1995). Par contre, la plupart des pays européens et en particulier la France (avec pourtant 1000 cas de TMS déclarés en 1990 (Pujol, 1993)) ou la Belgique n'ont à ce jour toujours pas développé de politique globale de prévention dans ce domaine.

Sur l'initiative de l'état, des programmes de recherche ont cependant été lancés en Belgique qui ont permis de décrire le problème (Malchaire, 1995) et qui sont à l'instigation de la présente étude. Des prévalences de 10 à 40% ont ainsi été observées sur une population de 1500 travailleurs appartenant à différents secteurs industriels (sidérurgie, alimentaire, automobile, encodage, tertiaire).

La partie prospective de cette étude a montré des incidences annuelles de plaintes MS allant de 5% pour les coudes et les épaules à plus de 10% pour les poignets et jusqu'à 20% pour la nuque.

Depuis 1992, les troubles musculosquelettiques peuvent faire l'objet de déclarations par le système dit "ouvert" au Fonds des Maladies Professionnelles. Les derniers chiffres rapportés pour 1997 révèlent également l'ampleur du problème.

Sur 1439 dossiers examinés en 1997 par la commission "système ouvert", 316 ont fait l'objet d'une convocation dont 181 (57%) pour des tendinites. 31 sur les 58 demandes acceptées concernaient ces pathologies tendineuses et étaient localisées en majorité au niveau des coudes (19), des poignets (7 de Quervain et 2 tendinites), puis des épaules (3) (Fonds des Maladies Professionnelles, 1998).

L'exposition aux vibrations est un facteur supplémentaire à la survenue de TMS mais qui peut engendrer des pathologies spécifiques (HAVS). L'importance du problème ne peut en être que plus grande. En fonction principalement du type de machine vibrante, des prévalences de 10 à 80% ont été rapportées (Pelmear et al., 1992) pour des durées d'exposition variant de quelques mois à plusieurs années (jusqu'à 20 ans) (Pelmear et Taylor, 1991). En Suède, des prévalences de 20 à 60% et de 20 à 70% ont été rapportées respectivement pour les pathologies vasculaires et neurologiques alors que la prévalence de pathologies ostéo-articulaires serait inférieure à 1% (Gemne et al., 1993).

Les études épidémiologiques liées au HAVS sont abondantes en ce qui concerne les pathologies vasculaires (VWF) et remontent souvent au début des années 1980 avec des prévalences supérieures à 50% (Brubaker et al., 1987). La réduction des vibrations générées notamment par les tronçonneuses (de 14 à 2 ms⁻²) a réduit la prévalence de VWF de 40 à 5% (Koskimies et al., 1992). La prévalence chez des bûcherons utilisant toujours des tronçonneuses sans système anti-vibration (9 à 14 ms⁻²) serait de 52% pour 13% chez ceux qui utilisent des machines plus récentes (4 à 6 ms⁻²) (Bovenzi et al., 1995).

Vu les améliorations techniques apportées aux machines, il semble donc que les pathologies vasculaires soient en général en nette régression et qu'elles concerneraient à l'heure actuelle essentiellement certaines catégories professionnelles particulières, tels les bûcherons (23% VWF), les travailleurs des carrières (30% VWF) (Bovenzi et al., 1994 et 1995) ou les travailleurs exposés à la fois aux vibrations et à des contraintes climatiques (froid) importantes (pays scandinaves, Canada, ...).

Les études s'intéressant aux troubles neurologiques liés aux vibrations et à leurs prévalences sont généralement plus récentes (fin des années 80, début 90) et moins nombreuses.

Des prévalences de 53% chez des bûcherons (dont 26% de syndrome du canal carpien) (Färkkilä et al., 1988), de 29% chez des dentistes (Stockill et al., 1993), de 23% chez des patients VWF (Kakosy, 1994) et de 17% chez des riveteurs (Burdorf et Monster, 1991) ont notamment été observées.

Très peu d'études utilisent la classification de Stockholm étant donné la difficulté de définir l'atteinte neurologique sur base des symptômes évoqués.

En conclusion, les incidences (peu de données) et les prévalences des pathologies aussi bien TMS que liées aux vibrations (HAVS) sont dans des fourchettes très larges. Plusieurs raisons expliquent cela:

- les différences dans les méthodologies de recueil des plaintes (questionnaire sur une période en général de 12 mois sous forme d'interview ou envoyé par la poste, examen clinique avec ou sans tests spécifiques établissant un diagnostic le jour de l'examen, ...);
- les contraintes aux postes de travail sont très différentes car elles résultent de la combinaison et de l'interaction de plusieurs facteurs (force, répétitivité, posture, vibrations, ...);

- les contraintes vibratoires en elles-mêmes résultent également de nombreux facteurs (amplitude et fréquence des vibrations, poids des machines, durée d'exposition (journalière, annuelle, ...), force de pression et de préhension, ...);
- l'influence des pouvoirs publics et la prise de conscience du problème varie d'un pays à l'autre même au sein des différents pays industrialisés (notamment selon qu'une législation spécifique existe ou non).

I. SELECTION DE LA POPULATION

Trois groupes de travailleurs, de sexe masculin, ont été sélectionnés pour participer à cette étude prospective. Une des conditions d'admission pour l'étude a été la stabilité des conditions de travail pendant les deux années à venir, c.à.d., pendant la durée de l'étude prospective.

- **Le premier groupe (GR1)** concerne les travailleurs exposés aux vibrations. Nous n'avons retenu que des sujets exposés majoritairement aux vibrations manubrariales. Un total de 9 firmes et 69 hommes ont été sélectionnés au début de l'étude. Les 9 firmes proviennent de 6 secteurs industriels différents:

1. *L'industrie automobile:*
 - . boulonnage de pièces: 11 hommes
 - . meulage et ponçage de tôles: 12 hommes
2. *Les carrières (3 carrières différentes):*
 - . forage de blocs: 7 hommes
 - . taillage de pierre: 10 hommes
3. *La construction:*
 - . blindage des souterrains: 4 hommes
4. *La menuiserie:*
 - . réparation de palettes: 9 hommes
5. *Les entreprises métalliques (2 entreprises):*
 - . meulage et ponçage des armatures des sièges de bus, trams, métros, ...: 5 hommes
 - . meulage et chanfreinage des châssis et toitures de wagons sur rail: 4 hommes.
6. *L'armement:*
 - . polissage intérieur des canons de fusils: 7 hommes.

Ces postes de travail feront l'objet ci-dessous d'une description détaillée.

- **Le deuxième groupe (GR2)** provient d'une entreprise sidérurgique. Il s'agit d'une part de travailleurs exposés à des travaux lourds et répétitifs en ce qui concerne les poignets. Il est constitué de personnes occupées à l'emballage, métallique ou en papier, de coils et de tôles planes, ainsi que de monteurs-tête (montage des cisailles pour découper les bobines). La sélection a été effectuée sur base de données concernant le poste de travail et recueillies lors de l'interview. 62 personnes ont été retenues au début de l'étude.
- **Le troisième groupe (GR3)** comprend des sujets non-exposés effectuant des travaux légers et non répétitifs. Le mode de sélection a été le même que pour le deuxième groupe. 46 travailleurs ont été retenus. Il provient également d'une entreprise sidérurgique.

Ces trois groupes de travailleurs ont été choisis afin d'isoler les vibrations des autres facteurs ergonomiques (les efforts et la répétitivité essentiellement). La comparaison des deux premiers groupes déterminera la contribution des vibrations et le troisième groupe servira de référence (groupe contrôle).

177 travailleurs masculins, occupant leur poste à plein temps, ont donc été sélectionnés au début de l'étude prospective.

II. PROTOCOLE D'ETUDE

L'ensemble de ces travailleurs a été soumis à trois reprises, à un an d'intervalle, à:

- . une anamnèse au moyen d'un questionnaire;
- . un examen clinique orienté vers le membre supérieur;
- . différents tests fonctionnels et sensitifs dirigés vers le poignet et la main.

Tous les travailleurs ont été convoqués individuellement. L'entretien et les tests se sont déroulés dans un local isolé, calme, à l'écart des différents postes de travail.

Chaque personne fut préalablement informée des objectifs et du déroulement de l'étude, du mode de sélection des participants et de la confidentialité des résultats. Elle fut laissée totalement libre de participer ou non à l'étude. La majorité des travailleurs a également participé à l'analyse de poste ayant pour objectif de quantifier les contraintes de travail au niveau des poignets.

Parallèlement à cette enquête, l'ensemble des machines vibrantes ont été étudiées afin de caractériser leur spectre en fréquences et les niveaux d'accéléérations générés.

Ce projet de recherche fait suite et est le complément de la première recherche réalisée de 1990 à 1994 dans le cadre du programme "IMPULSION" des SSTC et intitulée "Pathologie musculosquelettique du membre supérieur". Les mêmes questionnaires, examens cliniques et tests fonctionnels et neurosensoriels ont été utilisés moyennant certaines modifications et compléments. Ces modifications ont été apportées afin de cibler les troubles sensitifs provoqués par l'utilisation de machines à main vibrantes.

A. Le questionnaire

Le questionnaire utilisé comprend un total de 160 questions. Il a été rempli lors d'une interview avec une kinésithérapeute.

Les questions concernaient:

1. *les caractéristiques personnelles*: l'âge, le poids, la taille, l'ancienneté au poste de travail et dans l'entreprise, les habitudes tabagiques, la consommation d'alcool, les activités sportives et les caractéristiques des hobbies pratiqués.
2. *l'état de santé*: une appréciation subjective de l'état de santé a été demandée au sujet; la présence ou non de maladies chroniques ou de maladies nécessitant la prise de médicaments; les accidents de vie privée ou de travail au niveau des membres supérieurs; leur gravité et les séquelles qu'ils ont occasionnées; enfin le nombre de consultations médicales durant les 12 derniers mois (pour des raisons différentes).
3. *les caractéristiques psychosociales*: les questions posées portaient sur l'état psychologique du travailleur, investigué par la fatigue, l'irritabilité, les troubles de mémoire, la qualité du sommeil et les céphalées.
4. *les activités professionnelles actuelles*: les efforts de levage, les efforts exercés par les mains et les poignets, de même que la répétition des gestes, ont été évalués par le travailleur. L'exposition à certains facteurs de risque tels que les solvants, le bruit, ... et l'utilisation de machines vibrantes a été relevée. Les travailleurs devaient préciser la fréquence, la durée d'utilisation de ces machines, ainsi que le type de machines (meuleuse, foreuse, ...).
La personne interrogée a enfin eu à estimer la fatigue ressentie au niveau des poignets après une journée de travail et à juger de la pénibilité de son travail. Cette fatigue aux poignets a été évaluée sur une échelle de fréquence à 4 niveaux: jamais (ou rarement); parfois (\pm 1 fois/mois); souvent (\pm 1 fois/semaine) et toujours (plusieurs fois/semaine).
La pénibilité du travail, quant à elle, est évaluée par la question: "Trouvez-vous votre travail physiquement fatigant? Pas du tout, un peu, moyennement ou très fatigant".
5. *les activités professionnelles antérieures*, sous les mêmes aspects que pour le poste de travail actuel;
6. *les antécédents musculosquelettiques* (douleurs, gênes, inconfort) sur base du questionnaire scandinave (Kuorinka et coll., 1987) pour chaque région (nuque, épaules, coudes, poignets et dos) au cours de la vie, des 12 derniers mois et durant les 7 derniers jours. Les personnes interrogées devaient préciser la fréquence et le mode d'apparition, le caractère et la durée de la gêne, ainsi que le diagnostic évoqué au moment de l'épisode douloureux.
7. *les épisodes de VWF ainsi que les picotements au niveau des doigts*. Les travailleurs devaient préciser les moments et la fréquence d'apparition de ces troubles, les circonstances dans lesquelles ils étaient apparus, les doigts concernés, ainsi que la présence ou non de problèmes de dextérité ou de faiblesses musculaires.
Les antécédents chirurgicaux ou de traitement par infiltration, dans le cadre d'un syndrome du canal carpien, ont également été relevés.

Les réponses étaient exprimées, pour l'ensemble des questions, soit en terme d'intensité (ex.: efforts de levage: léger, moyen, lourd) ou de fréquence (ex.: irrité: jamais, parfois, souvent, toujours). Une réponse était choisie par l'interviewer en accord avec la personne.

Les données ont été dépouillées par ordinateur de manière à calculer les prévalences, à déterminer les associations éventuelles entre prévalences et facteurs de risque (tables de contingence et tests du Chi²) et à étudier les associations par régression logistique multiple.

B. L'examen clinique

Les taux de prévalence rapportés dans la littérature sont le plus souvent basés sur les plaintes des sujets. Il est généralement plus difficile de comparer les taux de prévalence établis à partir d'examen clinique, car les méthodes et les critères de diagnostic sont différents et/ou insuffisamment expliqués.

Afin de standardiser l'approche, nous avons entrepris de définir de façon précise les critères de diagnostic pour les pathologies musculosquelettiques des membres supérieurs. Cet examen clinique, qui a fait l'objet d'une publication destinée aux médecins du travail (Cock et Masset, 1994), a été conçu sur base d'une revue de la littérature. Ce sont principalement les travaux de chercheurs finlandais qui ont été retenus (Viikari-Juntura, 1983; Kroemer, 1989; Waris et coll., 1979; Waris, 1980). L'étude comparative des pathologies et des critères de diagnostic a permis de retenir, d'une part, une liste des pathologies les plus pertinentes dans le monde du travail et, d'autre part, de proposer des critères de diagnostic nécessaires ou facultatifs. Cette recherche bibliographique a été complétée et affinée par les avis et expériences de deux médecins orthopédistes.

L'examen clinique a eu pour but de cibler les pathologies touchant les structures les plus vulnérables du membre supérieur et de la nuque susceptibles d'être lésées au travail: les articulations, les muscles, les tendons et les nerfs. L'esprit a été de restreindre l'examen aux pathologies les plus rencontrées dans le milieu du travail et de limiter les tests et les examens sophistiqués, pour que l'examen clinique puisse s'intégrer dans un examen médical périodique effectué par le médecin du travail. Il est à noter tout spécialement que cet examen a cherché à diagnostiquer les atteintes à un stade relativement précoce et non pas au stade clinique.

L'examen clinique, d'une durée de 15 à 30 minutes, comprend une anamnèse, une inspection des tissus mous du membre supérieur, un examen palpatoire, des tests de mobilité et certaines épreuves spécifiques.

Les pathologies recherchées, par région anatomique, sont les suivantes:

- *Pour la nuque:*
 - l'ostéoarthrose cervicale,
 - le syndrome tensionnel de la nuque (ou tension neck syndrome).
- *Pour la région du cou:*
 - le syndrome du défilé thoraco-brachial.
- *Pour les épaules:*
 - la tendinite de la coiffe des rotateurs,
 - la ténosynovite du long chef du biceps brachial,
 - l'épaule gelée,
 - le syndrome de l'articulation acromio-claviculaire.
- *Pour les coudes:*
 - les épicondylites latérale et médiale.
- *Pour les poignets:*
 - les ténosynovites (y compris le doigt en ressort et la ténosynovite de de Quervain),
 - le syndrome du canal carpien (SCC),
 - le syndrome de la loge de Guyon.

Cet examen a été complété par le relevé des plaintes, par des observations et des tests spécifiques orientés vers la détection du "syndrome des vibrations" (en anglais HAVS "Hand Arm Vibration Syndrome"). Les échelles de Stockholm (vasculaire et neurologique) ont été utilisées afin de préciser le degré de gravité de l'atteinte (Brammer et coll., 1987).

Ces échelles de Stockholm datent de 1986 et évaluent séparément les troubles vasculaires et neurologiques. Elles comprennent respectivement 4 et 3 stades de gravité et sont reprises aux tableaux 2.1. et 2.2.

2.1 - Classification de Stockholm - Composante vasculaire (d'après le Symposium de Stockholm, 1986)

Stade	Degré	Description de la crise
0	-	Pas d'attaque
1	Léger	Attaques occasionnelles affectant seulement

		l'extrémité d'un ou plusieurs doigts
2	Moyen	Attaques occasionnelles affectant les phalanges et les phalangettes (rarement les phalanges) d'un ou plusieurs doigts.
3	Sévère	Attaques fréquentes affectant toutes les phalanges de la plupart des doigts.
4	Très sévère	Comme au stade 3, avec des modifications trophiques de la peau à l'extrémité des doigts

TABLEAU 2.2 - Classification de Stockholm - Composante neurosensorielle (1986)

Stades	Symptômes
0	Exposition aux vibrations, aucun symptôme
1	Engourdissements intermittents avec ou sans picotements
2	Engourdissements intermittents ou persistants, réduction de la perception sensitive
3	Engourdissements intermittents ou persistants, réduction de la discrimination tactile et/ou de la dextérité manuelle

C. Les tests fonctionnels et sensitifs

Les tests, au nombre de 7, sont orientés vers le poignet et plus spécifiquement vers la détection du syndrome des vibrations. Ils ont toujours été exécutés bilatéralement. Ces tests ont été sélectionnés à nouveau sur base d'une revue de la littérature et de façon à répondre aux critères suivants:

- constituer un outil de détection précoce de troubles neurologiques et surtout du syndrome des vibrations;
- être facilement applicables en entreprise et donc être transportables;
- être rapides afin de répondre aux contraintes temporelles imposées par les entreprises.

1. La force de préhension maximale

La force de préhension globale (FMV) est mesurée à l'aide d'un dynamomètre hydraulique de type JAMAR, modèle PC 5030 J1 (Camp, UK) de gamme dynamique de 0 à 90 kg. Cet effort est effectué avec le bras le long du corps, l'avant-bras à l'horizontale, le coude fléchi à 90°, le poignet en position neutre et le dynamomètre, dont la poignée est réglée au deuxième cran, dans la main (Mathiowetz, 1990). L'effort demandé est un effort progressif pour atteindre le maximum que le sujet maintient quelques secondes. Un encouragement verbal accompagne les quatre essais effectués dont les trois derniers sont moyennés. La force de préhension globale est exprimée en kg.

2. Les angulations maximales du poignet

Les mesurages des angulations du poignet ont été réalisés à l'aide d'un goniomètre électronique (PENNY & GILES, type M110, Blackwood Ltd, UK) qui donne un signal électrique proportionnel au mouvement angulaire. Le goniomètre est constitué de deux jauges de contrainte montées dans un câble extensible entre deux masselottes à fixer sur la main et l'avant-bras. Cet ensemble est relié à un moniteur digital qui permet la lecture immédiate de la valeur de l'angle. Le goniomètre permet de mesurer les angles de déplacement des poignets dans les deux axes de mouvement, c.à.d. les déviations radio-cubitales et les flexion-extension. La gamme d'angulations va de -90 à +90° dans les deux axes de mouvement. La précision des mesurages est de l'ordre du degré.

Les mesurages s'effectuent chez un sujet en position assise dont l'avant-bras repose en pronation sur une table. L'examineur installe une masselotte sur le troisième métacarpien et l'autre dans l'alignement sur l'avant-bras. Une fois le goniomètre installé, les valeurs de départ sont réglées à zéro. Ensuite, on demande au sujet de déplacer la main dans l'axe radio-cubital, ainsi que dans l'axe de flexion-extension, au maximum

de chaque capacité articulaire. Les valeurs affichées sont notées et correspondent aux angulations maximales. Le test est appliqué aux poignets gauche et droit et les valeurs obtenues sont comparées avec les valeurs de référence.

3. La sensibilité tactile à la pression

Le seuil de perception à la pression (SPP) est déterminé à l'aide des monofilaments de Semmes-Weinstein (Neurotron Medical, New Jersey).

Il s'agit de baguettes munies, à l'une des extrémités et perpendiculairement à celle-ci, d'un filament en nylon. Ces monofilaments sont fournis en Kit de 20, de diamètres croissants de manière à augmenter progressivement la force de pression (de 4,5 mg à 447 g). Cette pression s'exerce dès que le filament, appliqué perpendiculairement sur la pulpe des doigts, plie. Elle est indépendante de la force extérieure d'appui exercée par l'examineur.

Pendant le test, le sujet est assis face à une table, la main posée avec la face dorsale appuyée sur cette table et les doigts légèrement écartés. Le test débute avec le dernier filament de la catégorie "normale" (filament 2,83) pour ensuite passer au filament inférieur ou supérieur selon que le sujet perçoit ou non le filament au moins une fois sur trois essais. Le SPP adopté est le filament le plus fin perçu par le sujet. Le test est effectué sur les pulpes des majeurs et auriculaires des deux mains, sans contrôle visuel de la part du sujet.

Bell-Krotoski (1990b) définit une correspondance entre le résultat du test et la perte sensitive. L'échelle s'étend de la sensibilité normale à la perte de la sensation de protection (tableau 2.3).

4. Le seuil de perception des vibrations

Le mesurage du seuil de perception aux vibrations (SPV) a été effectué à l'aide d'un audiomètre Madsen Micromate 64 modifié quant aux fréquences générées et dont les écouteurs ont été remplacés par un excitateur. Cet excitateur est muni d'une tige filetée d'une section de 5 mm² sur laquelle le sujet pose la pulpe du doigt testé. Grâce à un système de balance, la pression sur la pulpe du doigt est maintenue constante et égale à 20 grammes. Cette tige transmet la stimulation vibratoire. Le système a une gamme dynamique qui s'étend de 50 à 160 dB et permet de générer les basses fréquences de 8, 16, 31,5, 63, 125, 250 et 500 Hz. L'incrément de mesurage est de 5 dB.

TABLEAU 2.3 - Echelle d'interprétation des monofilaments de Semmes-Weinstein (d'après Bell-Krotoski, 1990b)

Classes	Numéro du filament	log force ref: 0,1 mg	Force (g)
Toucher normal	1	1,65	0,0045
	2	2,36	0,0230
	3	2,44	0,0275
	4	2,83	0,0667
Diminution du toucher léger	5	3,22	0,1660
	6	3,61	0,4082
Diminution de la sensation de protection	7	3,84	0,6958
	8	4,08	1,194
	9	4,17	1,494
	10	4,31	2,052
Perte de la sensation de protection	11	4,56	3,632
	12	4,74	5,500
	13	4,94	8,650
	14	5,07	11,70
	15	5,18	15,00
	16	5,46	29,00
	17	5,88	77,00
	18	6,10	127,0
	19	6,45	281,5
	20	6,65	447,0

Le sujet s'installe en position assise et dépose le bras sur la table d'évaluation. Cette table présente un orifice permettant le contact entre la pulpe du doigt et l'excitateur. Le sujet doit placer l'extrémité du doigt sur la tige. Cette position est maintenue par le sujet et le test est réalisé successivement pour des sollicitations vibratoires de 63, 125 et 250 Hz. Tout comme lors d'un examen audiométrique, l'examineur modifie l'intensité du signal en vue de déterminer le seuil de sensibilité. En réponse, le sujet est invité à pousser, avec sa main libre, sur un bouton donnant un signal lumineux. Le sujet doit pousser le bouton pendant tout le temps qu'il perçoit la vibration et le relâcher lorsqu'il en a perdu la sensation. Le seuil de perception est déterminé par le niveau de vibration le plus faible auquel le sujet perçoit la vibration trois fois consécutivement.

Le test exigeant beaucoup de concentration, le sujet porte des coquilles pour s'isoler du bruit et ferme les yeux. Il est placé face à une surface pauvre en stimulations visuelles (par ex. face à un mur) de façon à être vu par l'examineur, sans que lui-même puisse suivre les manipulations réalisées par l'examineur.

Le test a été appliqué systématiquement sur les troisième et cinquième doigts de chaque main, afin de pouvoir comparer les valeurs pour les nerfs médian et cubital de façon bilatérale.

5. Le temps de latence sensitif

Le mesurage de la vitesse de conduction nerveuse est le test de référence pour réaliser un diagnostic différentiel entre certaines neuropathies (le syndrome des vibrations et le syndrome du canal carpien), mais il s'avère difficilement réalisable en entreprise. Aussi a-t-il été décidé de mesurer le temps de latence sensitif (TLS) grâce à un stimulateur portable. Le mesurage est effectué à l'aide d'un électroneuromètre digital Nervepace Neurotron Medical, modèle S200 (Neumed Lawrenceville, New Jersey). Cet appareil portable, réglable en intensité et en sensibilité, envoie à l'aide d'un stimulateur une stimulation de 0,2 milliseconde. Durant le test, le sujet est assis et pose le bras sur la table. La peau est nettoyée avec de l'alcool pour enlever toute trace de graisse et faciliter la mise en place des électrodes de surface. L'électrode de référence est placée sur le dos de la main, tandis que les deux électrodes de réception sont placées soit sur l'index, soit sur l'auriculaire. La stimulation électrique est appliquée au moyen de deux électrodes métalliques placées au-dessus du nerf médian ou cubital selon le nerf visé, respectivement à 14 cm de l'électrode de réception du signal ou à 3 cm du pli de flexion distal du poignet, donc avant le passage par le canal carpien ou la loge de Guyon respectivement. Du gel pour électrode de stimulation est appliqué à cet endroit pour réduire la résistance de la peau. L'intensité de la stimulation est progressivement augmentée jusqu'à obtenir un temps

de latence reproductible. Le lecteur digital affiche ce temps de latence sensitif en millisecondes, avec une précision de mesurage de 0,1 ms. Une moyenne est calculée à partir de 5 valeurs n'ayant pas une différence supérieure à 0,2 ms.

6. La dextérité manuelle

La dextérité est testée au moyen du Purdue Pegboard (PPg) (Lafayette instrument, Indiana, U.S.A.).

Il s'agit d'un plateau de bois percé, sur deux rangées verticales de 25 trous. Le test est fourni avec une série de tiges, de rondelles et de cylindres creux. L'objectif du test est de placer, le plus rapidement possible et sur une période de 30 secondes, un maximum de tiges dans une rangée de trous. Le test est effectué avec la main dominante et concerne la rangée de trous du côté dominant (rangée de droite pour les droitiers). Pour réaliser le test, le sujet est assis en face du plateau. Trois essais sont effectués et moyennés.

D'autres épreuves (Banister et Smith, 1972) sont possibles avec le Purdue Pegboard, telles que tester les deux mains à la fois ou réaliser un montage avec tiges, rondelles et cylindres. Ces alternatives ne se justifient pas et n'ont pas été réalisées dans le cadre de cette étude.

III. L'ANALYSE DES CONDITIONS DE TRAVAIL

Parallèlement au suivi des travailleurs, des mesurages ont été réalisés afin, d'une part, de quantifier l'exposition aux vibrations et, d'autre part, de quantifier et caractériser les contraintes professionnelles au niveau des poignets par une analyse biomécanique.

A. Les vibrations des machines vibrantes

Les vibrations, caractérisées par leurs accélérations (ms^{-2}) et leurs fréquences (Hz) ont été mesurées pour l'ensemble des machines vibrantes utilisées par les travailleurs du groupe 1.

Ces mesurages ont été effectués selon les spécifications de la norme ISO 5349 (1986) au moyen d'accéléromètres fixés par un collier de serrage sur la poignée de la machine.

L'accélération a été pondérée en fréquences par un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est de 16 Hz et l'atténuation de 6 dB par octave (norme ISO 5349).

Un premier mesurage a été effectué au moyen d'un accéléromètre triaxial (Bruël & Kjaer 4321), afin de déterminer l'axe prédominant des vibrations. Cet accéléromètre, relié à un sonomètre (Bruël & Kjaer 2231), mesure les vibrations dans 3 axes: X, Y et Z, correspondant à l'axe de la poignée de la machine (Y), à l'axe perpendiculaire à cette poignée (X) et à la direction du bras (Z).

Une analyse plus approfondie a été réalisée dans l'axe prédominant ainsi déterminé. Celle-ci a été effectuée au moyen d'un accéléromètre monoaxial (Bruël & Kjaer 4384 pesant 11 g et ayant une sensibilité de $1\text{pC}/\text{ms}^{-2}$) fixé sur la poignée par un collier de serrage et orienté selon l'axe prédominant des vibrations de la machine. Le signal d'accélération est enregistré en linéaire (sans pondération fréquentielle) sur une durée de deux minutes au moyen d'un enregistreur digital DAT (Teac RD 111T) et via le sonomètre Bruël et & Kjaer 2231. La bande passante de cet enregistreur couvre la zone de fréquences utiles dans le domaine des vibrations manu-brachiales (0 à 1500 Hz) et la gamme dynamique est supérieure à 70 dB. Ces signaux sont ensuite rejoués en laboratoire et analysés au moyen d'un analyseur de fréquences (ONO SOKKI CF 350) afin de déterminer l'accélération équivalente pondérée et non pondérée ainsi que les fréquences principales et secondaires de la machine vibrante. Les mesurages concernent toujours l'accélération efficace (RMS: moyenne énergétique sur un temps de mesurage).

Les mesurages sont effectués sur les deux poignées ou sur la poignée et le corps de la machine vibrante selon la façon dont le travailleur la tient en main.

Avant tout mesurage en entreprise, un étalonnage de la chaîne de mesurage est réalisé au moyen d'une source étalon (Bruël & Kjaer 4291) qui génère une accélération constante de 10ms^{-2} (en pic).

B. Les contraintes biomécaniques

L'étude des contraintes biomécaniques a été restreinte aux poignets et pour les principaux facteurs professionnels cités dans la littérature à l'origine des troubles musculosquelettiques (Putz-Anderson, 1988; Bleecker, 1986; Kroemer, 1989; Joseph, 1989; Silverstein et al., 1986 et 1987; Thompson et Phelps, 1990; Pelmeur et al., 1992). Ces facteurs d'exposition professionnelle sont:

- la force manuelle,
- les angulations du poignet,
- la répétitivité gestuelle et
- la vitesse des mouvements.

Pour effectuer cette analyse, le travailleur a été équipé de goniomètres électroniques et d'électrodes de surface au niveau des avant-bras. L'ensemble des capteurs ont été raccordés au datalogger "Polylog".

1. Le Polylog

Le Polylog est un petit datalogger portable (un peu moins de 500 grammes), alimenté par une pile de 9 volts, et qui permet l'enregistrement en continu de 8 signaux différents, sur une carte mémoire. Cette carte (STATIC RAM, 512 Kbytes Panasonic) a une capacité d'une heure d'enregistrement et est lisible par le Polylog ou tout ordinateur muni d'un lecteur de ce type de carte. L'appareil peut fonctionner dans des ambiances de 0 à 60°C. Il est porté sur le dos par le travailleur au moyen d'un harnais léger. 7 des 8 canaux disponibles ont été utilisés:

Canal 1	pour le contrôle de la pile et relié à un bouton poussoir pour l'enregistrement d'observations
Canaux 2 et 3	reliés aux préamplis des électrodes de surface pour l'enregistrement du signal EMG
Canaux 4 à 7	reliés aux deux goniomètres droit et gauche.

2. Etalonnage des goniomètres

Les goniomètres Penny & Giles sont étalonnés avant que le sujet ne soit appareillé.

Le Polylog permet de régler le gain et le zéro des goniomètres. Les goniomètres sont reliés au Polylog, lui-même relié à un ordinateur (port série RS 232) permettant de contrôler visuellement les signaux. Le réglage du zéro se fait après réchauffement des goniomètres à la température ambiante, étant donné leur dérive importante en fonction de la température. L'étalonnage a donc lieu dans un local chauffé situé près du poste de travail.

L'étalonnage consiste à enregistrer les signaux correspondant aux angles de référence de 0°, +90° et -90°, pour chacun des goniomètres dans les deux axes.

3. Placement des capteurs et mesurage des valeurs maximales

Les goniomètres sont ensuite placés au niveau des poignets (comme pour l'examen fonctionnel). Les angulations maximales en déviation cubitale, en déviation radiale, en flexion et en extension sont mesurées et enregistrées de manière à exprimer ultérieurement les déplacements en valeur relative.

Les électrodes de surface sont ensuite appliquées sur la peau préalablement nettoyée à l'alcool. Une première électrode, de masse, est fixée sur l'épitrôchlée. Les deux autres sont placées sur la face antérieure de l'avant-bras, afin d'enregistrer l'activité myoélectrique des fléchisseurs des doigts et des poignets. Ces deux dernières électrodes sont fixées au niveau du muscle grand palmaire sur le tiers proximal de l'avant-bras, sur une trajectoire oblique qui relie l'épitrôchlée à la moitié du poignet lorsque l'avant-bras est placé en supination. Une valeur de référence est déterminée au cours d'un test d'effort de préhension palmaire maximal, à l'aide du dynamomètre de force décrit ci-dessus. Trois efforts de préhension maximaux d'une durée de 5 secondes et séparés par deux minutes de récupération, sont réalisés afin d'établir une moyenne de l'activité musculaire maximale et d'exprimer ultérieurement l'activité musculaire au travail en valeur relative.

Le Polylog est équipé d'un filtre passe-bas à 10 Hz pour les goniomètres et de filtres passe-haut à 20 Hz et passe-bas à 500 Hz pour l'EMG. Pour l'EMG, le Polylog calcule la valeur efficace RMS en microvolts. La fréquence d'échantillonnage est de 10 Hz pour l'ensemble des signaux.

4. Protocole de mesurages

Le sujet est appareillé et les goniomètres et câbles d'EMG sont reliés au Polylog. Celui-ci est placé, au moyen d'une ceinture, dans le dos du travailleur afin de gêner le moins possible l'exécution du travail.

Le sujet, assis face à une table, place les deux bras à plat, vers l'avant, sur la table et les valeurs angulaires neutres des goniomètres sont enregistrées. La personne est ensuite suivie à son poste de travail où elle effectue sa tâche journalière.

Pendant toute la période d'analyse, l'examineur note les changements de cycle ou d'opération, l'heure et la durée de chaque cycle, la durée précise d'utilisation des machines vibrantes, le type de machines utilisées et des observations générales. La durée de l'analyse est déterminée par la nature du travail, mais comprend un minimum de trois cycles représentatifs de travail.

Dans la mesure du possible, il a été décidé, suite aux conclusions tirées des études antérieures, de suivre à chaque poste de travail l'ensemble des travailleurs, plutôt que certains travailleurs représentatifs seulement, étant donné les grandes variations interindividuelles entre personnes effectuant un même travail (Malchaire et Cock, 1995).

Au cours d'une étude réalisée par Dutra Leao (1994), une analyse globale de poste par observation avait été effectuée chez quelques travailleurs pour trois postes de travail. L'analyse comprenait une évaluation des postures (de la nuque et des différentes articulations des membres supérieurs et du tronc), des forces exercées et de la répétitivité. L'analyse a montré qu'il n'existait pas de différences intraindividuelles entre matin et après-midi, ainsi que d'un jour à l'autre, hormis en cas de changements de type de travail. Aussi a-t-il été décidé de ne réaliser qu'une observation pour chaque travailleur.

Étant donné l'investissement temporel de ces analyses de poste, celles-ci ont été échelonnées sur les deux années de l'étude prospective.

5. Analyse des enregistrements

Les données récoltées ont été analysées en laboratoire. Les étapes de l'analyse ont été les suivantes:

- transfert des données de la carte du Polylog vers l'ordinateur;
- récupération des signaux des enregistrements des angles en fonction du temps, ainsi que des signaux d'étalonnage initiaux;
- vérification graphique de la cohérence des analyses, des pertes de signaux, des fluctuations, ...;
- dépouillement des données après délimitations des intervalles à analyser;
- impression des résultats par sujet et gestion des fichiers.

Selon Marras et Schoenmarklin (1991), la vitesse des mouvements des poignets discrimine les différents postes quant au risque de développement du syndrome du canal carpien. L'analyse a dès lors inclus le calcul de la vitesse du mouvement, en dérivant le signal angulaire enregistré lors de l'analyse de poste.

Les paramètres considérés pour décrire la contrainte biomécanique des poignets ont été les suivants:

- *Pour l'activité musculaire:*
 - l'activité musculaire moyenne (mEMGr) est exprimée à partir de l'enregistrement EMG, en valeur relative (en pourcentage du signal EMG maximal développé lors d'un effort de préhension maximal);
 - le pourcentage de temps (pEMG) pendant lequel le sujet a travaillé avec une activité musculaire supérieure à 15% de l'EMGmax (Byström, 1991; Kilbom, 1994).
- *Pour les angulations du poignet:*
 - les angles moyens adoptés par le travailleur:
 - pour les deux axes de mouvement, radio-cubital (mD) et flexion-extension (mF)
 - en relatif (en % de l'angle de déplacement maximal individuel, mDr et mFr);
 - le pourcentage de temps pendant lequel le sujet a travaillé dans des angulations dépassant certains seuils préétablis:
 - pour les deux axes de mouvement: en radio-cubital (pD) et flexion-extension (pF)
 - pour les axes de mouvement combinés: radio-cubital ou flexion-extension (pANG)
 - pour les axes combinés et une activité musculaire supérieure à 15% de l'EMGmax (pTOT).

Les seuils correspondent à des angles limites au-delà desquels l'amplitude de mouvement est considérée comme extrême et susceptible d'engendrer certains dommages (Armstrong, 1986), tels que le syndrome du canal carpien. Ces limites ont été fixées à 50% des déviations radio-cubitales maximales et à 60% des flexions-extensions maximales. Punnett et Keyserling (1987) ont proposé comme limites 15° en déviation cubitale et 5° en déviation radiale, mais sans en justifier la relation avec le développement de TMS. Par contre, Stetson et al. (1991) ont montré une augmentation du risque de TMS pour des déviations cubitales supérieures à 50% de la déviation maximale. Le seuil de 60% en flexion-extension a été choisi d'après les études de Armstrong (1986), Punnett et Keyserling (1987) et Stetson et al. (1991). Alors que Armstrong ne fait que proposer cette valeur pour le mouvement en flexion/extension, Punnett et Keyserling ont défini les amplitudes supérieures à 45° comme étant sévères. Cette limite rapportée aux valeurs maximales, citées par

Hoppenfeld et Hutton (1984), de 80° et 70° respectivement en flexion et en extension, vaut 60% en moyenne.

- *Pour la répétitivité:*

- le nombre de changements d'état par unité de temps (min)
 - pour l'axe de déviation radio-cubitale (rD)
 - pour l'axe de flexion-extension (rF)
 - pour la force (rEMG)
 - pour les deux axes combinés (radio-cubital ou flexion-extension, rANG)
 - pour ces deux axes et la force (rTOT).

Le changement d'état peut avoir lieu en angulation comme en force. Il correspond au passage d'une angulation extrême, c.à.d. supérieure aux limites décrites ci-dessus, à une angulation plus neutre ou vice versa, ou au passage d'une activité musculaire inférieure à 15% de l'EMGmax à un signal EMG supérieur ou vice versa.

- un indice rINRS a également été calculé par le nombre de changements de direction dans le seul plan de flexion-extension par minute. Cette définition de la répétitivité en termes d'inversions de mouvements a été proposée par Aptel (1993). Afin d'exclure la prise en compte de micro-mouvements assimilables à un tremblement, l'auteur a proposé de ne prendre en compte que les déplacements articulaires excédant 5 degrés.

- *Pour la vitesse:*

- la vitesse moyenne du mouvement pour les axes de mouvement en déviation radio-cubitale (mVD) et en flexion-extension (mVF);
- le pourcentage de temps (pVD et pVF) pendant lequel la vitesse du mouvement dépasse un seuil préétabli pour chacun des deux axes. Les seuils ont été calculés sur base de l'étude menée par Marras et Schoenmarklin (1991), qui compare les vitesses maximales de mouvement, dans les deux axes, chez des travailleurs occupant des postes à hautes et faibles prévalences de SCC. Une valeur intermédiaire a déterminé le premier seuil de discrimination entre ces postes: ce seuil a été fixé à 90°/s pour la vitesse en déviation radio-cubitale et à 150°/s pour la vitesse en flexion-extension. Les seuils adoptés pour affiner la discrimination ont été de 30°/s et 50°/s, respectivement dans les deux axes de mouvement.

C. L'exposition réelle aux vibrations

Les premiers enregistrements sur les machines vibrantes ont été réalisés lors de simulations et pendant des périodes n'excédant pas deux minutes. Ces enregistrements ont permis de déterminer:

- les fréquences fondamentales et secondaires des vibrations
- les amplitudes de vibrations en linéaire et en pondéré
- l'axe prépondérant.

La recherche d'une causalité éventuelle entre vibrations et troubles neurologiques impose de connaître l'exposition réelle des travailleurs en termes d'accélération équivalente de vibrations et de durée. Nous avons, dans ce but, réalisé des enregistrements en continu des vibrations au moyen du datalogger Polylog, pendant une période représentative de travail.

Les travailleurs ont été invités à porter un adaptateur entre les 3ème et 4ème doigts et dans la paume de la main, en contact direct avec la machine vibrante. L'accéléromètre monoaxial (Bruël & Kjaer 4384) a été directement vissé sur la partie supérieure de l'adaptateur, dans la direction de l'axe dominant prédéterminé. Cet accéléromètre a été relié au sonomètre Bruël & Kjaer 2513 dont la sortie, proportionnelle à la valeur efficace d'accélération, a été enregistrée sur le 8ème canal du datalogger Polylog. Ces deux appareils ont été portés sur le dos par les travailleurs au moyen du harnais. Les enregistrements ont été réalisés sans pondération fréquentielle (ISO 5349).

Un facteur de correction (déterminé à partir des enregistrements antérieurs) a permis d'estimer les valeurs pondérées correspondantes pour chaque machine vibrante.

Le second canal du Polylog - enregistrant la tension de la pile - a été utilisé de plus pour marquer le début et la fin d'événements tels que l'utilisation de telle machine, repos, ...

La fréquence d'échantillonnage du Polylog a été de 10 points par seconde et les signaux ont été enregistrés sur la carte mémoire pour être transférés sur l'ordinateur comme décrit précédemment.

L'analyse ultérieure a permis de déterminer:

- les accélérations équivalentes pendant le travail avec les différentes machines;

- l'accélération équivalente pondérée par travailleur pendant une phase de travail représentative;
- le temps d'utilisation de chaque machine vibrante;
- la durée totale d'exposition aux vibrations.

IV. LES POSTES DE TRAVAIL

A. L'industrie automobile

Les travailleurs sélectionnés proviennent du secteur de la tôlerie. Les uns assemblent la voiture (les "boulonneurs") et les autres corrigent les imperfections de la carrosserie (les "ponceurs").

1. Les boulonneurs (poste 1)

Le châssis de la voiture arrive au début de la ligne où les opérations suivantes sont réalisées:

- placement des portières arrière (serrage de 6 boulons);
- réglage manuel de ces portières;
- placement des portières avant (serrage de 6 boulons);
- réglage manuel de ces portières;
- placement des ailes avant (8 boulons);
- fixation de ces ailes (10 boulons);
- placement du capot avant (2 boulons);
- placement du haillon arrière;
- fixation du haillon arrière (2 boulons).

Le temps de cycle est de l'ordre de 2 minutes. Quelque 220 voitures sont assemblées par équipe et par jour. L'assemblage requiert donc le serrage de 34 boulons au moyen de 4 boulonneuses différentes.

Les travailleurs sont polyvalents et changent d'opération toutes les heures. Ils travaillent en 2 horaires: 6 h 00 - 14 h 00 et 14 h 00 - 22 h 00. Chaque horaire comprend une pause pour les repas (20 minutes) et deux arrêts (de 10 et 15 minutes) à prendre à la convenance du travailleur. Les moyens de protection utilisés sont des gants, des souliers renforcés et, pour certains, des lunettes et bouchons d'oreilles.

2. Les ponceurs (poste 2)

Les opérations sont les suivantes:

- frotter l'ensemble de la carrosserie avec une loque en coton, afin d'enlever ce qu'il reste d'huile, de graisse, de poussières, etc...;
- frotter la moitié supérieure de la voiture avec un gant assez fin afin de repérer les aspérités et défauts de la carrosserie;
- corriger ces défauts avec une ponceuse ou, si nécessaire, avec une meuleuse;
- ces deux dernières opérations sont réalisées ensuite pour la partie inférieure de la voiture. Afin de faciliter le travail, le plancher où circulent les travailleurs est abaissé par rapport à la ligne où transitent les voitures.
- fixer des crochets au niveau du capot avant, des portières et du haillon arrière afin de les maintenir entrouverts. La voiture est alors prête pour passer sur la ligne de peinture.

La ligne est en fonctionnement continu, à vitesse très faible, contrairement au poste de boulonnage où la voiture est à l'arrêt pendant le travail et ne se déplace que lorsqu'un bouton de "libération" du véhicule est enclenché.

Les caractéristiques quant aux horaires et pauses sont les mêmes que pour le poste de boulonnage.

Les moyens de protection utilisés sont des gants, des souliers de sécurité, des lunettes et pour certains des bouchons d'oreilles.

B. Les carrières

L'étude a été menée dans trois carrières.

Carrière A	4 rocteurs de fond, 2 rocteurs travaillant en surface et 1 tailleur de pierre
Carrière B	6 tailleurs de pierre
Carrière C	1 rocteur de surface et 3 tailleurs de pierre.

Les rocteurs de fond (poste 3) travaillent dans la masse du rocher, dans le fond de la carrière.

La roche a été coupée dans le sens de la longueur au moyen d'une machine automatique. Le rocteur travaille perpendiculairement à cette découpe afin de séparer un bloc de pierre. Le travail s'effectue en deux étapes:

- forage d'une série de trous, les uns à côté des autres, sur la partie supérieure du rocher au moyen d'un pistolet perforateur;
- écartement, pour fendre la roche, grâce à un frappeur. Le travailleur place deux écarteurs dans le trou préalablement foré. Il place ensuite le frappeur pneumatique entre les écarteurs et, par coups successifs, sépare le bloc de pierre. Ce bloc sera ramené en surface par des ponts-grues ou des camions chargeurs.

Les rocteurs de buffet (poste 3) travaillent à la surface des carrières. Le travail comprend à nouveau deux opérations:

- forage de trous au moyen d'un perforateur pneumatique;
- frappe à la masse pour fendre la roche.

Le tailleur de pierre (poste 4) travaille dans un hangar contrairement aux rocteurs qui travaillent à l'extérieur.

Il s'occupe de la dernière phase avant livraison, c.à.d. de la finition, qui comprend le polissage, la réalisation des arrondis, les cisaillements.

Les tailleurs de pierre utilisent plusieurs disqueuses, meuleuses et polisseuses.

C. La construction (poste 5)

Quatre personnes ont participé à l'étude la première année et donc uniquement à l'étude transversale. Elles n'ont pas été revues la seconde année, parce que les travaux réalisés étaient très variables et fonction des conditions extérieures du chantier.

Le temps d'utilisation d'outils vibrants (essentiellement le marteau-piqueur) est de 25% du temps de travail total. Les travailleurs réalisent des fouilles blindées.

D. Travaux de menuiserie (poste 6)

Neuf hommes ont accepté de participer à l'étude. Leur rôle est de réparer une palette endommagée en remplaçant les lattes en bois abîmées.

Chaque poste de travail comprend une ligne d'arrivée des palettes, une table de travail, un établi avec l'ensemble des machines vibrantes et autres outils et un container pour les débris.

Cinq machines sont utilisées:

- une scie pneumatique;
- une foreuse électrique (forage et fraisage);
- une visseuse électrique;
- une cloueuse pneumatique;
- une boulonneuse pneumatique.

Les hommes travaillent de 7 h à 15 h 30, avec un arrêt de 9 h à 9 h 20 et une pause-repas entre 12 h et 12 h 30. Le rythme est plus ou moins imposé et le nombre de palettes réparées par jour varie de 24 à 27.

E. Entreprises métalliques

Deux entreprises sont concernées: l'une s'occupe de la confection complète de sièges destinés aux transports en commun (bus, tram, métro, ...), la deuxième prépare des armatures métalliques pour les wagons de chemins de fer.

1. Les sièges (poste 7)

Les travailleurs meulent puis poncent les armatures métalliques des sièges, ainsi que les accessoires tels que cendriers, tablettes rabattables, ... Ils utilisent chacun une petite meuleuse et une ponceuse pneumatiques.

Quatre aires de travail sont prévues à cet effet. Les ouvriers travaillent à leur rythme, habituellement en horaire de jour. Lorsque les commandes sont importantes, cependant, ils travaillent en deux postes (matin et après-midi). Deux arrêts de 20 minutes et de 5 minutes pour les repas sont prévus.

Les moyens de protection utilisés sont des souliers de sécurité, des gants, des lunettes et, pour certains, des bouchons d'oreilles.

2. Les wagons (poste 8)

Quatre travailleurs sont occupés, à temps plein, au chanfrainage de pièces destinées à l'assemblage des wagons.

Trois aires de travail sont aménagées à cet effet. Les travailleurs utilisent essentiellement une grosse meuleuse et se chargent de la manutention des pièces. Ils travaillent en 2 postes (matin et après-midi). Un arrêt de 20 minutes est prévu pour les repas. Ils travaillent impérativement avec tous les moyens de protection, à savoir: souliers, gants, lunettes, bouchons d'oreilles, cagoule, masque, visière,

F. La canonnerie (poste 9)

Sept personnes occupées au polissage de l'intérieur de canons de fusils ont été étudiées.

Elles ont d'abord à limer le bord, réaliser une « faillure » et un « drageoir » à l'intérieur du canon et ensuite le polir avec 2 calibres d'aiguilles différentes. Des vibrations sont transmises au canon que tient le travailleur. Les dernières opérations consistent à vérifier le calibre et l'état du canon .

Les travailleurs traitent 37 à 44 canons par jour. Ils travaillent en 2 horaires (matin et après-midi). Deux arrêts sont prévus pour les repas (20 et 10 minutes).

G. Entreprise sidérurgique (GR2 et GR3)

1. Groupe 2 (GR2): travaux lourds et répétitifs (poste 10). Ce groupe comprend des emballeurs et des monteurs de tête

La tâche d'emballage de bobines ou de tôles implique la manipulation et l'agencement de divers feuillets de papier, longerons ou autres pièces de bois, cornières et plaques métalliques. La constitution finale du colis comporte le plus souvent des opérations de cerclage métallique.

La tâche de montage de tête de refendage consiste à enfiler deux séries de bagues sur deux axes horizontaux et superposés. Ces bagues sont des lames ou couteaux séparés par un nombre d'entretoises déterminé par le type de découpe à effectuer.

2. Groupe 3 (GR3): travaux légers (poste 11)

Le troisième groupe sélectionné a inclus des travailleurs occupant diverses fonctions réputées a priori non contraignantes pour les poignets: laborantins, réceptionnistes, magasiniers, vérificateurs, opérateurs en cabine, électriciens, etc... Ces travailleurs proviennent de divers secteurs de la même entreprise sidérurgique et ont été sélectionnés suivant des critères tels qu'ils soient appariés en âge, poids, taille et ancienneté à ceux du GR2.

Population

Comme dit précédemment, les analyses de poste ont été échelonnées sur les deux années de l'étude prospective. Au moment de ces analyses, certaines personnes avaient quitté le poste de travail voire l'entreprise, ou encore étaient absentes ou indisponibles. Ainsi, l'effectif ayant participé aux études de poste a été de 127 dont 55 exposées aux vibrations (GR1), 39 aux travaux lourds (GR2) et 33 du groupe contrôle 3 (GR3).

Les moyennes d'âge, de poids et de taille valent respectivement $36,2 \pm 6,7$ ans, $78,0 \pm 12,8$ kg; $173,7 \pm 7,0$ cm et ne sont pas statistiquement différentes des moyennes générales pour l'ensemble des travailleurs (Chapitre 5: Etude transversale). Lors de "l'équipement" des sujets, ceux-ci ont été soumis à un test afin de déterminer à droite et à gauche la force maximale volontaire (FMV) et le signal EMG de surface correspondant. Le tableau 3.1 reprend les résultats, par groupe et globalement, de ces efforts maximaux ainsi que les angles maximaux mesurés avant l'enregistrement au poste de travail.

TableAU 3.1 - ANGLES MAXIMAUX ET FORCES DE PREHENSION MAXIMALES

	GR1 vibrations	GR2 travaux lourds	GR3 contrôles
Forces:			
FMV (kg)	50,0	47,2	46,2
Angles maximaux:			
déviaton cubitale (°)	33,3	31,7	32,7
déviaton radiale (°)	18,3	18,7	19,7
extension (°)	75,1	71,8	70,9
flexion (°)	56,8	60,5	63,3

En parallèle avec les mesurages de FMV, le signal électromyographique maximal a donc été relevé au cours de l'effort dynamométrique. Les données absolues du signal EMG_{max} ne sont pas présentées, puisqu'elles dépendent de nombreux facteurs physiologiques (type de fibres musculaires, muscles impliqués,...), techniques (placement des électrodes,...) et individuels (âge, sexe, poids,...). Néanmoins, l'EMG de surface sera utilisée en valeur relative car il reste le seul moyen pratique pour évaluer indirectement l'ampleur de la force mise en jeu pendant la réalisation du travail. La relation force-EMG étant peu précise, nous avons choisi d'interpréter les forces par l'intermédiaire de l'activité musculaire exprimée en pourcentage de l'EMG maximal.

Les angles maximaux sont similaires en moyenne aux valeurs relevées lors de l'examen fonctionnel des travailleurs (voir chapitre 5), puisque ces moyennes sont calculées à partir d'un sous-échantillon des trois groupes de travailleurs. Comme expliqué dans la méthodologie (chapitre 2), ces angles vont permettre d'exprimer les déviations angulaires enregistrées au poste de travail en pourcentage des déviations maximales de chaque travailleur.

II. CARACTERISTIQUES DES GESTES PROFESSIONNELS

A. Moyennes globales

Le tableau 3.2. reprend, pour l'ensemble des 127 analyses de poste, les moyennes et écarts types des paramètres caractérisant les postures angulaires, les efforts, les répétitivités et les vitesses, à droite et à gauche. Peu de différences sont observées entre les paramètres relevés des deux côtés et les contraintes biomécaniques peuvent donc être considérées comme étant symétriques. De légères différences statistiquement significatives sont toutefois relevées pour les moyennes des angles, pour le pourcentage du temps pendant lequel l'EMG est supérieur à 15% et pour les indices de répétitivité et de vitesse en flexion-extension. L'angle en flexion-extension est en moyenne 3° plus élevé à gauche, tandis que l'indice de répétitivité de l'INRS est supérieur de 8#/min du côté droit. Le pourcentage du temps pendant lequel l'EMG relatif est supérieur à 15% de

l'EMG_{max} est de 7% plus élevé à droite. Pour la suite de l'étude des contraintes, les calculs seront menés globalement pour les deux côtés et porteront donc sur 254 poignets.

B. Moyennes et coefficients de variation par groupe de travailleurs

1. Moyennes des paramètres

Les différences observées entre les 3 groupes de travailleurs (figure 3.1) pour les paramètres de l'analyse biomécanique au poste de travail sont, pour la plupart, statistiquement significatives à 0,1% et à 1% pour les autres.

Les paramètres sont systématiquement inférieurs pour le groupe contrôle, à l'exception de la moyenne de l'angle en déviation radio-cubitale.

Tableau 3.2 - MOYENNES (M) ET ECARTS TYPES (S) DES PARAMETRES DE CONTRAINTE BIOMECHANIQUE (SEPAREMENT POUR LES DEUX COTES ET GLOBALEMENT)

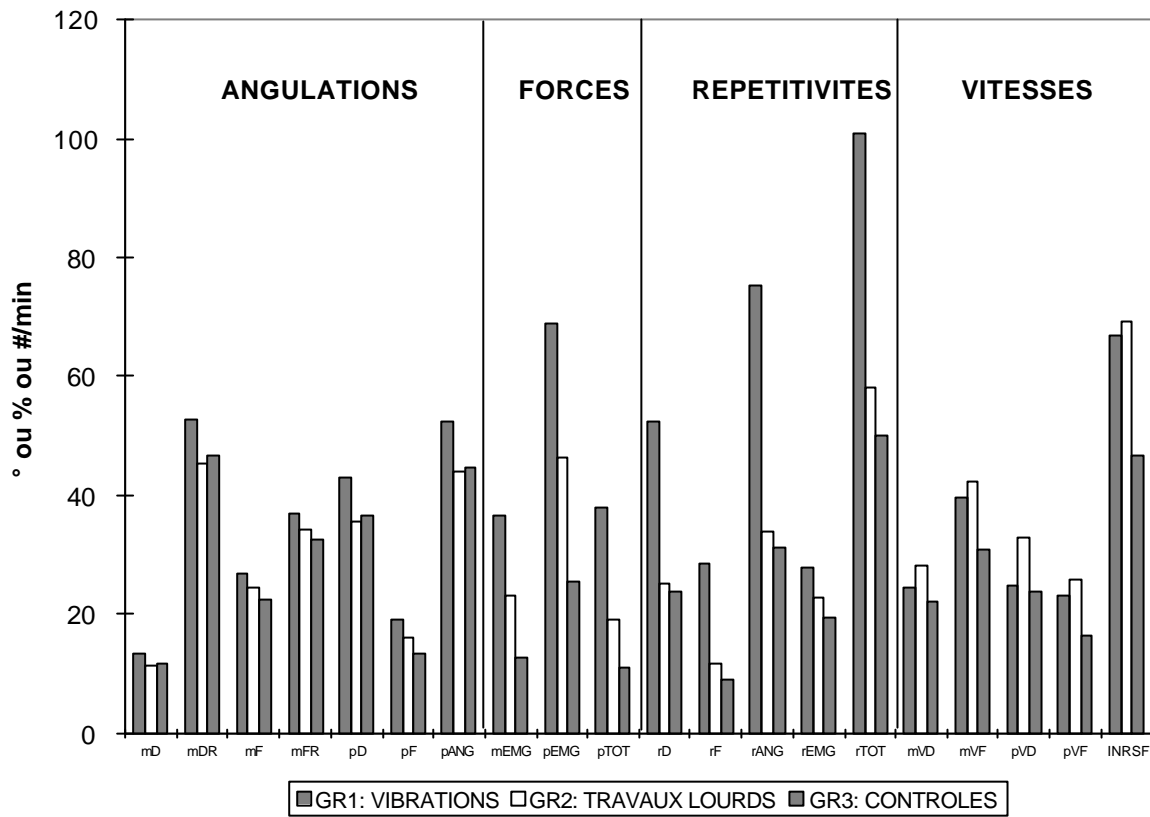
	COTE DROIT		COTE GAUCHE		Test T	GLOBAL	
	m	s	m	s		m	s
ANGLES							
mD (°)	12.4	4.3	12.1	3.4	-	12.2	3.8
mDr (%)	45.9	14.4	51.7	20.4	*	48.8	17.9
mF (°)	23.3	7.2	26.4	8.2	**	24.8	7.9
mFr (%)	33.9	10.2	35.9	10.5	-	35.0	10.4
pD (%)	36.9	16.6	41.0	16.6	-	39.0	16.7
pF (%)	15.8	12.3	17.4	12.2	-	16.6	12.3
pANG (%)	45.4	16.0	50.0	16.4	*	47.7	16.3
FORCES							
mEMGr (%)	27.9	17.6	24.9	17.4	-	27.2	17.6
pEMG (%)	54.2	26.7	47.4	25.4	*	52.1	26.2
pTOT (%)	25.8	17.3	24.6	18.1	-	25.2	17.7
REPETITIVITE							
rD (#/min)	36.8	24.9	36.2	22.5	-	36.5	23.7
rF (#/min)	18.8	16.3	17.6	15.3	*	18.2	15.8
rANG (#/min)	52.0	36.0	50.2	32.6	-	51.1	34.3
rEMG (#/min)	24.1	13.8	23.9	12.4	-	24.0	13.1
rTOT (#/min)	76.3	38.9	72.9	35.9	-	74.6	37.3
rINRS (#/min)	66.3	24.0	58.5	22.2	**	62.4	23.4
VITESSES							
mVD (°/s)	24.6	7.6	25.6	7.0	-	25.1	7.3
mVF (°/s)	40.0	12.3	36.3	10.2	*	38.1	11.4
pVD (%)	25.6	9.1	28.4	9.7	*	27.0	9.5
pVF (%)	23.5	8.5	21.2	7.4	*	22.3	8.0

* p < 0,05

** p < 0,01

ANGLES	moyenne absolue en déviation: mD (°) moyenne relative en déviation: mDr (%) moyenne absolue en flexion-extension: mF (°) moyenne relative en flexion-extension: mFr (%) % du temps en déviation extrême: pD (%) % du temps en flexion-extension extrême: pF (%) % du temps en angulations extrêmes: pANG (%)	REPETITIVITE	répétitivité en déviation radio-cubitale: rD (#/min) répétitivité en flexion- extension: rF (#/min) répétitivité angulaire: rANG (#/min) répétitivité en EMG: rEMG (#/min) répétitivité angulaire et en EMG: rTOT (#/min) répétitivité INRS en flexion- extension: rINRS (#/min)
FORCES	moyenne relative de l'EMG: mEMGr (%) % du temps EMG > 15% EMG _{max.} : pEMG (%) % du temps EMG > 15 % et angulations extrêmes: pTOT (%)	VITESSES	moyenne de la vitesse en déviation: mVD (°/s) moyenne de la vitesse en flexion-extension: mVF (°/s) % du temps vitesse en déviation > 30 °/s: pVD (%) % du temps vitesse en flexion-extension > 50 °/s: pVF (%)

FIGURE 3.1 - Comparaison des valeurs moyennes des paramètres de contrainte biomécanique entre les 3 groupes de travailleurs



Au contraire, le groupe des travailleurs exposés aux vibrations présente en moyenne les valeurs les plus élevées en termes d'angles, de force et de répétitivité angulaire.

Les valeurs moyennes pour le GR2 (travaux lourds et répétitifs) sont comprises entre celles des deux autres groupes, à l'exception des vitesses angulaires et de l'indice INRS qui sont plus élevés. Comme nous le verrons ci-après, ces paramètres donnent en fait strictement la même information mais exprimée en des unités différentes.

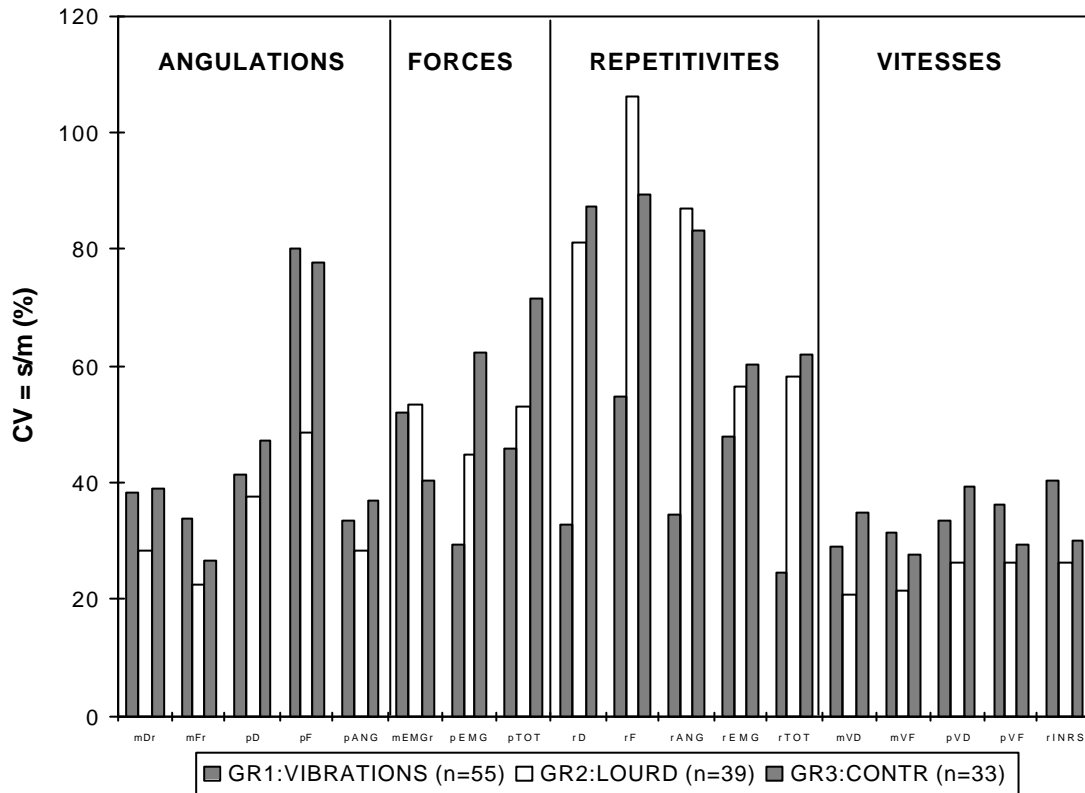
Les différences entre les trois groupes sont les plus marquantes en ce qui concerne la répétitivité en angles extrêmes (nettement supérieur pour le GR1 (vibrations)), et la force: moyenne de l'EMG relatif du groupe 1 supérieure de 14% par rapport au GR2 et de 24% par rapport au GR3. Ces différences se retrouvent logiquement majorées lorsque les deux axes de mouvement sont combinés, les répétitivités angulaire (rANG) et totale (rTOT = angles et EMG) du groupe 1 étant en moyenne pratiquement le double de celles des deux autres groupes.

En résumé, les travailleurs exposés aux vibrations sont ceux aussi qui rencontrent les contraintes biomécaniques au niveau des poignets les plus importantes, aussi bien en posture angulaire qu'en force et en répétitivité en angles extrêmes.

2. Coefficients de variation des paramètres

Le coefficient de variation (CV = écart type divisé par la moyenne, en %) permet d'une part d'exprimer la variabilité parmi les travailleurs de chacun des groupes et d'autre part de pouvoir comparer cette variabilité entre les différents paramètres sans tenir compte de leur unité (figure 3.2).

FIGURE 3.2 - Coefficients de variation des paramètres de contrainte biomécanique pour les 3 groupes de travailleurs



Les paramètres de répétitivité angulaire (rD et rF) donnent les différences inter-travailleurs les plus grandes (CV de 80 à 100 %) pour les groupes 2 (travaux lourds) et 3 (contrôle), tandis qu'ils sont nettement plus faibles (30 à 50%) pour le groupe 1 (vibrations).

En d'autres termes, la répétitivité angulaire est plus importante en moyenne chez les travailleurs exposés aux vibrations et varie moins entre sujets que dans les deux autres groupes.

Les contraintes biomécaniques sont en moyenne faibles pour le groupe contrôle, mais présentent une grande variabilité entre les travailleurs.

III. COMPARAISON DES PARAMETRES DE CONTRAINTE BIOMECHANIQUE

La matrice des coefficients de corrélation entre les paramètres de l'analyse de poste est reprise au tableau 3.3.

Le nombre d'observations étant égal à 127, le coefficient de corrélation (R) est significatif à 5% dès que supérieur à 0,1, et à 1% dès que supérieur à 0,2. Les coefficients supérieurs à 0,5 sont indiqués en gras.

TABLEAU 3.3 - COEFFICIENTS DE CORRELATION ENTRE PARAMETRES DE CONTRAINTE BIOMECANIQUE

	mDr	mFr	pD	pF	pANG	mEMGr	pEMG	pTOT	Rd	rF	rANG	rEMG	rTOT	mVD	mVF	pVD	pVF	rINRS
mDr (%)	1.00																	
mFr (%)	0.17	1.00																
pD (%)	0.93	0.17	1.00															
pF (%)	0.17	0.94	0.18	1.00														
pANG (%)	0.83	0.51	0.91	0.53	1.00													
mEMGr (%)	0.17	0.26	0.17	0.27	0.26	1.00												
pEMG (%)	0.14	0.20	0.14	0.21	0.22	0.87	1.00											
pTOT (%)	0.51	0.44	0.54	0.46	0.62	0.78	0.84	1.00										
rD (#/min)	0.05	0.14	0.08	0.10	0.11	0.37	0.44	0.43	1.00									
rF (#/min)	0.07	0.44	0.07	0.37	0.22	0.41	0.48	0.51	0.80	1.00								
rANG (#/min)	0.06	0.25	0.08	0.20	0.15	0.39	0.47	0.48	0.97	0.91	1.00							
rEMG (#/min)	-0.01	0.05	0.00	0.09	0.02	-0.06	0.19	0.20	0.35	0.27	0.34	1.00						
rTOT (#/min)	0.07	0.25	0.09	0.23	0.17	0.35	0.50	0.50	0.93	0.87	0.95	0.60	1.00					
mVD (°/s)	-0.01	0.14	-0.01	0.10	0.06	0.27	0.26	0.14	0.23	0.24	0.23	-0.07	0.21	1.00				
mVF (°/s)	-0.08	0.11	-0.07	0.07	-0.01	0.39	0.41	0.24	0.33	0.44	0.37	-0.04	0.35	0.77	1.00			
pVD (%)	-0.06	0.02	-0.07	-0.01	-0.04	0.16	0.15	-0.04	0.03	0.07	0.03	-0.20	-0.01	0.93	0.73	1.00		
pVF (%)	-0.10	0.04	-0.11	0.00	-0.07	0.39	0.43	0.22	0.37	0.44	0.41	0.00	0.38	0.75	0.96	0.72	1.00	
rINRS (#/min)	-0.07	0.12	-0.06	0.09	0.00	0.43	0.45	0.29	0.45	0.50	0.48	0.04	0.46	0.72	0.93	0.65	0.95	1.00

Les R les plus élevés (0,8; 0,9) étaient attendus, puisqu'ils concernent, d'une part, les relations entre moyennes et pourcentages du temps aussi bien en angles, en EMG et en vitesse, et, d'autre part, les relations entre les indices composites des angles ou des angles et l'EMG avec leurs composantes.

Plus intéressante à noter est la relation ($R = 0,8$) entre la répétitivité en déviation extrême et celle en flexion-extension extrême, suggérant que lorsque des mouvements importants sont effectués avec les poignets, ceux-ci ont généralement lieu dans les deux axes. Cela se vérifie également entre les vitesses angulaires ($R = 0,8$).

L'indice INRSF, qui, pour rappel, est le nombre de changements de direction (de plus de 5°) par minute, est très fortement corrélé à la vitesse angulaire en flexion-extension (R pratiquement égal à 1): ces deux paramètres reflètent donc la même information, mais en d'autres unités.

IV. COMPARAISON DES CONTRAINTES BIOMECHANIQUES AUX DIFFERENTS POSTES DE TRAVAIL AVEC EXPOSITION AUX VIBRATIONS

La figure 3.3 compare les paramètres de contrainte biomécanique relevés aux postes de travail avec vibrations. Pour plus de clarté, les moyennes obtenues pour chacun des postes sont cumulées.

Les analyses de variance (non rapportées) entre les différents paramètres et les postes de travail montrent l'existence de différences très significatives ($p < 0,1\%$) pour tous les paramètres.

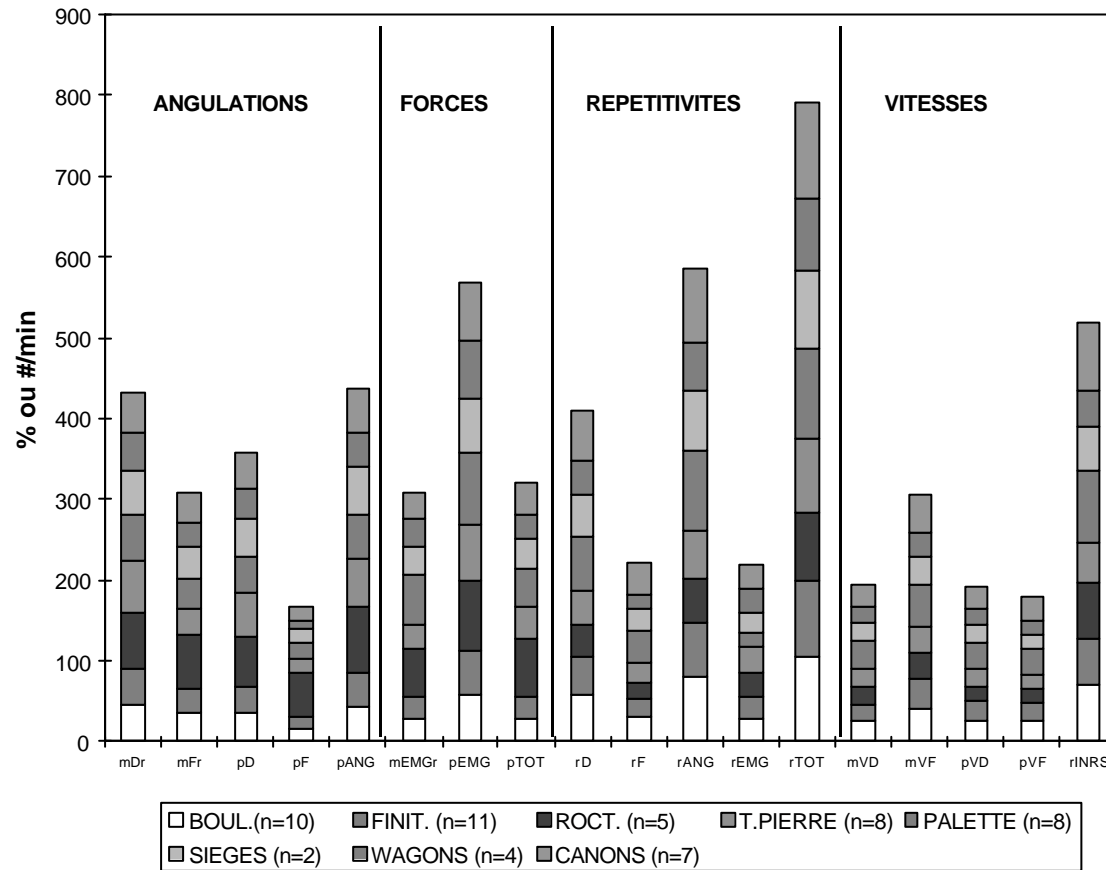
Les rocteurs (poste n° 3) ont les moyennes d'angles et d'EMG les plus élevées, tandis que les moyennes de répétitivité et de vitesses ne sont pas différentes. L'angle moyen relatif en flexion-extension (mFr) est en moyenne 20 à 30% supérieur à celui des autres postes et l'EMG moyen relatif (mEMGr) est, lui aussi, 25 à 35% supérieur aux autres postes (à l'exception du poste de réfection des palettes).

Ce dernier poste (poste n° 6) présente en moyenne une force (mEMGr) identique à celui des rocteurs mais des vitesses angulaires (mVD et mVF) nettement plus élevées (5 à $15^\circ/s$) et des répétitivités angulaires (rD et rF) plus importantes de 5 à 10 #/min.

Le poste de la canonnerie (poste n° 9) se distingue aussi quelque peu des autres en termes de répétitivité et de vitesse mais moins nettement que le poste de réfection de palette.

Les contraintes biomécaniques sont, en moyenne, très semblables aux autres postes de travail.

FIGURE 3.3 - COMPARAISON DES PARAMETRES DE CONTRAINTES BIOMECHANIQUES ENTRE LES POSTES DE TRAVAIL AVEC EXPOSITION AUX VIBRATIONS (GRAPHE CUMULE DES MOYENNES)



V. PERCEPTION DES EFFORTS ET DE LA PENIBILITE PAR LES TRAVAILLEURS

Après chaque analyse de poste, il était demandé au travailleur de juger les efforts réalisés ce jour aux différentes régions du corps (nuque, épaules, coudes, poignets et bas du dos) en indiquant s'ils étaient nuls, légers, moyens ou lourds. La pénibilité physique et mentale a également été jugée sur une échelle de 0 (rien) à 10 (extrême) avec les qualificatifs "très faible⁽¹⁾, faible⁽²⁾, modéré⁽³⁾, dur⁽⁵⁾ et très dur⁽⁷⁾" indiqués sur l'échelle.

Analyse des efforts perçus

Les jugements des efforts pour les différents segments corporels du membre supérieur sont très hautement liés entre eux (Chi²; p < 0,001) et particulièrement les efforts jugés à droite et à gauche.

Un avis moyen a dès lors été calculé au niveau du membre supérieur, en moyennant les avis portés à droite et à gauche et pour les épaules, les coudes et les poignets. De manière à faciliter la présentation des résultats et leur interprétation, le jugement des efforts a été dichotomisé en nuls ou légers et en moyens ou lourds.

Le tableau 3.4 reprend, pour chacun des 3 groupes, les pourcentages de travailleurs jugeant leurs efforts comme étant moyens ou lourds le jour de l'analyse de poste.

TABLEAU 3.4 - Pourcentages de travailleurs jugeant leurs efforts comme étant moyens ou lourds le jour de l'analyse de poste

Groupes	Efforts moyens ou lourds (% des travailleurs)			
	Nuque	Membre supérieur	Bas du dos	Poignets
GR1: vibrations (n = 53)	47,2	67,9	77,4	86,8
GR2: travaux lourds et répétitifs (n = 39)	23,1	38,5	71,8	64,1
GR3: contrôle (n = 33)	9,1	15,2	33,3	36,4

Les pourcentages obtenus montrent des différences importantes entre les 3 groupes (test Chi², p < 0,001). Si on ne compare que les groupes 1 et 2, les différences sont toujours significatives (Chi², p < 0,05), sauf pour les efforts au niveau du bas du dos. Près de 90 % des travailleurs estiment réaliser des efforts moyens ou lourds au niveau des poignets du fait de l'utilisation de machines vibrantes, alors qu'ils sont près de 65 % dans le groupe 2 et 36% dans le groupe 3.

B. Pénibilité physique et mentale

Les opinions concernant la pénibilité physique sont statistiquement différentes (p < 0,001) entre les 3 groupes de travailleurs, la moyenne étant plus élevée pour le groupe 1 (m = 5,1) que pour le groupe 2 (m = 3,8) et le groupe 3 (m = 2,3). En ce qui concerne la pénibilité mentale, le groupe 1 (m = 5,5) se distingue des deux autres (GR2: m = 3,8 et GR3: m = 4,5) qui ne sont pas différents. La corrélation entre les deux pénibilités éprouvées le jour de l'analyse de poste, bien que significative (p < 0,001), est faible (R = 0,4).

C. RELATION AVEC LES PARAMETRES DE CONTRAINTE BIOMECHANIQUE

Pour tous les paramètres de contrainte biomécanique, les tests non paires sont tous très significatifs (p < 0,001) entre travailleurs percevant leurs efforts au niveau des poignets comme étant nuls ou légers et ceux les trouvant moyens ou lourds. Les moyennes sont toutes plus élevées dans le second cas.

Il serait redondant de présenter ces valeurs puisque les efforts perçus au niveau des poignets correspondent à la répartition des travailleurs dans les 3 groupes (voir tableau 3.4) et que les différences entre les 3 groupes ont déjà été présentées.

La corrélation entre les différents paramètres et la pénibilité mentale est pratiquement inexistante (R < 0,2).

Par contre la pénibilité physique présente des corrélations plus importantes (R de 0,2 à 0,6) avec notamment la force en termes de moyenne (mEMGr, R = 0,5) et de pourcentage de temps au-delà de 15% EMG_{max} (pEMG, R = 0,6); et avec la répétitivité angulaire, aussi bien en déviation qu'en flexion-extension (rD et rF, R = 0,4). Le jugement des travailleurs quant à leur pénibilité physique repose donc en partie sur les forces à exercer et leur durée, ainsi que sur la répétitivité des gestes en angulations extrêmes.

Description des machines vibrantes

L'objectif du présent travail est d'étudier la relation entre les problèmes liés à l'utilisation des machines vibrantes et les facteurs individuels, ergonomiques et les caractéristiques d'exposition. L'aspect prévention des vibrations ne sera dès lors pas abordé dans cet ouvrage. Des recommandations pour prévenir les risques liés à l'exposition à des machines vibrantes, adaptées au type de machine (meuleuse, tronçonneuse,...), existent et ont fait l'objet d'une publication de l'Unité Hygiène et Physiologie du Travail (1998).

Nous nous bornerons donc dans le cadre de cette étude à décrire, pour chacun des postes de travail, les principales caractéristiques techniques des machines employées, leur utilisation et leur durée d'utilisation.

Pour faciliter la présentation des résultats des mesurages de vibrations, un code a été attribué à chaque machine, code qui reprend le numéro du poste et une lettre pour identifier la machine.

A. Poste 1: Les boulonneurs (secteur automobile)

En fonction de la position (capot avant, portière, aile,...) et de la taille de la vis ou du boulon à serrer, 2 boulonneuses et 2 visseuses sont utilisées, toutes pneumatiques et tenues avec une seule main. Le tableau 4.1 en donne les caractéristiques.

TABLEAU 4.1 - Machines vibrantes du poste 1 (Boulonneurs)

Code	Machines vibrantes	Description	Capacité (mm)	Couple (Nm)	Vitesse à vide (rpm)	Poids (kg)	Longueur (mm)
1A	LTV 26 (Atlas Copco)	visseuse pneumatique droite à renvoi d'angle	M5	3 à 8	900	1,2	325
1B	DGD 50 (?)	boulonneuse pneumatique	-	-	-	1,0	150
1C	LUF 33 (Atlas Copco)	visseuse pneumatique à calage (forme pistolet)	M6-M8	8 à 18	400	1,2	224
1D	EP8PT (Atlas Copco)	boulonneuse pneumatique (forme pistolet)	M8	20 à 35	9000	1,0	154

Sur base du nombre moyen de voitures assemblées par jour, du nombre de vis et de boulons à placer par voiture et de la rotation des travailleurs lors de l'assemblage des différents éléments (capot, porte, aile,...), la durée d'utilisation des machines peut être estimée entre 2 et 5h par semaine, soit entre 30 et 60 minutes par jour.

Poste 2: Les ponçeurs (secteur automobile) - finition

La correction des défauts détectés sur la carrosserie se fait le plus souvent au moyen d'une ponçeuse verticale ou orbitale. Plus rarement, lorsque les défauts sont plus conséquents, l'emploi d'une meuleuse électrique s'avère nécessaire (tableau 4.2).

TABLEAU 4.2 - Machines vibrantes du poste 2 (Ponçeurs)

Code	Machines vibrantes	Description	Puissance (kw)	Vitesse à vide (rpm)	Poids (kg)	Longueur (mm)	Taille du disque ou patin (mm)
2A	LST 30 (Atlas Copco)	ponçeuse orbitale pneumatique	0,3	10 000	1,2	255	110
2B	LSV 26S (Atlas)	meuleuse	0,5	6 000	1,4	260	180

	Copco)	d'angle pneumatique (ponçage et polissage)					
2C	BOSCH Type 2304	meuleuse d'angle électrique	1,0	5 700	4,0	360	180

Sur base du nombre moyen de voitures produites par jour et en adoptant un temps de ponçage moyen par voiture de 10 à 15 secondes, la durée d'utilisation des ponceuses peut être estimée entre 40 et 60 minutes par jour.

C. Poste 3: Les rocteurs de fond et de surface (carrières A et C)

Deux machines sont nécessaires aux rocteurs de fond, un marteau perforateur pour le forage des trous dans le rocher et un frappeur pour fendre la roche, tandis que les rocteurs de surface utilisent un perforateur pneumatique.

- *Marteau perforateur* (rocteurs de fond et de surface)
 - carrière A
 - **Code 3A:** Atlas Copco RH 571, de classe "mi-lourd", conçu pour le forage en gradin, pneumatique et avec une poignée en "T". Le poids est de 17,8 kg, la longueur (sans l'outil) de 510 mm, la fréquence de percussion de 35 Hz, la vitesse de rotation de 190 rpm et la vitesse de pénétration de 295 mm/min.
 - carrière C
 - **Code 3B:** La référence et les caractéristiques techniques du marteau perforateur utilisé ne sont plus disponibles, mais elles doivent être similaires à celles du modèle RH 571.
 -
- *Frappeur* (rocteur de fond, carrière A), **code 3C**
Comme précédemment, les données techniques n'existent plus, mais cette machine est fort semblable au marteau perforateur, avec un poids sensiblement plus important (20 à 25 kg).

La durée d'exposition aux vibrations est importante pour les rocteurs de fond (70 à 80 % du temps), tandis que les rocteurs de surface n'utilisent pas de frappeur et fendent la roche à la masse. Leur durée d'exposition est donc inférieure et de l'ordre de 30 à 40 % du temps de travail.

D. Poste 4: Les tailleurs de pierre (3 carrières)

Les tailleurs de pierre utilisent principalement deux meuleuses électriques, une grande (diamètre 230 mm) et une petite (125 mm), et un compresseur AGEFLEX permettent le raccordement de meuleuses verticales de différentes dimensions et d'une machine pour la découpe de la pierre.

La durée d'exposition aux vibrations est difficile à évaluer, car elle dépend très fort du type de taille à réaliser. La taille de la pierre nécessite le travail au marteau et au burin. Une part importante de la tâche est toutefois accomplie avec une machine vibrante et la durée d'exposition journalière aux vibrations est estimée à 50-60% du temps de travail.

- **Code 4A,** Meuleuse d'angle électrique BOSCH GWS 23-230 (carrière C): poids: 4,8 kg, vitesse de rotation à vide: 6 500 rpm, puissance: 2,3 kW, diamètre des meules: 230 mm.
- **Code 4B,** Meuleuse d'angle électrique MAKITA 9609 HB (carrière C): poids: 4,6 kg, vitesse de rotation à vide: 6 200 rpm, puissance: 2 kW, diamètre des meules: 230 mm.
- **Code 4C,** Meuleuse d'angle électrique BOSCH GWS 10-125c (carrières B et C): poids: 1,8 kg, vitesse de rotation à vide: 11 000 rpm, puissance: 1 kW, diamètre des meules: 125 mm.

- **Code 4D**, Meuleuse d'angle électrique ATLAS COPCO WSCE 1300/125 (carrière A): poids: 1,9 kg, vitesse de rotation à vide: 11 000 rpm, puissance: 1,3 kW, diamètre des meules: 125 mm.
- **Code 4E**, AGEFLEX (carrières A, B et C): aucune des carrières n'a pu fournir les caractéristiques techniques des machines pneumatiques qui y sont raccordées. Leur poids peut varier de 2 kg (meuleuse horizontale) à 5 kg (grosse meuleuse verticale), voire plus pour les machines permettant des découpes.

E. Poste 5: Construction: pas d'analyse des vibrations.

F. Poste 6: Travaux de menuiserie - réfection des palettes

Cinq machines, dont trois sont pneumatiques (scie, cloueuse et boulonneuse) et deux sont électriques (foreuse et visseuse), sont utilisées lors de la réparation des palettes. La durée d'exposition peut être estimée entre 50 et 70 % du temps de cycle de réparation.

- *Machines pneumatiques:*
 - **code 6A**, scie CENGAR N° CL50/75: poids: 2,5 kg, longueur: 400 mm, vitesse de 0 à 1200 coups/min;
 - **code 6B**, cloueuse BOSTICH N55C: poids: 2,5 kg, longueur et hauteur: 270 mm, magasin de 300 à 350 clous;
 - **code 6C**, boulonneuse WURTH: pas de données disponibles, poids de l'ordre de 3 kg, longueur de 250 mm.
- *Machines électriques:*
 - foreuses (sans percussion car travail dans le bois): modèles différents selon les travailleurs mais de caractéristiques semblables:
 - **code 6D**, HITACHI D13VD, 220V: puissance: 620 W, poids: 2,1 kg, vitesse de 0 à 2500 rpm;
 - **code 6E**, METABO SBE 751, 220 V: puissance: 450 W, poids: 2,4 kg, vitesse de 0 à 2800 rpm;
 - **code 6F**, visseuse HITACHI W6VF, 220 V: puissance: 520 W, poids: 1,9 kg, vitesse de 0 à 1000 rpm, couple de serrage de 0 à 14 Nm.

G. Poste 7: Les sièges

Les travailleurs utilisent une petite meuleuse verticale et une ponceuse pneumatiques presque en permanence. La durée d'exposition peut être estimée à 80-90% du temps de travail, le reste étant nécessaire pour prendre et évacuer les pièces.

- **Code 7A**, Meuleuse: petite meuleuse verticale, surfaceuse SV27 (GRASS), vitesse à vide: 15000 rpm, longueur: 160 mm, diamètre du disque de papier: 100 mm, poids: 1 kg.
- **Code 7B**, Ponceuse orbitale LS030 (Atlas Copco): vitesse à vide: 8000 rpm, puissance: 0,3 kW, poids: 1,7 kg, longueur: 285 mm.

H. Poste 8: Les wagons

Les travailleurs utilisent principalement en permanence une meuleuse électrique (disqueuse) et accessoirement une plus petite. La durée d'exposition peut être estimée entre 80 et 90 % du temps de travail.

- **Code 8A**, Meuleuse d'angle électrique (disqueuse) FEIN MSPO 870C: poids: 7,5 kg, vitesse de rotation à vide: 6600 rpm, puissance: 3,3 kW, diamètre des meules: 230 mm, épaisseur: 7 mm,
- **Code 8B**, Petite meuleuse électrique FEIN MSR 842-2C: poids: 2,2 kg, vitesse de rotation: 7100 rpm, puissance: 0,5 kW, diamètre des meules: 125 mm, épaisseur: 6 mm.

I. Poste 9: La canonnerie

A ce poste, l'exposition aux vibrations n'est pas due au contact des mains avec une machine vibrante, mais bien au maintien du canon lorsque celui-ci est poli par les aiguilles (**code 9A**).

Les caractéristiques de la machine fixe faisant tourner les aiguilles sont: puissance: 1,5 kW, vitesse de rotation: 3 280 rpm, poids du canon: 1,5 kg, diamètre intérieur du canon: 13 mm, diamètre de l'outil: 11,5 mm.

Etant donné le nombre moyen de canons traités par jour (40 canons), la durée d'exposition journalière peut être estimée entre 15 et 25% du temps de travail total.

II. CARACTERISTIQUES VIBRATOIRES DES MACHINES VIBRANTES

A. SYNTHÈSE DES MESURAGES

Les caractéristiques techniques principales des 26 machines vibrantes répertoriées sont reprises au tableau 4.3: poste de travail où la machine est utilisée; code et nom de la machine vibrante; puissance, poids et vitesse. Ces 26 machines ont été classées en 6 catégories de machines vibrantes:

- Type 1: meuleuses, ponceuses, AGEFLEX;
- Type 2: boulonneuses;
- Type 3: foreuses (sans percussion), visseuses et fraiseuses;
- Type 4: scie;
- Type 5: cloueuse;
- Type 6: pistolets perforateurs et frappeurs.

Les caractéristiques vibratoires sont également présentées au tableau 4.3 pour la main droite et au tableau 4.4 pour la main gauche.

La main gauche n'a fait l'objet de mesurage que si le travailleur utilisait les deux mains pour tenir la machine. Le tableau 4.4 reprend par conséquent les machines pour lesquelles les deux membres supérieurs sont exposés aux vibrations. Deux exceptions à cela:

- bien que les machines à percussion soient tenues par les deux mains, peu de mesurages ont été réalisés à gauche étant donné la symétrie des poignées et par conséquent des vibrations générées comme l'ont confirmé les premières valeurs observées,
- les foreuses du poste de réfection des palettes et les meuleuses aux postes de finition (assemblage automobile) et de tailleurs de pierre ont fait l'objet de mesurages des deux côtés, bien que la majeure partie du temps ces machines soient tenues seulement de la main droite.

Pour toutes les machines vibrantes tournantes, l'axe dominant des vibrations correspond à l'axe de rotation (meuleuses, ponceuses, foreuses, visseuses, fraiseuses, boulonneuses). Pour la scie, la cloueuse et les pistolets perforateurs, cet axe correspond respectivement à l'axe de sciage, de clouage et de percussion. Dans la majorité des cas, les vibrations sont donc les plus importantes dans la direction du bras [axe Z, ISO 5349]. En gras sont reprises dans ces tableaux les valeurs dépassant le niveau plafond (5 ms^{-2}) de la proposition de directive européenne (93/C77/02) pour une machine utilisée 8 heures par jour.

En général, l'accélération équivalente pondérée (A_{eqw}) dans l'axe dominant est plus élevée à gauche ($11,9 \text{ ms}^{-2}$) qu'à droite ($8,1 \text{ ms}^{-2}$). Cette différence n'est cependant pas significative étant donné la variance observée entre les différentes machines.

La fréquence dominante (F_{maxw}) du spectre de fréquence en bandes fines (voir ci-dessous) de l'accélération pondérée correspond en général à la vitesse maximale à vide de rotation ou de percussion spécifiée. Les fréquences dominantes mesurées sont légèrement plus faibles, puisque mesurées en charge et dépendantes de l'état de la machine.

C. Tableau 4.3 - CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES ET VIBRATOIRES DES PRINCIPALES MACHINES VIBRANTES (MAIN DROITE)

POSTE	TITRE	CODE	MACHINE	PUISSANCE (Nm ou kW)	POIDS (kg)	VITESSE (rpm)	TYPE	Aeqw (ms ⁻²)	Fmaxw (Hz)	Aeq (ms ⁻²)
1	Boulonneurs	1A	LTV26	3 à 8 Nm	1.2	900	2	1.1	8	4.1
1	Boulonneurs	1B	DGD50		1		2	1.3	15	9.3
1	Boulonneurs	1C	LUF33	8 à 18 Nm	1.2	400	2	1.4	30	7.2
1	Boulonneurs	1D	EP8PT	20 à 35 Nm	1	9000	2	1.9	20	8.4
2	Finition	2A	LST30 110mm	0.3 kW	1.2	10000	1	3.7	115	21.4
2	Finition	2B	LSV26 180mm	0.5 kW	1.4	6000	1	1.3	90	14.5
2	Finition	2C	BOSCH 180mm	1.0 kW	4	5700	1	2.0	95	10.6
3	Rocteurs	3A	RH571		17.8	190	6	25.0	32	250.1
3	Rocteurs	3B	idem RH571		17.8	190	6	50.7	35	184.1
3	Rocteurs	3C	Frappeur		25	190	6	180.2	10	230.9
4	T. pierre	4A	BOSCH 230mm	2.3 kW	4.8	6500	1	13.6	93	53.4
4	T. pierre	4B	MAKITA	2.0 kW	4.6	6200	1	1.8	95	28.5
4	T. pierre	4C	BOSCH 125mm	1.0 kW	1.8	11000	1	4.5	139	49.2
4	T. pierre	4D	ATLAS COPCO 125mm	1.3 kW	1.9	11000	1	5.9	139	85.4
4	T. pierre	4E	AGEFLEX		5		1	7.6	38	59.7
6	Palettes	6A	Scie CENGAR		2.5		4	13.4	15	37.4
6	Palettes	6B	Cloueuse BOSTICH		2.5		5	10.0	5	60.3
6	Palettes	6C	Boulonneuse WURTH		3		2	10.7	18	66.4
6	Palettes	6D	Foreuse HITACHI	0.6 kW	2.1	2500	3	5.9	25	24.1
6	Palettes	6E	Foreuse METABO	0.5 kW	2.4	2800	3	14.1	33	45.6
6	Palettes	6F	Visseuse HITACHI	0.5 kW	1.9	1000	3	2.9	15	9.4
7	Sièges	7A	SV27 100mm		1	15000	1	3.8	191	40.8
7	Sièges	7B	Ponceuse LS030	0.3 kW	1.7	8000	1	10.3	110	56.1

8	Wagons	8A	FEIN 230mm	3.3 kW	7.5	6600	1	17.1	105	289.6
8	Wagons	8B	FEIN 125mm	0.5 kW	2.2	7100	1	3.9	105	53.1
9	Canons	9A	Polisseuse canon	1.5 kW	1.5	3280	1	2.9	55	7.8

TABLEAU 4.4 - Caractéristiques techniques et vibratoires des principales machines vibrantes (main gauche)

POSTE	TITRE	CODE	MACHINE	PUISSANCE (Nm ou kW)	POIDS (kg)	VITESSE (rpm)	TYPE	Aeqw (ms ⁻²)	Fmaxw (Hz)	Aeq (ms ⁻²)
2	Finition	2B	LSV26 180mm	0.5 kW	1.4	6000	1	3.5	90	28.2
2	Finition	2C	BOSCH 180mm	1.0 kW	4	5700	1	2.9	95	12.3
3	Rocteurs	3A	RH571		17.8	190	6	21.5	32	225.3
4	T. pierre	4A	BOSCH 230mm	2.3 kW	4.8	6500	1	7.7	90	51.1
4	T. pierre	4B	MAKITA	2.0 kW	4.6	6200	1	2.3	95	18.4
4	T. pierre	4C	BOSCH 125mm	1.0 kW	1.8	11000	1	19.5	143	130.5
4	T. pierre	4D	ATLAS COPCO 125mm	1.3 kW	1.9	11000	1	14.7	150	157.3
4	T. pierre	4E	AGEFLEX		5		1	17.4	90	120.2
6	Palettes	6D	Foreuse HITACHI	0.6 kW	2.1	2500	3	10.0	20	19.5
6	Palettes	6E	Foreuse METABO	0.5 kW	2.4	2800	3	29.5	35	62.4
8	Wagons	8A	FEIN 230mm	3.3 kW	7.5	6600	1	9.0	105	86.6
8	Wagons	8B	FEIN 125mm	0.5 kW	2.2	7100	1	11.0	105	81.3
9	Canons	9A	Polisseuse canon	1.5 kW	1.5	3280	1	5.4	55	15.0

La pondération fréquentielle (ISO 5349) atténuée considérablement (rapport de 2 à 10) les accélérations relevées sur les machines, comme le montrent les valeurs rapportées pour les accélérations équivalentes pondérées (A_{eqw}) et non pondérées (A_{eq}) (tableaux 4.3 et 4.4). L'emploi de cette pondération fréquentielle pour mettre en relation les caractéristiques vibratoires des machines et les troubles neurosensoriels étant très largement controversé, les analyses ultérieures seront menées en fonction des deux amplitudes.

Les moyennes de l'accélération équivalente pondérée (A_{eqw}) par type de machine sont, respectivement pour les meuleuses (1), les boulonneuses (2), les foreuses (3), la scie (4), la cloueuse (5) et les perforateurs (6), de 6,0, 3,3, 7,6, 13,4, 10,0 et 85,3 ms^{-2} . Seule la dernière valeur est statistiquement différente des autres ($p < 0,01$) étant donné la variance importante rencontrée pour chaque type de machine.

B. Analyses spectrales et temporelles des vibrations

Pour chacune des machines vibrantes, et éventuellement pour chaque côté, une analyse de fréquences en bandes fines (400 points) de l'accélération pondérée et non pondérée a été réalisée entre 0 et 1.000 Hz lors d'essais en simulation. En parallèle, l'évolution temporelle de l'accélération pondérée a également été analysée. Il serait fastidieux et inutile de présenter tous les résultats. Pour chacun des 6 types de machine, les analyses fréquentielles et temporelles sont commentées ci-dessous et illustrées par quelques exemples.

1. Meuleuses, ponceuses (type 1)

Il a été demandé au travailleur de meuler ou poncer une pièce métallique (déchet de production) durant 2 minutes. Les meuleuses et ponceuses présentent toutes un premier pic d'amplitude à une fréquence correspondant à la vitesse de rotation du disque (voir figures 4.1, 4.2 et 4.3 partie A). Si les machines avaient été évaluées à vide, c'est-à-dire sans contact avec le matériau, le spectre de fréquence ne compterait pratiquement que cette fréquence (fréquence fondamentale). Du fait du contact avec le matériau, le disque ralentit et des harmoniques de cette fréquence apparaissent. Étant donné leur puissance supérieure, le ralentissement est très faible pour les meuleuses électriques, mais les amplitudes des harmoniques sont élevées et même supérieures à l'amplitude de la fréquence fondamentale (figure 4.1A). Le contraire est observé chez les meuleuses ou ponceuses pneumatiques, avec un ralentissement important et des harmoniques d'amplitudes plus faibles (figures 4.2A et 4.3A).

Comme il le sera également montré par la suite pour les autres types de machine, la pondération fréquentielle masque de manière plus ou moins importante, selon le type de machine, les harmoniques de fréquences supérieures susceptibles de produire des troubles neurologiques. Le classement des machines en basses, moyennes ou hautes fréquences selon leur fréquence fondamentale pour leur associer respectivement un risque de troubles ostéo-articulaires, vasculaires ou neurologiques est dès lors simpliste et risque de sous-estimer les effets neurologiques associés aux harmoniques de la fréquence fondamentale.

Les évolutions au cours du temps de l'accélération pondérée (figures 4.1, 4.2 et 4.3 partie B) soulignent les variations rencontrées dans la tâche et attribuables dans le premier et le troisième cas à des forces de poussée différentes (figure 4.1B, 4.3B) respectivement pour meuler un chanfrein dans une pièce métallique et pour poncer une pierre. La variation observée dans le deuxième cas (figure 4.2B) est due à une répétition de ponçage de petites surfaces.

FIGURE 4.1 - Spectres de fréquences (A) de l'accélération non pondérée (linéaire) et pondérée et évolution au cours du temps de l'accélération pondérée (B): meuleuse électrique (type 1) - machine 8A

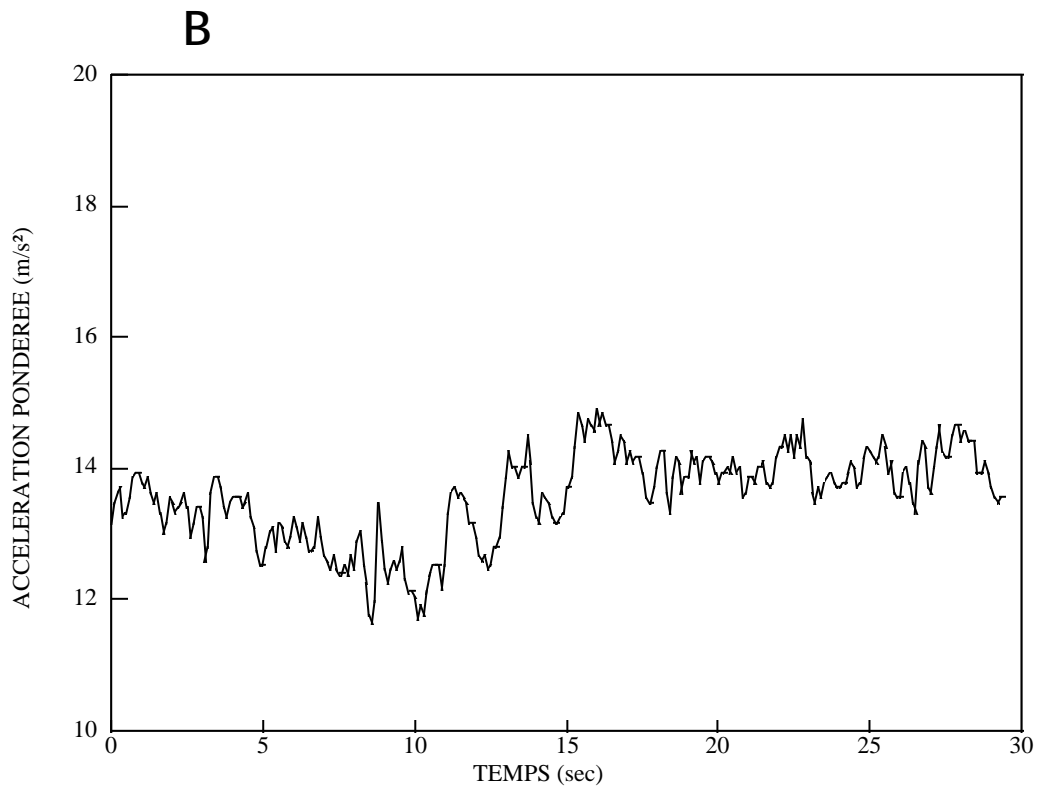
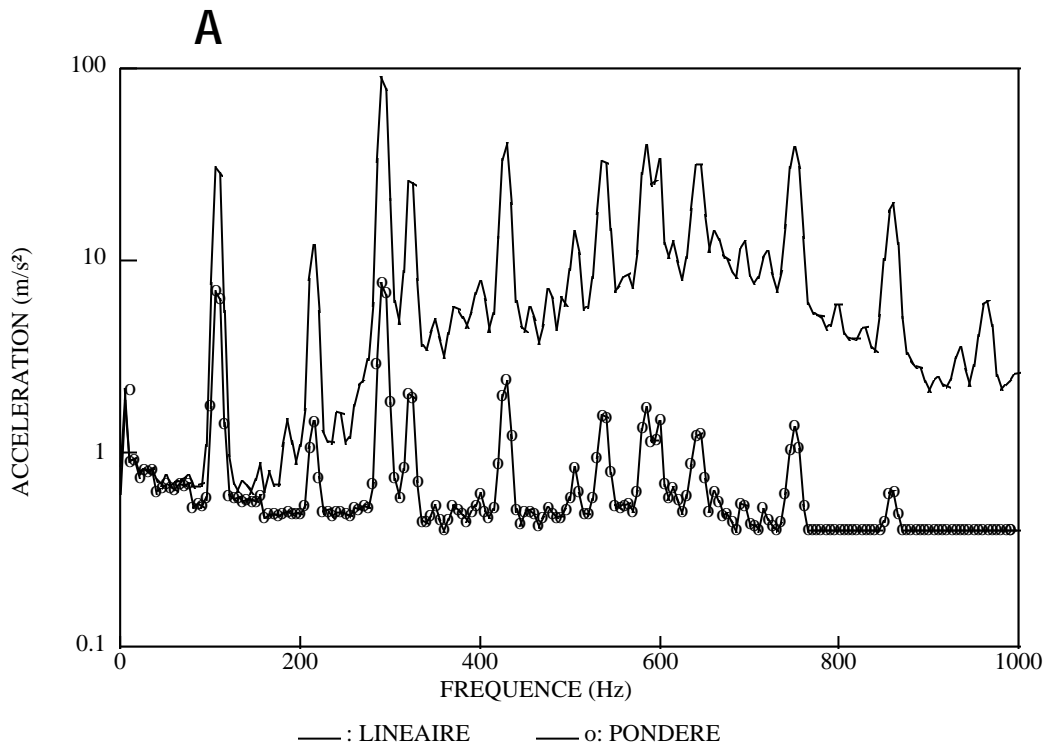


Figure 4.2 - SPECTRES DE FREQUENCES (A) DE L'ACCELERATION NON PONDEREE (LINEAIRE) ET PONDEREE ET EVOLUTION AU COURS DU TEMPS DE L'ACCELERATION PONDEREE (B): PONCEUSE PNEUMATIQUE (TYPE 1) - MACHINE 2B

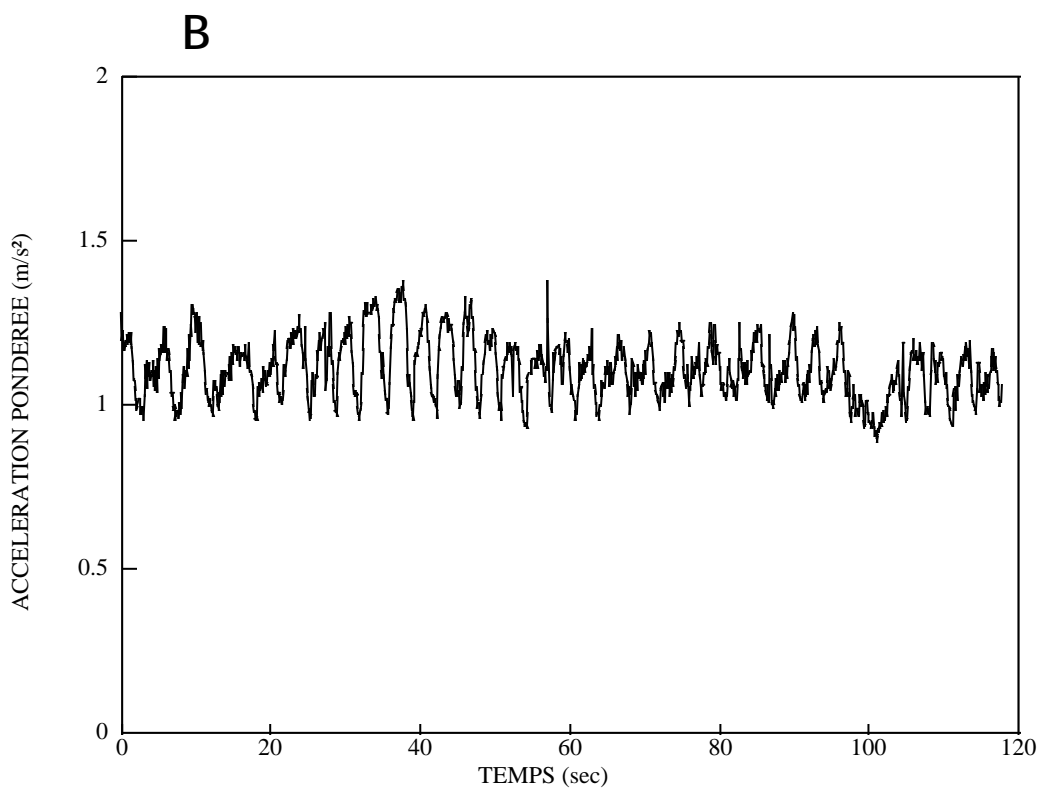
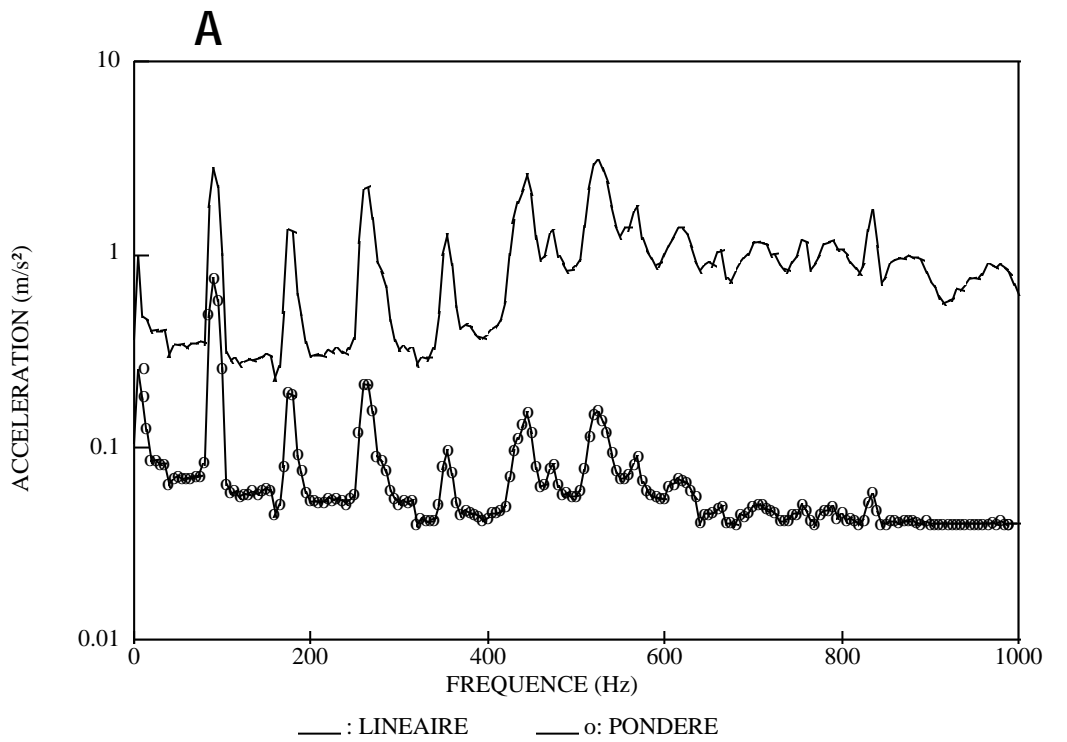
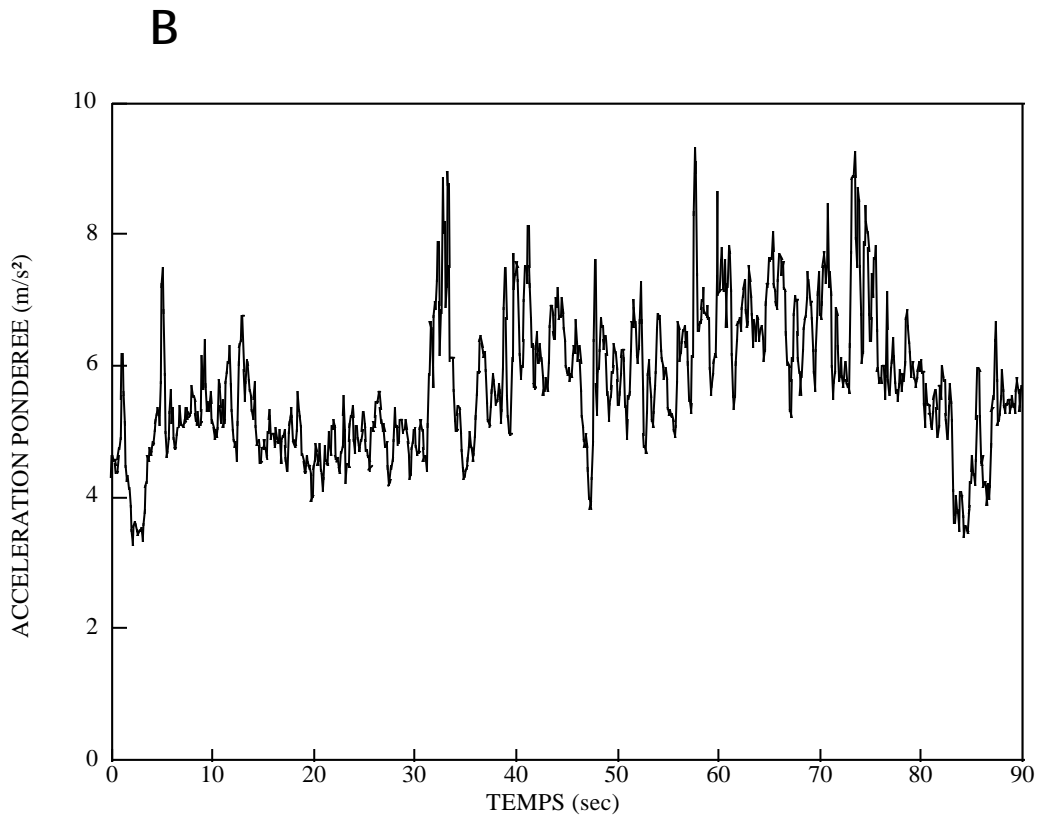
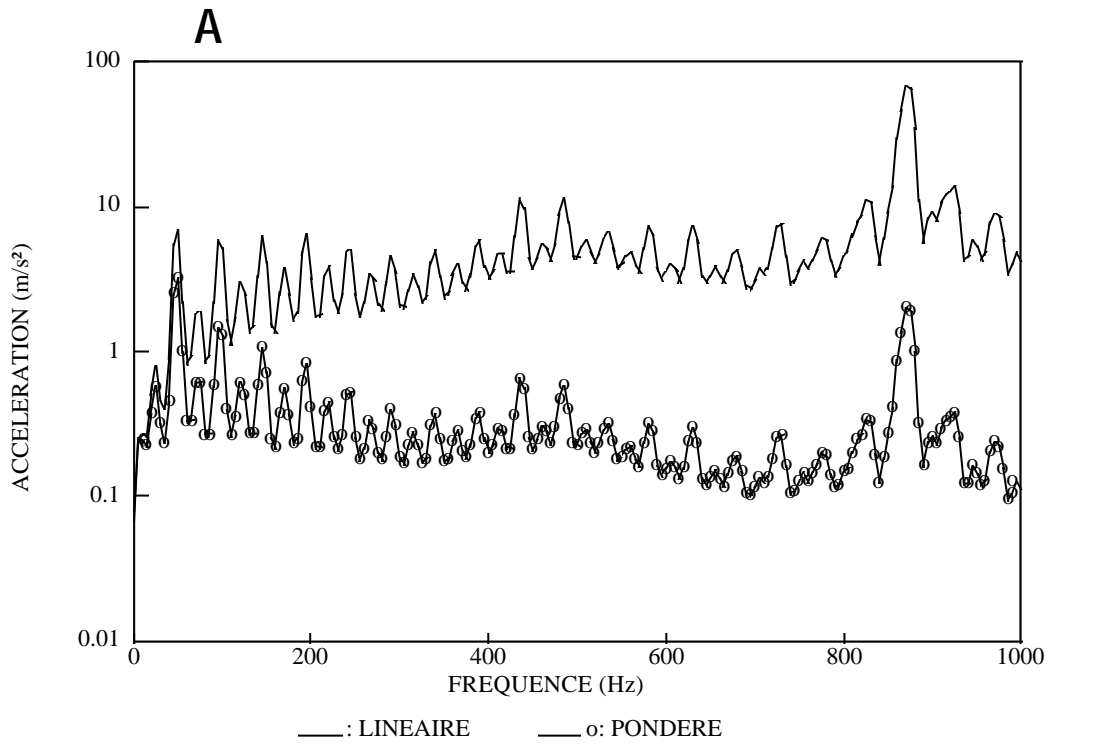


FIGURE 4.3 - Spectres de fréquences (A) de l'accélération non pondérée (linéaire) et pondérée et évolution au cours du temps de l'accélération pondérée (B): machine AGEFLEX (type 1) - machine 4E



2. Boulonneuses (type 2)

Une répétition de serrage de boulons a été demandée à l'opérateur de manière à obtenir une durée d'analyse (80 secondes) suffisante. A la fin de chaque serrage, un choc important survient, comme le montre la figure 4.4B. Le spectre de fréquences (figure 4.4A) se compose de deux parties, la fréquence fondamentale correspondant à la vitesse de rotation de la boulonneuse durant le serrage (dans cet exemple-ci, 9.000 rpm c.à.d. 150 Hz) et plusieurs fréquences en dessous de 50 Hz, correspondant au choc en fin de serrage.

3. Foreuses, visseuses, ... (type 3)

Comme précédemment dans le cas de la boulonneuse, il a été demandé à l'opérateur de réaliser une série de trous dans une planche de bois. Les cycles correspondant aux différents trous peuvent aisément être repérés sur la figure 4.5B, par les pics d'amplitude en début de cycle et les valeurs nettement plus basses en fin de cycle, lorsque la foreuse est retirée du trou réalisé. La fréquence fondamentale (figure 4.5A) correspond à la rotation de la mèche (25 Hz), et, comme pour les meuleuses, des harmoniques relativement importantes existent, notamment aux alentours de 400 Hz.

4. Scie électrique (type 4)

Cinq phases de sciage, d'une durée comprise entre 5 et 15 secondes, ont été réalisées par l'opérateur sur des planches de bois (figure 4.6B). Les amplitudes de vibration fluctuent durant la même phase d'environ 5 ms^{-2} , mais également d'une phase à l'autre, probablement en raison de différences structurelles dans le bois (présence ou proximité d'un nœud).

Une seule fréquence prédomine (figure 4.6A) aux alentours de 15 Hz, elle correspond à la fréquence du mouvement de la scie.

5. Cloueuse électrique (type 5)

Une bobine de 350 clous a été déchargée dans une planche en bois au rythme d'environ 10 clous par seconde. Chaque clou enfoncé correspond à un choc comme l'illustre la figure 4.7B. Les premières fréquences (figure 4.7A) rencontrées dans le spectre correspondent à la cadence de décharge des clous, tandis que les amplitudes importantes observées pratiquement à toutes les hautes fréquences caractérisent le caractère impulsif de la vibration.

6. Marteaux perforateurs, frappeur (type 6)

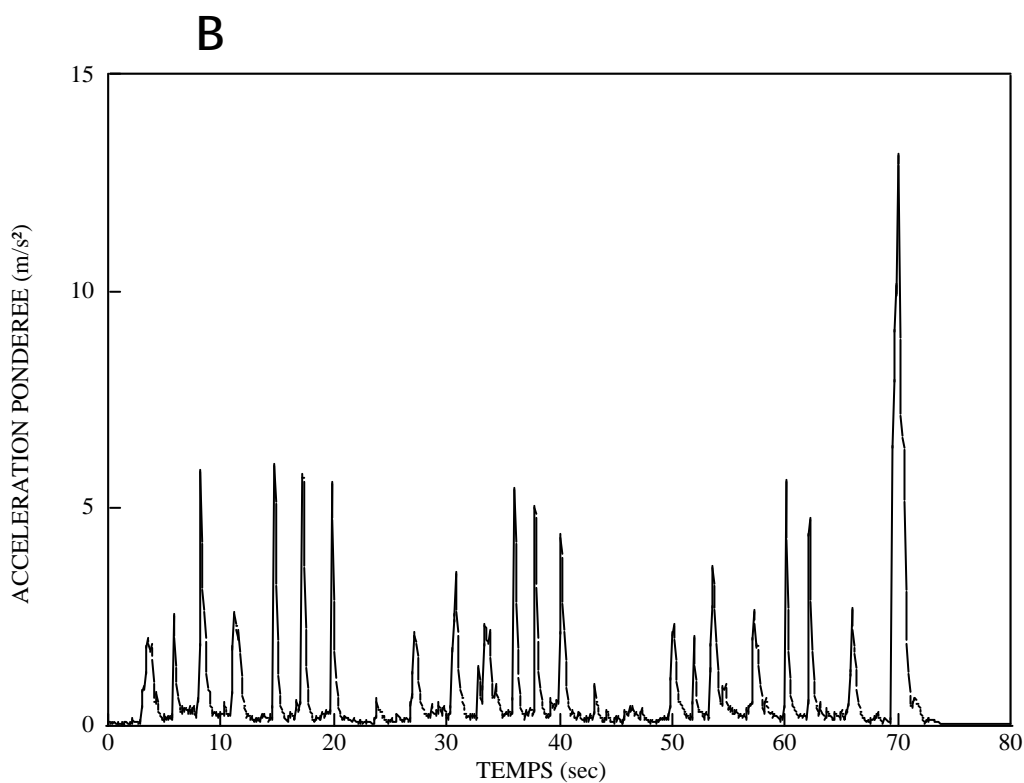
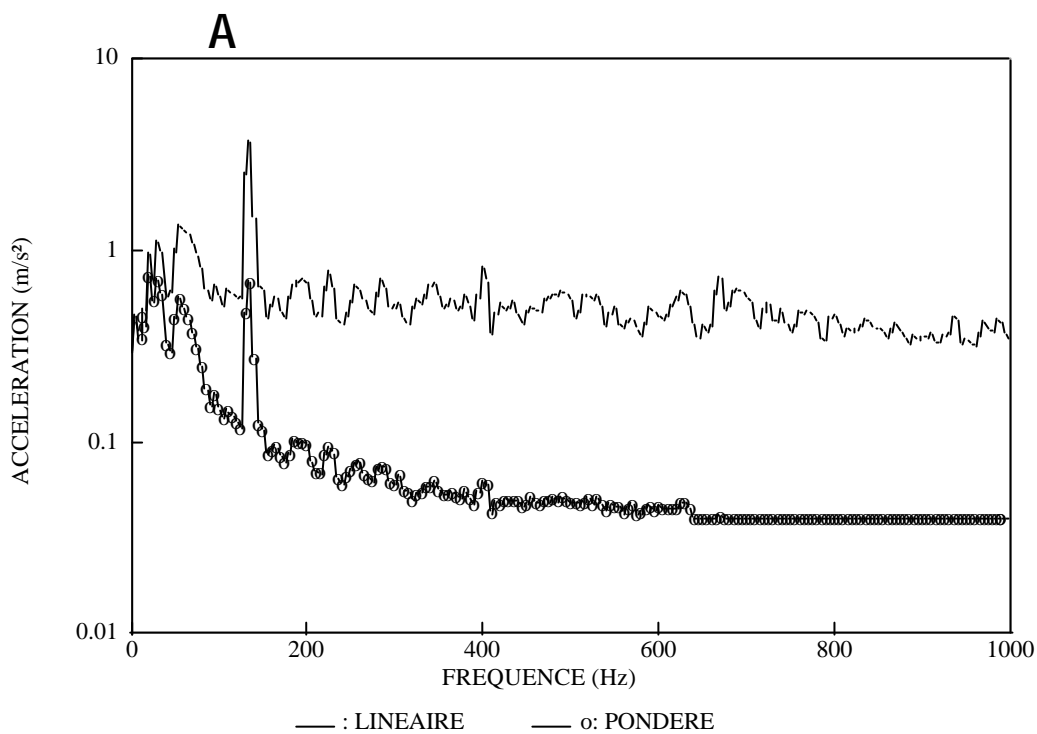
Il a été demandé au travailleur d'utiliser normalement sa machine et de réaliser le forage d'un trou durant plus de 2 minutes.

Le spectre de fréquences (figure 4.8A) ne présente qu'une seule fréquence correspondant à la fréquence de percussion du marteau perforateur. Les amplitudes de vibration peuvent être très importantes (supérieures à 1000 ms^{-2}) selon la dureté des couches rencontrées dans la roche.

Ces périodes, même brèves, déterminent l'exposition du travailleur, les autres périodes étant négligeables lors du calcul de l'accélération équivalente.

FIGURE 4.4 - Spectres de fréquences (A) de l'accélération non pondérée (linéaire) et pondérée et évolution au cours du temps de l'accélération pondérée (B): boulonneuse pneumatique (type 2) - machine 1D

FIGURE 4.5 - Spectres de fréquences (A) de l'accélération non pondérée (linéaire) et pondérée et évolution



au cours du temps de l'accélération pondérée (B): foreuse électrique (type 3) - machine 6D

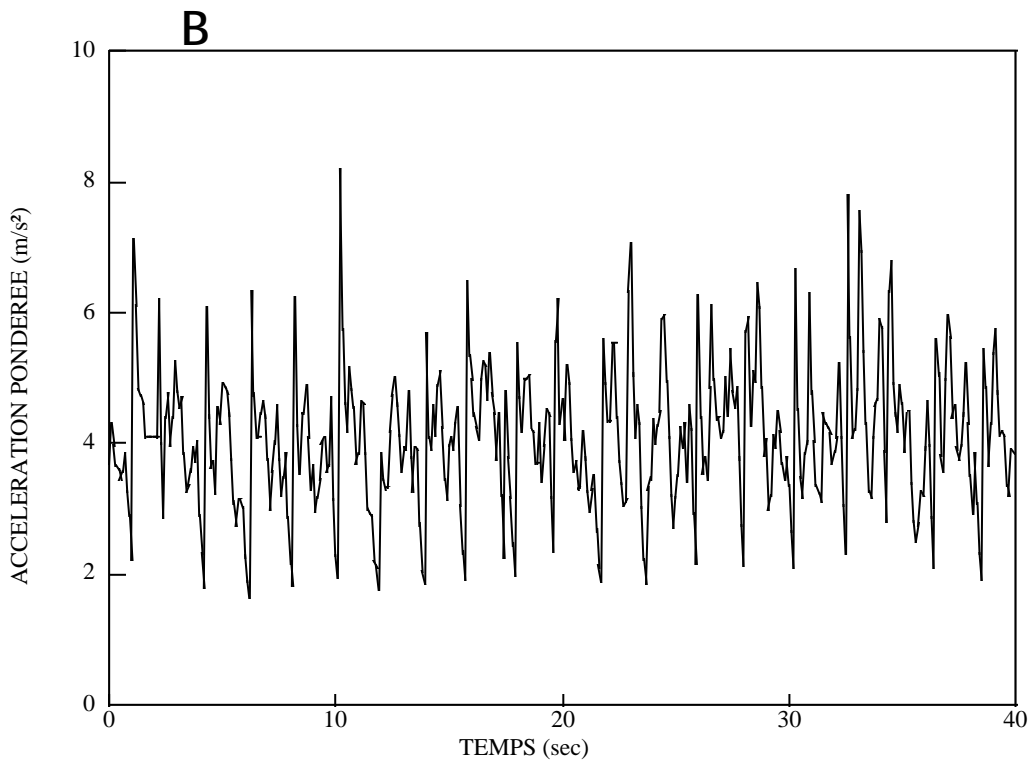
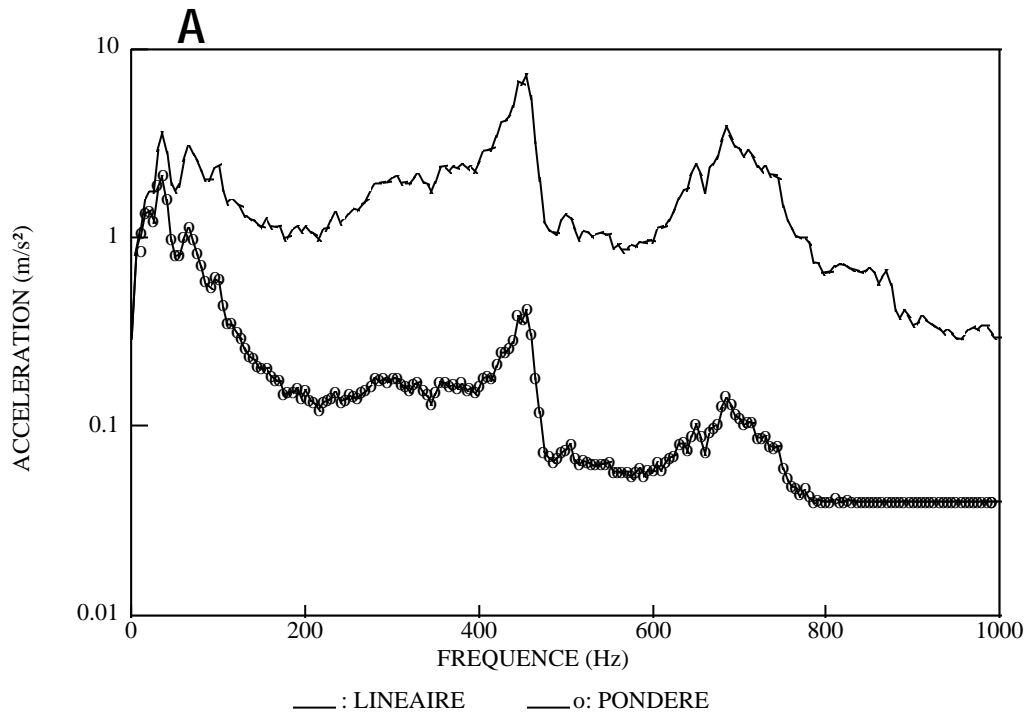


FIGURE 4.6 - Spectres de fréquences (A) de l'accélération non pondérée (linéaire) et pondérée et évolution au cours du temps de l'accélération pondérée (B): scie électrique (type 4) - machine 6A

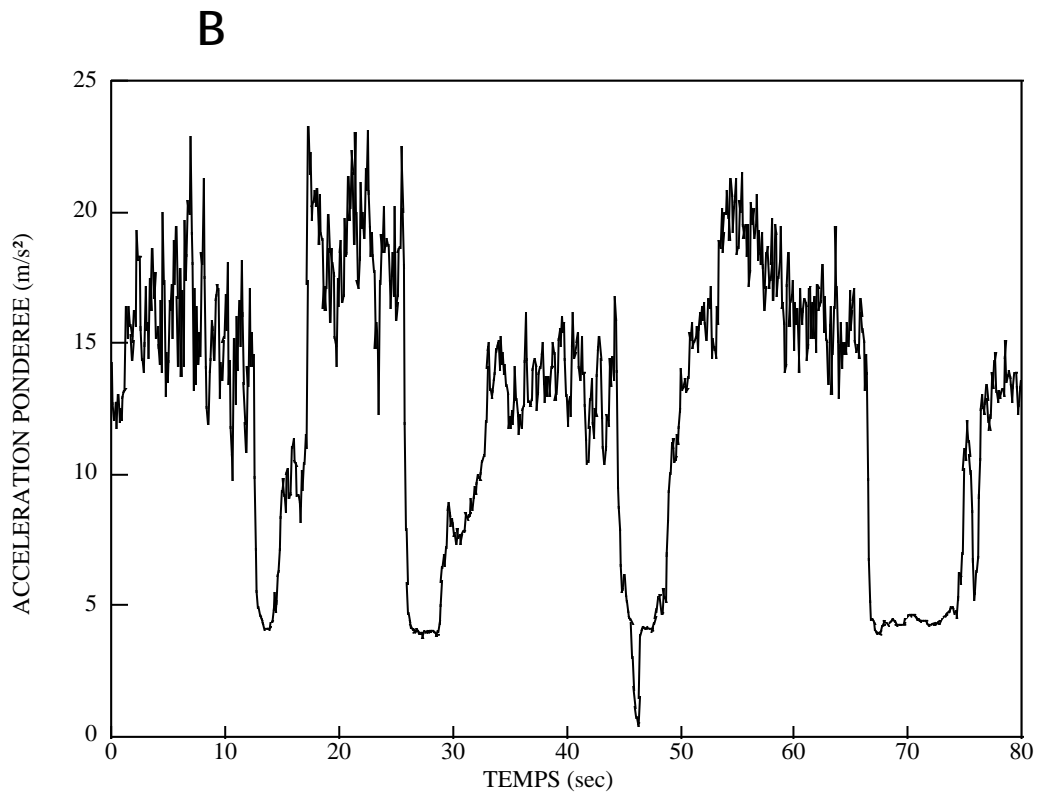
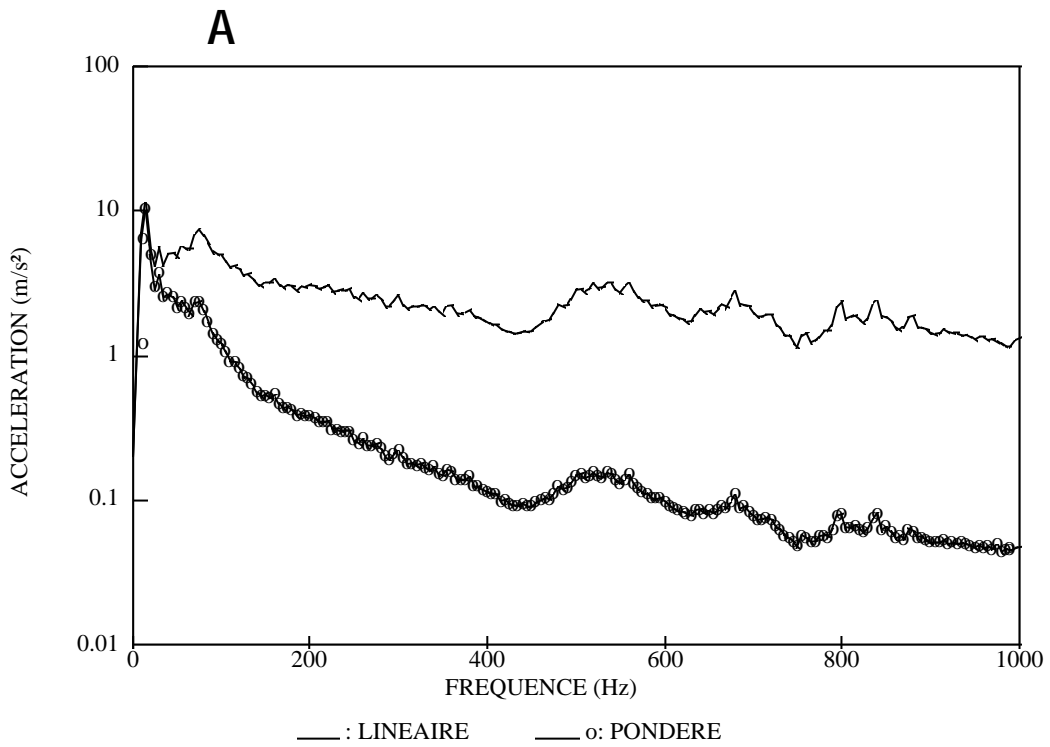


FIGURE 4.7 - Spectres de fréquences (A) de l'accélération non pondérée (linéaire) et pondérée et évolution au cours du temps de l'accélération pondérée (B): cloueuse électrique (type 5) - machine 6B

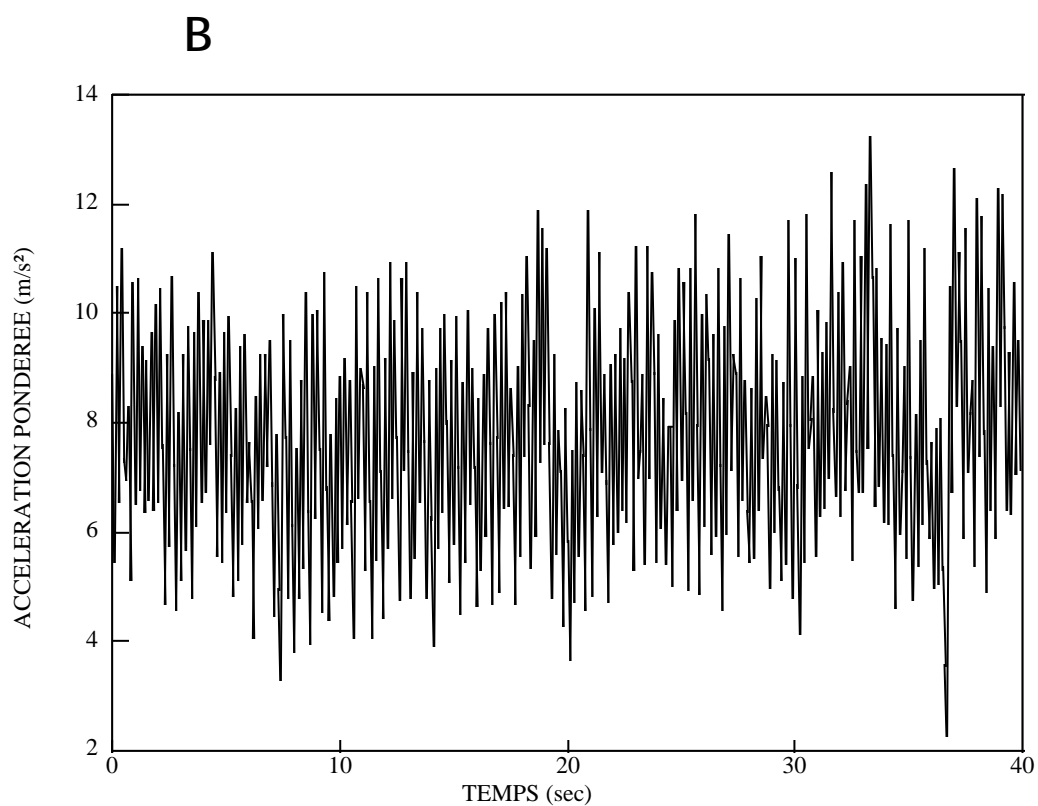
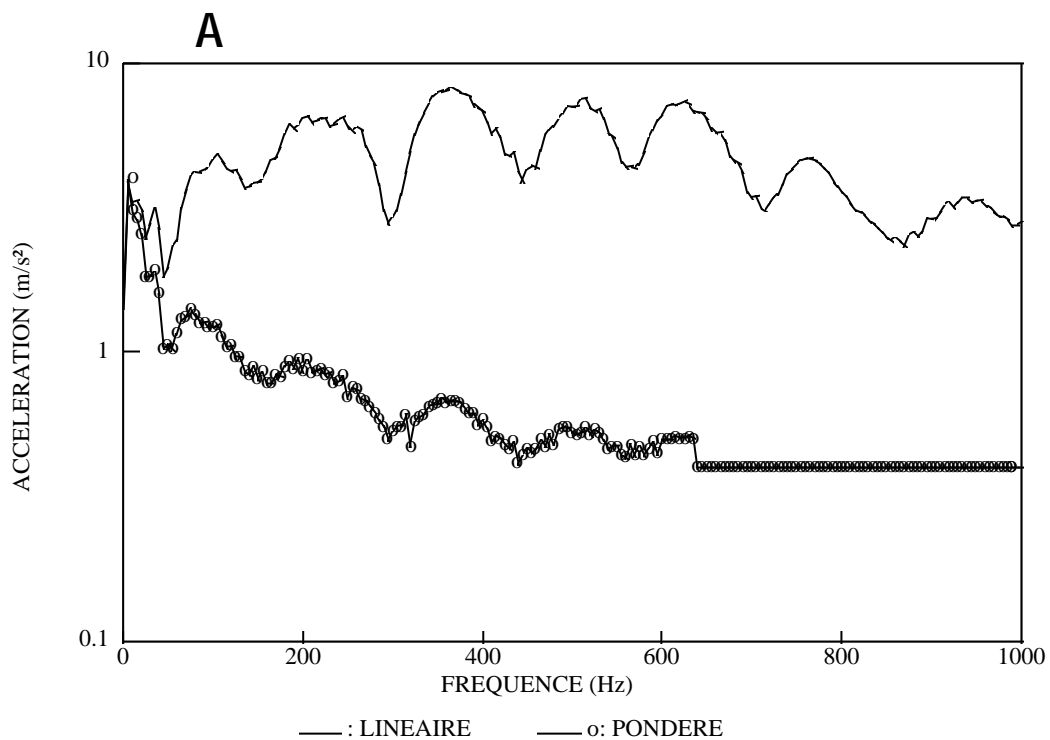
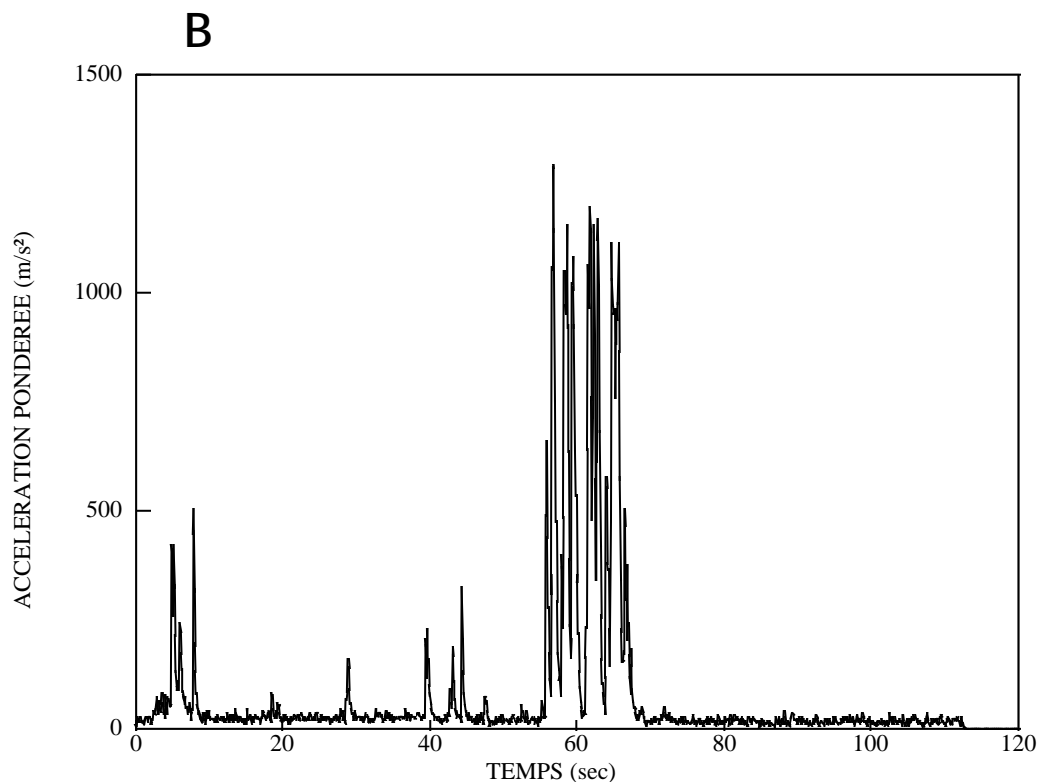
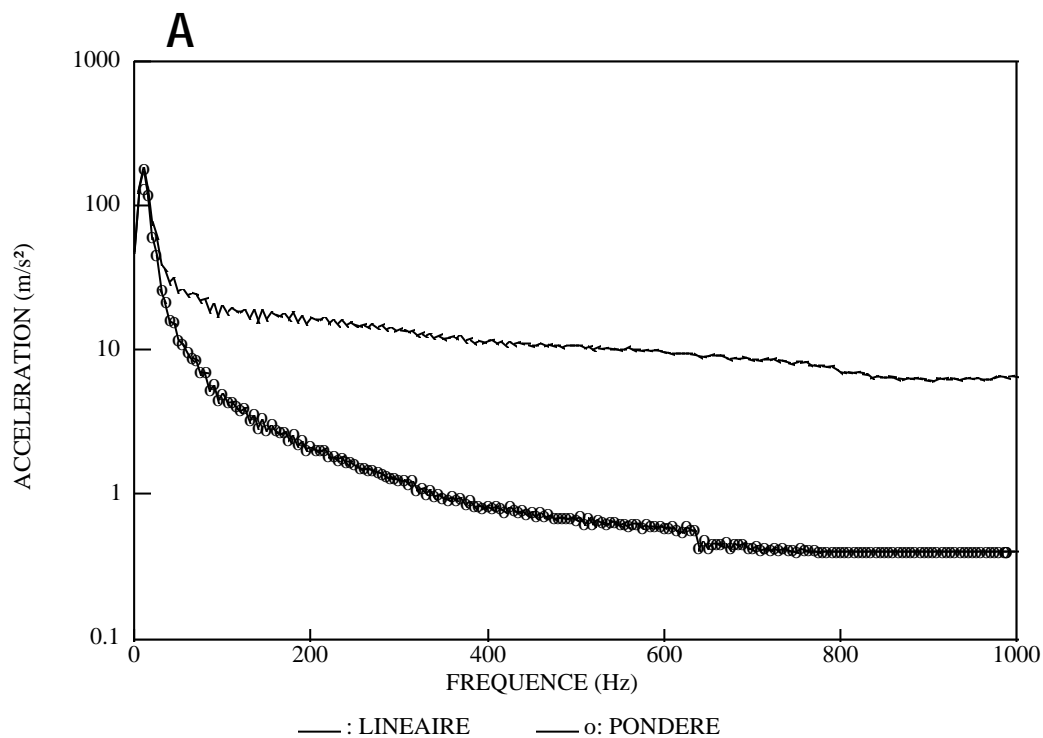


FIGURE 4.8 - Spectres de fréquences (A) de l'accélération non pondérée (linéaire) et pondérée et évolution au cours du temps de l'accélération pondérée (B): pistolet perforateur pneumatique (type 6) - machine 3C



III. EVALUATION DE L'EXPOSITION AUX VIBRATIONS

A. Enregistrement des vibrations aux postes de travail

En fonction du nombre de travailleurs par poste de travail, des enregistrements de l'exposition réelle aux vibrations ont été réalisés sur 3 (poste 8: WAGONS) à 7 (poste 2: FINITION) travailleurs par poste. Ces enregistrements ont porté sur plusieurs cycles de travail (3 à 4) et ont des durées allant de 10 à 50 minutes selon le poste étudié.

Les travailleurs utilisent les deux mains pour tenir leur machine à trois postes de travail seulement: il s'agit des postes 8 (WAGONS), 9 (CANONNERIE) et 3 (ROCTEURS: exposition symétrique). De ce fait, 38 enregistrements ont été effectués pour la main droite et 8 pour la main gauche (tableau 4.5).

Sur base des observations réalisées durant les enregistrements, il a été possible de repérer chacune des machines utilisées au cours de l'enregistrement et de corriger les accélérations non pondérées par un facteur pour obtenir les accélérations pondérées. Ce facteur, dépendant de la machine, a été déterminé sur base des analyses spectrales préalables des machines.

En moyenne la durée d'exposition varie de 10 (poste 1: boulonneurs) à 70% (poste 7: sièges) du temps de travail (tableau 4.5) selon le poste, tandis que l'accélération équivalente pondérée varie de 2,6 (poste 2: finition) à 10,0 ms⁻² (poste 3: rocteurs et poste 9: canons).

Le tableau 4.5 reprend également les valeurs de l'accélération équivalente non pondérée qui traduisent, à nouveau, par comparaison avec les valeurs pondérées, la présence d'harmoniques importantes. Les accélérations pondérées dépassées durant 90% et 10% du temps démontrent l'importance des variations d'amplitudes de vibration durant le travail et ce pour chacun des postes.

TABLEAU 4.5 - Synthèse de l'évaluation de l'exposition aux vibrations aux postes de travail (durées et amplitudes d'exposition)

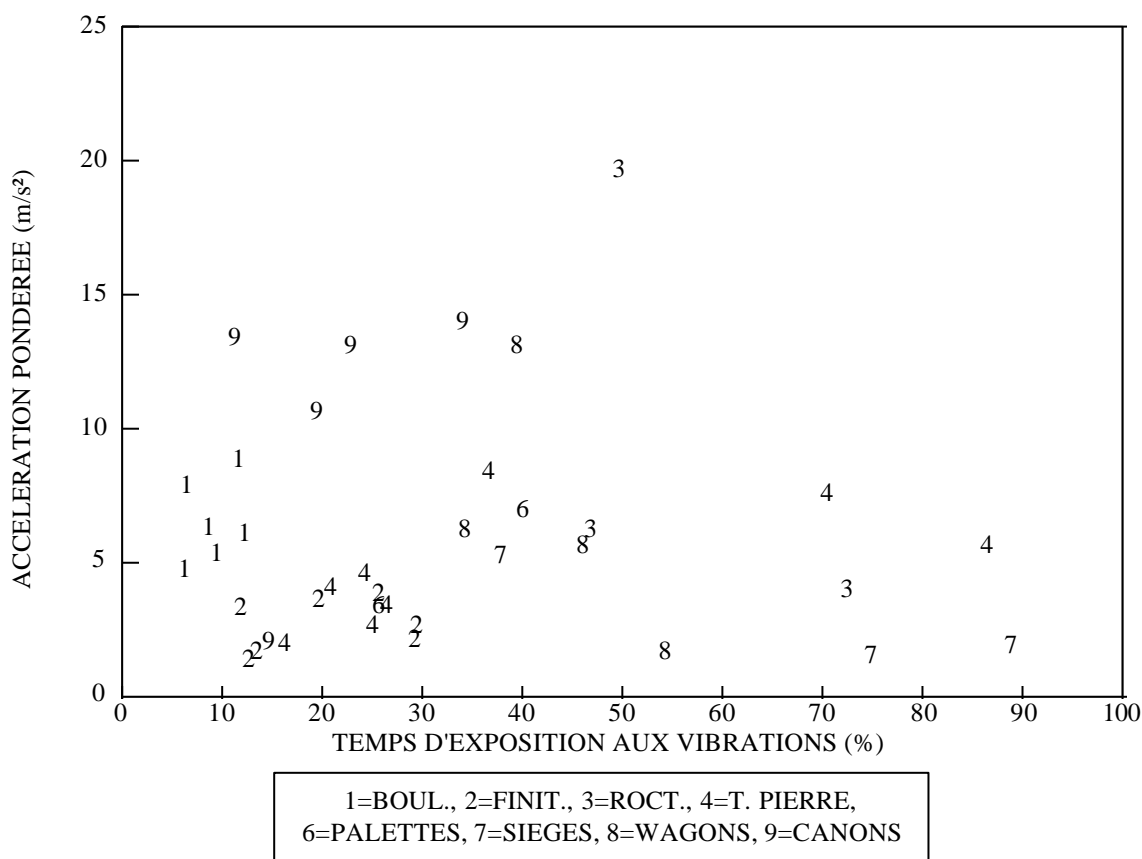
Poste	Cote	Nombre analyses	Durée analyse (s)	% temps exposé (%)	A _{eq} (ms ⁻²)	A _{eqw} (ms ⁻²)	L _{90w} (ms ⁻²)	L _{10w} (ms ⁻²)
1. Boulonneurs	DROIT	6	1228	9,2	32,2	6,5	0,5	30,5
2. Finition	DROIT	7	1118	20,3	15,0	2,6	0,7	7,2
3. Rocteurs	DROIT	3	1181	56,3	47,9	9,9	7,7	19,8
4. T. pierre	DROIT	8	1231	38,3	43,4	4,7	2,9	15,7
6. Palettes	DROIT	2	2842	32,9	21,2	5,1	2,8	11,3
7. Sièges	DROIT	3	1525	67,2	21,1	2,8	1,0	7,4
8. Wagons	DROIT	4	1083	43,5	77,2	6,6	2,5	10,7
9. Canons	DROIT	5	1390	20,5	25,8	10,6	1,1	18,6
8. Wagons	GAUCHE	4	909	55,6	22,1	2,5	2,1	4,8
9. Canons	GAUCHE	4	938	14,0	17,3	6,3	2,0	13,2

Les amplitudes et les durées d'exposition aux machines vibrantes varient fortement d'un sujet à l'autre (figure 4.9) sauf aux postes 1 et 2 (chaîne automobile). Cela s'explique, d'une part, par l'utilisation de plusieurs machines différentes au même poste (exemple des tailleurs de pierre répartis dans trois carrières), mais aussi par la variabilité dans l'utilisation des machines vibrantes selon le type de travail à réaliser le jour des mesurages (exemple des rocteurs mais aussi des tailleurs de pierre). Pour les postes des palettes (6), des sièges (7), des wagons (8) et des canons (9), les durées d'exposition varient moins entre sujets en raison de la production imposée, mais les amplitudes des vibrations varient fortement selon la machine utilisée par le travailleur.

Il est intéressant de noter les différences d'amplitude observées au poste 9 (canons) entre les accélérations mesurées lors de la phase de simulation et en condition réelle de travail. Durant la phase de simulation, les travailleurs avaient pris un canon abîmé et laissé tourner la machine. Par contre, en situation réelle les durées d'utilisation de la machine étaient plus courtes, avec introduction répétée du canon et forte pression par le travailleur sur le canon contre les aiguilles, ce qui augmente les vibrations.

Cet exemple illustre bien l'importance des mesurages des vibrations en condition réelle de travail pour déterminer l'exposition des travailleurs. Les valeurs d'accélérations fournies par les fabricants de machine (Directive Machine Européenne 89/392/CEE) résultent de mesurages en laboratoire selon des normes précises et sont utiles pour la comparaison des machines. Elles ne permettent cependant guère de prédire quelle sera l'exposition réelle des travailleurs.

FIGURE 4.9 - Accélération équivalente pondérée (m/s^2) et durée d'exposition aux vibrations relevée pour chaque travailleur



B. Comparaison des durées d'exposition aux vibrations estimées par l'observateur avec l'aide des travailleurs et celles mesurées au poste de travail

Pour les postes de travail où l'utilisation des machines vibrantes est systématiquement imposée par la production (boulonneurs, finition et canons), peu de discordances sont attendues entre les mesurages et les estimations des durées d'exposition aux vibrations (tableau 4.6).

TABLEAU 4.6 - Comparaison des durées d'exposition aux vibrations estimées et relevées par mesurage (en %)

Poste	Durée d'exposition (%) estimée par poste de travail	Moyenne des durées d'exposition (%) relevées pour chaque travailleur
1. Boulonneurs	9	9
2. Finition	10	20
3. Rocteurs	35	56
4. T. pierre	55	38
6. Palettes	60	33
7. Sièges	85	67
8. Wagons	85	44
9. Canons	20	21

Malgré le choix de périodes de travail les plus représentatives possibles pour les mesurages, ceux-ci restent tributaires des circonstances existant le jour où ils sont effectués: production différente, état du matériau à travailler différent (défauts), fabrication portant sur plusieurs jours avec des périodes d'exposition et de non-exposition, ...

Une production différente ou de longs cycles de travail interviennent probablement plus pour les postes en carrières (rocteurs et tailleurs de pierre) où le perçage de la roche nécessite des durées dépendant fortement de la profondeur et de la dureté de la couche rocheuse. De même, l'utilisation des meuleuses par les tailleurs de pierre dépend de la commande du client, de la taille à réaliser dans la pierre,... L'estimation des durées d'exposition avec l'aide des travailleurs paraît dès lors plus représentative des conditions moyennes de travail que les mesurages qui sont plus influencés par ces circonstances particulières.

Pour les postes de travail où l'utilisation de la machine vibrante dépend de l'état de la pièce à usiner (finition, palettes, sièges et wagons), l'estimation peut être biaisée tant par l'avis des travailleurs que par l'observation du poste.

Focalisés sur l'exposition aux vibrations, les travailleurs ne prennent pas toujours en compte les autres phases de travail telles que l'approvisionnement en palettes, en matières premières (bois, vis, ...) et les temps d'évacuation des palettes renouvelées. Ainsi, les réparateurs de palettes estiment qu'ils ont en permanence besoin de leurs 5 machines et affirment qu'ils les utilisent tout le temps.

L'observateur extérieur au poste peut alors pondérer l'avis de ces travailleurs, mais il est vrai qu'à ce poste, l'emploi des 5 machines est tellement court (quelques secondes pour clouer, visser, boulonner) et la succession des différentes machines tellement rapide qu'il est très difficile de déterminer le temps d'utilisation réelle de chacune. Les temps de prise et de dépose de la machine sont souvent pris en compte.

Lorsque le cycle de travail est relativement court (inférieur à 30 minutes), il semble donc que la meilleure évaluation de la durée réelle d'exposition aux vibrations est obtenue en enregistrant les vibrations au cours de plusieurs cycles de travail et en répétant ces mesurages sur plusieurs travailleurs. Reste à tenir compte des périodes où d'autres tâches sans vibrations sont réalisées.

C'est cette procédure que nous avons systématiquement utilisée dans la présente étude.

C. Estimation de la dose vibratoire personnelle

L'accélération équivalente pondérée (tableau 4.5) a été déterminée en moyennant les mesurages sur plusieurs travailleurs et en tenant compte des périodes avec et sans vibrations. Les travailleurs effectuant le même travail tout au long de l'année, cette accélération est représentative de leur exposition et sera dorénavant appelée accélération d'exposition personnelle (A_{EP}). Elle sera par conséquent considérée identique pour tous les travailleurs d'un même poste.

Selon le principe d'égalité d'énergie, la dose vibratoire personnelle peut s'exprimer par $\sqrt{A_{EP}^2 \cdot T}$ où T représente le nombre d'années d'exposition (ancienneté au poste).

Le tableau 4.7 reprend la moyenne de la dose vibratoire personnelle et l'ancienneté (T) pour chacun des postes de travail. L'ancienneté moyenne varie entre 2 et 15 ans selon le poste. Elle varie cependant considérablement entre les travailleurs d'un même poste.

Globalement, la dose vibratoire moyenne du groupe de travailleurs exposés aux vibrations (groupe 1) est de 13,4 (+9,4) et varie entre 2,3 et 39,6 $\text{ms}^{-2} \text{an}^{0,5}$ en tenant compte de la pondération fréquentielle. Elle est égale à 76,9 (+63,8) et varie entre 6,2 et 278,3 $\text{ms}^{-2} \text{an}^{0,5}$ sans cette pondération.

TABLEAU 4.7 – Moyennes et écarts types par poste de travail de l'ancienneté au poste et de la dose vibratoire personnelle pondérée et non pondérée

Poste	Cote	Nombre de travailleurs	Ancienneté au poste T (années) m (s)	Dose vibratoire pondérée ($\text{ms}^{-2} \text{an}^{0,5}$) m (s)	Dose vibratoire non pondérée ($\text{ms}^{-2} \text{an}^{0,5}$) m (s)
1. Boulonneurs	DROIT	11	7,0 (5,3)	15,9 (5,3)	79,5 (32,1)
2. Finition	DROIT	12	6,2 (5,5)	5,9 (2,6)	34,3 (15,4)
3. Rocteurs	DROIT	7	8,7 (5,0)	27,5 (10,6)	133,2 (51,4)
4. T. pierre	DROIT	10	14,6 (8,5)	16,8 (6,7)	155,1 (61,5)
6. Palettes	DROIT	9	2,4 (1,6)	7,3 (3,3)	30,2 (13,6)
7. Sièges	DROIT	5	2,6 (1,5)	4,4 (1,4)	32,8 (10,8)
8. Wagons	DROIT	4	7,5 (4,8)	17,3 (5,9)	202,6 (69,6)
9. Canons	DROIT	7	5,0 (4,2)	20,8 (12,4)	50,7 (30,2)
8. Wagons	GAUCHE	4	7,5 (4,8)	6,7 (2,3)	58,0 (19,9)
9. Canons	GAUCHE	7	5,0 (4,2)	12,3 (7,3)	34,0 (20,3)

I. LA POPULATION ET SES CARACTERISTIQUES

A. Effectifs et caractéristiques personnelles

Un total de 177 travailleurs, répartis dans 3 groupes d'exposition professionnelle, ont fait l'objet de la première partie de l'étude. Le tableau 5.1. reprend les moyennes d'âge, de poids, de taille et d'ancienneté pour ces 3 groupes, à savoir:

- les 69 travailleurs exposés aux vibrations manu-brachiales (GR1);
- les 62 travailleurs-emballeurs exposés à des travaux lourds et répétitifs (GR2);
- les 46 travailleurs ayant des tâches légères et variées (GR3).

Ce tableau reprend également la signification statistique des différences de moyennes entre les groupes.

TABLEAU 5.1 - Caractéristiques moyennes d'âge, de poids, de taille et d'ancienneté pour les 3 groupes de travailleurs (moyennes et écarts types) et signification statistique des différences entre groupes

	<u>GR1</u>	<u>GR2</u>	<u>GR3</u>	<u>Test t</u>		
	VIBRATIONS	TRAVAUX LOURDS	CONTROLES	GR1 vs GR2	GR2 vs GR3	GR1 vs GR3
n	69	62	46			
Age (ans)	35,6 (7,2)	35,1 (6,9)	35,6 (6,3)	-	-	-
Poids (kg)	81,3 (12,4)	75,4 (12,4)	74,9 (11,9)	***	-	***
Taille (cm)	174,6 (6,7)	173,7 (7,8)	172,9 (5,9)	-	-	-
Anc. poste (ans)	7,0 (6,1)	7,2 (6,2)	4,9 (4,7)	-	**	**
Anc. entreprise (ans)	12,9 (8,4)	13,4 (7,0)	14,4 (6,6)	-	-	-

- NS ** p < 0.01 *** p < 0,001

Il ressort du tableau 5.1 que:

- **L'âge** varie de 19 à 49 ans. La moyenne est de 35,4 ans et ne varie pas entre les 3 groupes de travailleurs.
- **Le poids** des sujets varie de 51 à 115 kg avec une moyenne sur l'ensemble des 177 personnes égale à 77,6 kg. Les travailleurs exposés aux vibrations sont significativement plus lourds que ceux des deux autres groupes.
- **La taille** des travailleurs varie entre 159 et 190 cm. La moyenne générale est de 173,8 cm. Les trois groupes sont tout à fait comparables.
- **L'ancienneté au poste de travail** varie de 1 mois à 25 ans. La moyenne générale est de 6,5 ans. Elle est significativement inférieure pour le GR3.
- **L'ancienneté dans l'entreprise** ne varie pas significativement entre les différents groupes. Elle est égale à 13,5 ans en moyenne avec une variation interindividuelle importante (1 an à 31 ans).

Globalement, on peut conclure que les 3 groupes de travailleurs sont comparables en ce qui concerne 3 des 5 facteurs caractérisant les travailleurs. Les travailleurs exposés aux vibrations sont en moyenne plus lourds et les non exposés ont une ancienneté au poste plus faible.

B. Caractéristiques générales relevées par le questionnaire et différences entre groupes

Ces caractéristiques concernent essentiellement l'état de santé générale et psychique, ainsi que les habitudes des travailleurs. Le tableau 5.2. reprend les proportions, par groupe, pour 15 items et la différence statistique entre les 3 groupes (test Chi²).

74% des sujets jugent leur **santé** bonne ou excellente, 17% souffrent d'une maladie chronique, 55,5% ont eu un accident au niveau des membres supérieurs au cours de leur vie et à peu près 10% ont consulté un médecin pour plus de 2 raisons différentes au cours des 12 derniers mois.

Les trois groupes ne diffèrent qu'en ce qui concerne la prévalence de maladies chroniques. Elle est significativement plus élevée chez les travailleurs du GR2 et la plus faible pour le GR3.

Pour ce qui est des **habitudes personnelles**, en moyenne, 47% des travailleurs fument (de quelques cigarettes à plus d'un paquet par jour), 67% consomment des boissons alcoolisées (du petit au grand consommateur) et 45% pratiquent un sport (quel qu'il soit), dont 4,5% un sport impliquant le membre supérieur, à raison d'une fois par semaine au minimum. 60% des travailleurs ont des activités extraprofessionnelles ou des hobbies et, dans 20% des cas, utilisent des machines vibrantes lors de ces activités.

Les différences statistiques entre les groupes se marquent pour la consommation d'alcool et pour l'utilisation des machines vibrantes lors des activités extra-professionnelles. Significativement plus de travailleurs exposés aux vibrations consomment de l'alcool et utilisent des machines vibrantes lors de leurs hobbies.

TABLEAU 5.2 - Caractéristiques générales (en %) et différences entre groupes

	GR 1 VIBRATIONS n = 69	GR 2 TRAVAUX LOURDS n = 62	GR 3 CONTROLES n = 46	Chi²
Santé:				
• santé (bonne et excellente)	75,3	67,8	80,4	-
• maladies chroniques	14,5	25,8	8,7	*
• accidents MS	59,4	54,8	50,0	-
• consultations médicales (> 3 x/12 mois)	10,1	12,9	4,3	-
Habitudes:				
• tabagie	47,8	53,2	37,0	-
• alcool	82,6	53,2	63,1	*
• sport	44,9	37,1	54,3	-
• sport membres supérieurs (min 1x/semaine)	7,2	1,6	4,4	-
• hobbies (> 5h/semaine)	58,0	59,7	63,0	-
• machines vibrantes pendant hobbies	33,3	14,5	6,5	**
Psychosocial : (souvent et toujours)				
• fatigue anormale	5,8	16,1	23,9	**
• irritabilité	1,4	4,8	4,3	-
• troubles de mémoire	5,7	6,5	8,7	-
• troubles du sommeil	15,9	17,7	10,9	-
• céphalées	8,6	16,1	15,2	-

- NS

* p < 0,05

** p < 0,01

Pour ce qui est de **l'état de santé psychique**, 14,2% des travailleurs se plaignent d'être souvent ou toujours "anormalement" fatigués, 3,4% d'être irrités sans raison particulière, 6,8% d'avoir des troubles de mémoire, 15,2% d'avoir des troubles du sommeil et 13% de souffrir régulièrement (au minimum une fois par semaine) de céphalées.

Significativement moins de travailleurs exposés aux vibrations se plaignent de fatigue anormale.

C. Caractéristiques concernant l'activité professionnelle actuelle et antérieure

Le tableau 5.3. reprend, pour les 3 groupes et pour les activités professionnelles actuelles et antérieures, les principales contraintes selon les avis des travailleurs, ainsi que la signification statistique des tests Chi² systématiquement calculés entre les groupes.

1. Poste de travail actuel

La sélection des 3 groupes a été réalisée de manière à obtenir un groupe à faible contrainte (groupe contrôle) et deux groupes à contraintes (force, répétitive, ...) importantes et ne se différenciant l'un de l'autre que par l'exposition aux vibrations.

TABLEAU 5.3 - Caractéristiques professionnelles actuelles et antérieures (en %)

	<u>GR 1</u>	<u>GR 2</u>	<u>GR 3</u>	<u>Chi²</u>		
	vibrations n = 69	travaux lourds n = 62	contrôles n = 46	GR1 vs GR2	GR2 vs GR3	GR1 vs GR3
Postes de travail actuels:						
• efforts de levage moyens à lourds	73,9	88,7	19,6	*	***	***
• efforts des poignets moyens à lourds	84,0	100,0	0,0	**	***	***
• répétitivité élevée	79,7	96,7	76,1	**	**	-
• travail moyennement à très fatigant	75,4	83,8	54,3	-	***	*
• fatigue dans les poignets fréquente	55,1	59,7	8,7	-	**	***
Postes de travail antérieurs:						
• efforts de levage moyens à lourds	60,8	46,7	58,7	-	-	-
• efforts des poignets moyens à lourds	69,6	45,1	52,2	-	-	-
• répétitivité élevée	63,7	62,9	63,1	-	-	-
• travail moyennement à très fatigant	62,1	41,9	56,5	*	-	-
• fatigue dans les poignets fréquente	42,4	37,1	21,7	-	-	*
• utilisation de machines vibrantes	36,2	6,5	10,9	***	-	**

- NS

* p < 0,05

** p < 0,01

*** p < 0,001

Comme le montre la comparaison de ces trois groupes (tableau 5.3), le groupe contrôle présente les proportions les plus faibles de contraintes en termes d'efforts (levage et des poignets) et de fatigue dans les poignets. Par contre, 75% des travailleurs de ce groupe trouvent leur travail répétitif, ce qui est à peine inférieur aux 80% du groupe 1. Malgré l'interview du travailleur précisant éventuellement la signification des questions posées, cette valeur illustre les notions différentes que le mot répétitif peut représenter auprès des travailleurs: répétition des mouvements, des gestes, de la tâche, ...

Les contraintes de travail sont toutes jugées importantes par la majorité (75% à 100%) des travailleurs des groupes 1 et 2, les proportions étant cependant significativement plus élevées dans le groupe 2 avec des valeurs de l'ordre de 90% par rapport à 80% pour le groupe 1.

2. Poste de travail antérieur

55,4% des travailleurs disent qu'ils exerçaient des efforts de levage moyens ou lourds; 56,5% jugeaient les efforts au niveau des poignets moyens ou lourds; 63,3% estiment que ces travaux antérieurs étaient très répétitifs et, pour 53,5% fatigants; 35,1% ressentait une fatigue au niveau des poignets en fin de journée et dans 19,2% des cas ces travaux exigeaient l'utilisation de machines vibrantes. Ces proportions sont semblables dans les 3 groupes.

Les seules différences significatives entre les 3 groupes concernent les efforts au niveau des poignets et l'utilisation de machines vibrantes. Pour ces deux facteurs de contrainte professionnelle antérieure, les proportions sont significativement plus grandes dans le groupe des travailleurs actuellement exposés aux vibrations, plus du tiers de ceux-ci étant déjà exposés aux vibrations dans leurs postes de travail antérieurs.

II. LES AFFECTIONS MUSCULOSQUELETTIQUES

A. Prévalences des plaintes MS

Le tableau 5.4. reprend les prévalences de plaintes dans la région de la nuque, du dos et des membres supérieurs (à droite ou à gauche) pour les périodes des 12 derniers mois, des 7 derniers jours et de la vie, pour les trois groupes de travailleurs. Pour la période des 12 derniers mois, les prévalences sont également données séparément pour les côtés gauche et droit.

Il ressort de ce tableau qu'en moyenne les prévalences sont les plus importantes pour la région du bas du dos, suivie des membres supérieurs (TMS à au moins une des 3 régions: épaules, coudes, poignets/mains) et de la nuque. On retrouve cette même hiérarchisation pour les 3 groupes de travailleurs.

Pour la période des 12 derniers mois (figure 5.1), les prévalences de plaintes oscillent entre 63 et 80% pour le bas du dos, entre 35 et 80% pour les TMS des membres supérieurs et entre 45 et 49% pour la nuque.

Parmi les 3 zones des membres supérieurs, les prévalences sont les plus élevées pour les poignets/mains. Elles varient de 30 à 73% pour les plaintes relatives aux 12 derniers mois. Les prévalences au niveau des épaules et des coudes sont très semblables et varient entre 5 et 22%.

Sauf pour les épaules dans le groupe 2 et les poignets dans le groupe contrôle, les plaintes au cours des 12 derniers mois sont plus importantes du côté droit, la différence pouvant aller du simple au double. Notons aussi que la majorité des travailleurs de cette étude sont droitiers (94%).

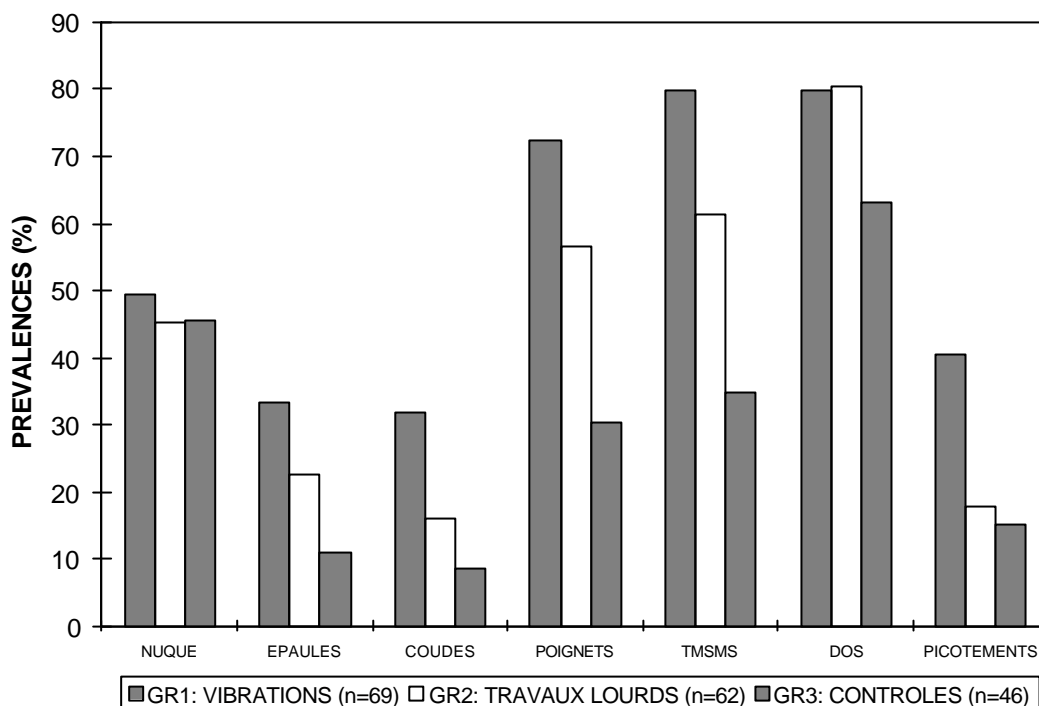
TABLEAU 5.4 - Prévalences (en %) de plaintes musculosquelettiques pour les trois groupes de travailleurs

	GR1 VIBRATIONS n = 69	GR2 TRAVAUX LOURDS n = 62	GR3 CONTROLES n = 46	Chi²
Nuque:				
vie	39.1	40.3	39.1	-
12 mois	49.3	45.2	45.7	-
7 jours	21.7	22.6	8.7	-
Epaules:				
vie	30.4	27.4	23.9	-
12 mois	33.3	22.6	10.9	*
à droite	24.6	12.9	8.7	-
à gauche	18.8	21.0	2.2	*
7 jours	17.4	14.5	2.2	*
Coudes:				
vie	29.0	19.4	10.9	-
12 mois	31.9	16.1	8.7	**
à droite	26.1	11.3	8.7	*
à gauche	17.4	6.5	4.3	*
7 jours	20.3	9.7	4.3	*
Poignets:				
vie	62.3	45.2	32.6	**
12 mois	72.5	56.5	30.4	**
à droite	65.2	45.2	23.9	**
à gauche	52.2	27.4	21.7	*
7 jours	26.1	19.4	4.3	*
TMSMS*:				
vie	75.4	66.1	54.3	-
12 mois	79.7	61.3	34.8	**
7 jours	43.5	33.9	10.9	**
Bas du dos:				
vie	72.5	77.4	67.4	-
12 mois	79.7	80.6	63.0	-
7 jours	36.2	32.3	13.0	*

- NS * p < 0.05 ** p < 0.01

* TMSMS: au moins une des 3 régions du membre supérieur (épaule, coude ou poignet) est atteinte

FIGURE 5.1: Prévalences (%) de plaintes au cours des 12 derniers mois pour les trois groupes de travailleurs



Il ressort également de ce tableau que, quelle que soit la région considérée au niveau des membres supérieurs, les prévalences sont les plus élevées pour les travailleurs exposés aux vibrations, suivi des travailleurs exposés aux travaux lourds et enfin les non exposés. Les prévalences vont du simple au double d'un groupe à l'autre.

La répartition des prévalences (tableau 5.5) (plaintes au cours des 12 derniers mois) entre les différents postes de travail du GR1 (VIBRATIONS) montre que les plaintes au niveau des poignets sont semblables entre les postes de travail, les prévalences étant supérieures à 80%, hormis pour les deux premiers postes de travail (BOULONNEURS et FINITION).

En ce qui concerne les épaules et les coudes, les postes de « ROCTEURS » (poste 3), « PALETTES » (poste 6) et le poste de « WAGON » (poste 8) présentent les taux de plaintes les plus importants tandis que pour la nuque ce dernier poste se distingue des autres.

TABLEAU 5.5: Répartition des prévalences (%) des plaintes au cours des 12 derniers mois entre les différents postes de travail du groupe 1 (VIBRATIONS)

Poste	Nuque	Epaules	Coudes	Poignets	TMSMS	Dos	Picotements
1. Boulonneurs (n=11)	27,3	9,1	18,2	27,3	45,5	81,8	9,1
2. Finition (n=12)	41,7	25,0	16,7	33,3	58,3	75,0	16,7
3. Rocteurs (n=7)	0,0	57,1	71,4	57,1	85,7	71,4	85,7
4. T. pierre (n=10)	50,0	20,0	20,0	70,0	80,0	70,0	30,0
5. Constr. (n=4)	50,0	75,0	0,0	100,0	100,0	75,0	50,0
6. Palettes (n=9)	88,9	33,3	55,6	77,8	100,0	88,9	44,4
7. Sièges (n=5)	40,0	40,0	20,0	100,0	100,0	80,0	40,0
8. Wagons (n=4)	100,0	50,0	50,0	100,0	100,0	100,0	75,0
9. Canons (n=7)	71,4	42,9	42,9	85,7	100,0	85,7	71,4

B. Prévalences des troubles relevés par l'examen clinique

L'examen clinique a permis de diagnostiquer les TMS dont souffraient les travailleurs le jour de l'examen. Il se base sur des signes objectifs et non plus uniquement subjectifs comme pour le questionnaire.

Le tableau 5.6. montre que le nombre de symptômes le jour de l'examen est bien inférieur à celui des plaintes au cours des 12 derniers mois relevées au moyen du questionnaire.

Les tendances, c.à.d. la hiérarchisation des TMS, observées sont les mêmes (voir figure 5.2) que pour les plaintes au cours des 12 derniers mois; les prévalences les plus élevées concernent la nuque, de 2 à 19%, les poignets, de 2 à 16%, les coudes, de 2 à 13%, et les épaules, de 0 à 7%.

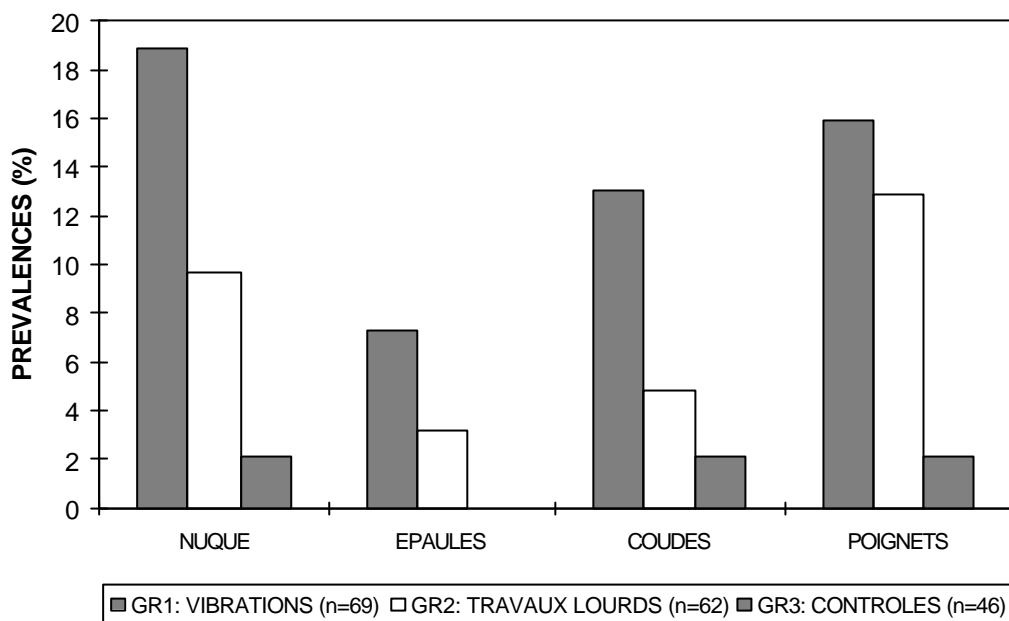
Quel que soit le groupe, la grande majorité des symptômes sont observés du côté droit du membre supérieur.

Les troubles les plus souvent rencontrés sont le tension neck syndrome (TNS) pour la nuque, le syndrome acromio-claviculaire pour les épaules, l'épicondylite latérale pour les coudes et les ténosynovites et les kystes synoviaux pour les poignets.

TABLEAU 5.6 - Nombre de TMS diagnostiqués lors de l'examen clinique

	GR1 VIBRATIONS n=69	GR2 TRAVAUX LOURDS n=62	GR3: CONTROLES n=46
Nuque et cou:	13	6	1
• Tension neck syndrome	7	5	0
• Ostéoarthrose	4	1	1
• Défilé thoraco-brachial	2	0	0
Epaules (à droite ou à gauche):	5	2	0
• Biceps	0	1	0
• Sus-épineux	2	0	0
• Epaule gelée	0	0	0
• Syndrome acromio-claviculaire	3	1	0
Coudes (à droite ou à gauche):	9	3	1
• Epicondylite latérale	7	3	1
• Epicondylite médiale	2	0	0
Poignets (à droite ou à gauche):	11	8	1
• Ténosynovite	3	4	0
• Kyste	4	3	1
• Syndrome du canal carpien	1	0	0
• Ténosynovite de de Quervain	2	1	0
• Syndrome de Guyon	1	0	0

FIGURE 5.2: Prévalences (%) des symptômes de TMS lors de l'examen clinique pour les trois groupes de travailleurs



Les travailleurs exposés aux vibrations présentent également le plus de symptômes de pathologies. Le groupe contrôle présente par contre des prévalences de symptômes de TMS quasi nulles pour l'ensemble des régions corporelles.

C. Répartition des plaintes vasculaires selon l'échelle de Stockholm

Un blanchissement, en général léger (stade 1 de l'échelle de Stockholm), a été constaté chez 10% des travailleurs exposés aux vibrations, chez 5 % des travailleurs du groupe 2 (travaux lourds) et 4% des travailleurs du groupe 3 (contrôle). Ces différences ne sont pas statistiquement significatives (test Chi²).

D. Prévalences de plaintes neurologiques

1. Globalement, pour les 3 groupes

L'ensemble des questions se rapportent aux 12 derniers mois et c'est cette période qui sera considérée dorénavant lorsque nous aborderons les plaintes MS.

Le tableau 5.7 décrit les prévalences de troubles neurosensoriels ainsi que la signification statistique globale des différences entre les 3 groupes.

TABLEAU 5.7 - Prévalences (en %) de plaintes au niveau des poignets et mains et signification statistique des différences entre les 3 groupes

	GR 1 VIBRATIONS n = 69	GR 2 TRAVAUX LOURDS n = 62	GR 3 CONTROLES n = 46	Chi²
Picotements des doigts	40.6	17.7	15.2	**
• à droite	33.3	11.3	13.0	**
• à gauche	28.9	14.5	8.6	*
Fréquence des picotements	24,6	1,6	2,2	***
Picotements gênants pour les activités	18,8	4,8	4,3	**
Difficultés dans l'exécution des tâches fines	5,8	3,2	10,9	-
Faiblesse anormale dans un des poignets	14,5	19,4	6,5	-

- NS

* p < 0,05

** p < 0,01

*** p < 0,001

Des picotements sont ressentis par plus de 40% des travailleurs exposés aux vibrations et par 15% seulement dans les deux autres groupes. La fréquence d'apparition de ces picotements diffère également très significativement entre le groupe 1 et les deux autres groupes (25%: souvent à toujours, donc minimum 1 fois par semaine, contre 2% pour les autres travailleurs).

19% des travailleurs du groupe 1 (vibrations) affirment que ces picotements sont gênants et les obligent à interrompre leur travail, pour moins de 5% dans les deux autres groupes.

Il ressort donc clairement que ce sont les travailleurs exposés aux vibrations qui sont majoritairement concernés par les troubles neurosensoriels et que les prévalences pour les deux autres groupes sont nettement plus faibles (2 à 3 fois) et du même ordre de grandeur.

Ces picotements sont présents aux 8 postes de travail (tableau 5.5) avec exposition aux vibrations et sont les plus fréquents aux postes « ROCTEURS » (poste 3), « WAGONS » (poste 8) et "CANONS" (poste 9).

Par contre, la difficulté dans l'exécution des tâches fines semble surtout concerner les travailleurs du groupe contrôle et les faiblesses dans un des poignets sont plus fréquentes parmi les travailleurs exposés aux travaux lourds.

2. Répartition des plaintes neurologiques selon l'échelle de Stockholm

Le tableau 5.8 reprend les pourcentages de travailleurs correspondant aux différents stades de l'échelle de Stockholm pour les troubles neurologiques. Aucun travailleur n'a été répertorié au stade 3.

31,9% des travailleurs du GR1 présentent des engourdissements intermittents avec ou sans picotements dont l'origine pourrait être l'utilisation de machines vibrantes. Les personnes souffrant de picotements dont l'origine est connue et étrangère à l'utilisation de ces machines ne sont pas reprises dans ces pourcentages.

TABLEAU 5.8 - Prévalences (en %) de travailleurs aux différents stades de l'échelle de Stockholm (troubles neurologiques)

	<u>GR 1</u> VIBRATIONS n=69	<u>GR 2</u> TRAVAUX LOURDS N=62	<u>GR 3</u> CONTROLES N=46
Stade 1	31,9	16,1	8,7
Stade 2	8,7	1,6	6,5
Stade 3	0,0	0,0	0,0

9% des travailleurs présentent en plus des troubles de la perception sensitive (stade 2).

Les pourcentages sont significativement plus faibles ($p < 0,05$) pour les travailleurs des deux autres groupes en ce qui concerne le stade 1.

Aucune différence significative ne se marque entre les 3 groupes pour les prévalences au stade 2.

E. Relations entre les plaintes MS et neurologiques relatives aux poignets et les résultats du questionnaire

Plusieurs modèles de régression logistique multiple ont été calculés selon une procédure pas à pas en utilisant, comme variable dépendante, soit l'existence ou non de plaintes MS au cours des 12 derniers mois au niveau du poignet, soit l'existence ou non de plaintes de picotements, et comme variables indépendantes les données du questionnaire.

Cette procédure statistique ne pose pas de problèmes pour les variables continues, telles que l'âge ou le poids. Par contre des variables provenant du questionnaire, telle que fumeur, sport, ont dû être recodées en deux classes: 0= absence du facteur (*exemple*: non-fumeur) et 1= présence du facteur (*exemple*: fumeur).

Certaines de ces données concernent les conditions de travail et sont donc redondantes avec la notion de "Groupe". C'est pourquoi deux analyses ont été réalisées systématiquement, l'une comprenant l'ensemble des données et l'autre ne retenant que la notion de groupe pour ce qui est des questions relatives au travail.

Les odds ratios (OR) obtenus dans cette étude transversale seront donc une estimation du rapport de prévalence de plaintes et non, au sens épidémiologique du terme, une estimation du risque relatif.

L'analyse multivariée a été conduite suivant la procédure « downward stepwise »: toutes les variables sont introduites initialement, puis, successivement, celle ayant le degré de signification statistique le plus faible est retirée. Le dernier pas d'analyse ou modèle de régression logistique multivariée ne comporte plus que les variables qui, compte tenu des effets des autres variables, restent associées à la variable dépendante avec une probabilité $p \leq 0,15$ (seuil préconisé par Hosmer et Lemeshow (1986) pour ce type d'analyse).

1. Plaintes musculosquelettiques au niveau des poignets/mains

Les résultats des analyses de régression logistique multiple sont présentés au tableau 5.9. Il en ressort que les résultats sont semblables quelle que soit l'approche: données relatives au travail et appartenance à l'un des trois groupes.

La probabilité de plaintes est plus importante du côté droit.

Quant aux caractéristiques personnelles, la probabilité est plus importante pour ceux qui jugent moins favorablement leur état de santé (mauvais et moyen); qui ont des difficultés dans la réalisation de tâches fines, et, de manière inattendue, les non-fumeurs ou anciens fumeurs. Une association semble également exister entre l'existence de maladies chroniques et l'existence de plaintes. Cette association n'est significative qu'à 5% et n'intervient que dans un seul des deux modèles.

Essentiellement deux variables relatives aux contraintes de travail du poste antérieur ressortent significativement des modèles, à savoir les efforts exercés par les poignets/mains et l'utilisation antérieure de machines vibrantes. Alors que l'association est positive quant aux efforts des poignets, elle est négative quant à l'utilisation de machines vibrantes et aux efforts de levage.

Les résultats présentés au tableau 5.9 montrent également que la probabilité de plaintes MS aux poignets est accrue pour les travailleurs exposés actuellement aux vibrations (OR = 9). Elle est également accrue, mais moins significativement pour les travailleurs du groupe 2 par rapport au groupe contrôle (OR=2).

Sans tenir compte de la répartition des travailleurs dans les trois groupes mais en considérant les caractéristiques actuelles du poste de travail, les efforts des poignets et l'utilisation de machines vibrantes (nombre d'heures d'utilisation par semaine) sont les deux facteurs associés à l'existence de plaintes MS.

TABLEAU 5.9 - Analyses de régression logistique multiple: plaintes MS au niveau des poignets et données du questionnaire (deux approches) (odds ratios, intervalles de confiance à 95% et signification statistique)

	O.R.	IC 95%	Signification
Conditions de travail:			
• Côté (gauche vs droit)	0,53	0,32 - 0,87	*
• Santé (mauvaise)	2,56	1,43 - 4,76	**
• Tâches fines (difficultés)	3,35	1,15 - 9,70	*
• Tabagie (oui vs non)	0,39	0,23 - 0,67	***
• Efforts poignets	2,86	1,55 - 5,29	***
• Machines vibrantes (écart 20 h/semaine)	4,49	2,60 - 7,76	***
• Efforts de levage aux postes antérieurs	0,50	0,25 - 0,99	*
• Efforts poignets aux postes antérieurs	3,83	1,85 - 7,96	***
• Machines vibrantes aux postes antérieurs	0,40	0,20 - 0,80	**
Groupes:			
• Groupe 2 vs Groupe 3	2,26	1,13 - 4,51	*
• Groupe 1 vs Groupe 3	9,06	4,39 - 18,73	***
• Côté (gauche vs droit)	0,55	0,34 - 0,89	*
• Santé (mauvaise)	2,38	1,35 - 4,35	**
• Tâches fines (difficultés)	3,24	1,11 - 9,49	*
• Tabagie (oui vs non)	0,42	0,25 - 0,70	***
• Maladies chroniques	2,01	1,02 - 3,99	*
• Efforts poignets aux postes antérieurs	2,51	1,49 - 4,23	***
• Machines vibrantes aux postes antérieurs	0,27	0,13 - 0,54	***

* $p < 0,05$

** $p < 0,01$

*** $p < 0,001$

2. Troubles neurologiques au niveau des poignets/mains

Les résultats de l'analyse de régression logistique multiple avec l'existence de troubles neurologiques comme variable dépendante sont présentés au tableau 5.10.

Les caractéristiques personnelles associées à l'existence de troubles neurologiques sont le mauvais jugement de l'état de santé et, à nouveau, paradoxalement, le fait de ne pas fumer.

TABLEAU 5.10 - Régression logistique multiple: plaintes neurologiques et données du questionnaire (odds ratios, intervalles de confiance à 95% et signification statistique)

	O.R.	IC 95%	Signification
Conditions de travail			
• Santé (mauvaise)	3,03	1,59 - 5,88	***
• Tabagie (oui vs non)	0,54	0,29 - 0,99	*
• Troubles de la mémoire	0,20	0,04 - 0,99	*
• Machines vibrantes (écart 20 h/semaine)	4,21	2,51 - 7,05	***
• Efforts poignets aux postes antérieurs	3,72	1,89 - 7,33	***
• Machines vibrantes aux postes antérieurs	0,39	0,17 - 0,88	*
Groupes			
• Groupe 1 vs Groupes 2 et 3	4,50	2,39 - 8,48	***
• Santé (mauvaise)	3,26	1,75 - 6,25	***
• Tabagie (oui vs non)	0,54	0,30 - 0,97	*
• Efforts poignets aux postes antérieurs	3,42	1,77 - 6,63	***
• Machines vibrantes aux postes antérieurs	0,23	0,10 - 0,52	***

* $p < 0,05$

*** $p < 0,001$

La probabilité semble plus faible également pour les sujets se plaignant de troubles de la mémoire. Quant aux contraintes de travail aux postes antérieurs, la probabilité est plus élevée en cas d'efforts fréquents avec les poignets: le O.R. est supérieur à 3 et très significatif quel que soit le modèle de régression logistique.

A nouveau, l'utilisation antérieure de machines vibrantes semble être associée à une diminution de la probabilité de troubles neurologiques. L'utilisation actuelle de machines vibrantes est par contre associée à une augmentation et c'est la seule contrainte du travail actuel qui semble intervenir. Ce fait se confirme dans le modèle calculé sur base des groupes où l'appartenance au groupe 1 plutôt qu'aux deux autres groupes donne un O.R. particulièrement significatif de 4,5.

L'appartenance au groupe 1 et le fait d'utiliser à l'heure actuelle des machines vibrantes apparaissent donc nettement associés à une augmentation de la probabilité de plaintes neurologiques.

III. LES TESTS FONCTIONNELS ET SENSITIFS

A. Moyennes des différents tests

Le tableau 5.11 reprend, pour chaque test réalisé à droite et à gauche lors de la première entrevue, les moyennes et écarts types par groupe de travailleurs.

La signification statistique des différences entre moyennes des groupes a été testée par des tests de "student" et est également présentée au tableau 5.11.

Les valeurs observées à droite et à gauche ne diffèrent pas, sauf en ce qui concerne la force de préhension maximale. Les valeurs des deux côtés seront dès lors confondues.

TABLEAU 5.11 - Moyennes (et écarts types) par test (à droite et à gauche), par groupe et signification statistique des différences entre groupes

	GR1	GR2	GR3	Tests-t		
	VIBRATIONS	TRAVAUX LOURDS	CONTROLES	GR1 vs GR2	GR2 vs GR3	GR1 vs GR3
B. Angles maximaux						
• Déviation cubitale (°)	32,1(6,0)	34,2(5,2)	35,7(5,0)	**	*	***
• Déviation radiale (°)	17,4(4,4)	15,6(4,9)	16,8(5,4)	**	-	-
• Extension (°)	72,5(9,1)	71,0(8,8)	71,9(8,3)	-	-	-
• Flexion (°)	57,2(8,3)	57,1(7,1)	59,9(8,5)	-	*	*
FMV (kg)	52,2(9,0)	50,5(10,3)	50,4(8,7)	-	-	-
C. Seuil perception pression	3,5(0,3)	3,3(0,3)	3,2(0,3)	***	*	***
• majeur (log force, réf 0,1mg)	3,5(0,3)	3,3(0,4)	3,2(0,3)	***	-	***
• auriculaire (log force, réf 0,1mg)	110,6 (6,5)	111,5 (6,3)	111,7 (6,6)	-	-	-
Seuil perception vibrations	105,7 (8,3)	103,1 (8,5)	100,9 (7,1)	*	-	**
• majeur 63 Hz (dB)	118,8 (5,7)	113,0 (6,1)	102,6 (8,3)	-	-	-
• majeur 125 Hz (dB)	101,7 (6,3)	102,5 (7,1)	112,9 (5,7)	-	-	-
• majeur 250 Hz (dB)	104,1 (8,2)	101,7 (8,2)	101,9 (6,0)	*	-	**
• auriculaire 63 Hz (dB)	2,8 (0,3)	2,7 (0,4)	100,8 (7,1)	**	-	-
• auriculaire 125 Hz (dB)	2,7 (0,3)	2,5 (0,4)	14,4 (1,7)	**	-	*
• auriculaire 250 Hz (dB)	14,4 (1,7)	13,6 (1,8)		*	*	-
Temps de latence sensitifs			2,8 (0,6)			
• index (ms)			2,6 (0,3)			
• auriculaire (ms)			14,4 (1,4)			
Test de dextérité						
• PPg (# tiges)						

- NS * p < 0,05 ** p < 0,01 *** p < 0,001

Les amplitudes articulaires maximales du poignet valent en moyenne, pour l'ensemble des travailleurs, 34° en déviation cubitale, 17° en déviation radiale, 72° en extension et 58° en flexion. Ces moyennes sont très proches de celles observées par Hoppenfeld et Hutton (1984) (hormis pour la flexion) qui valent respectivement 30°, 20°, 70° et 80°.

Des différences d'amplitudes articulaires s'observent entre les trois groupes de travailleurs mais elles ne sont pas systématiques. Il ressort par exemple que les travailleurs du groupe contrôle sont légèrement plus souples en flexion et en déviation cubitale.

La force de préhension maximale (FMV) est égale en moyenne à 51 kg et se rapproche fortement de la moyenne de 53 kg rapportée par Mathiowetz (1990) pour une population masculine de la même tranche d'âge. Aucune différence significative n'est observée entre les trois groupes de travailleurs.

Une différence statistiquement significative ($p < 0,05$) apparaît par contre lorsque l'on compare les forces maximales développées à la main droite (52,2 kg) et à la main gauche (50,0 kg).

Le seuil de perception à la pression (SPP) a été évalué au moyen des monofilaments de Semmes Weinstein. Les valeurs moyennes observées valent 3,3 et 3,4 respectivement pour les majeurs et les auriculaires. D'après

le tableau présenté par Bell-Krotoski (1990b), les travailleurs présenteraient une diminution de la perception du toucher léger (correspondant aux tiges 3,22 et 3,61). L'analyse ne met en évidence aucune différence entre les côtés gauche et droit. Par contre, des différences significatives existent entre les groupes et spécifiquement pour les travailleurs exposés aux vibrations qui présentent des seuils supérieurs en moyenne à ceux des deux autres groupes. Cependant, en pratique, cette différence est difficile à interpréter car, d'une part, elle ne correspond pas à un filament de différence et, d'autre part, elle ne révèle pas une atteinte plus importante puisque les travailleurs des 3 groupes présentent en moyenne une diminution du toucher léger.

Le test **du seuil de perception aux vibrations (SPV)** a été également réalisé sur les majeurs et les auriculaires. Aucune différence n'apparaît entre les 3 groupes, si ce n'est à la fréquence de test de 250 Hz, où le groupe 1 (exposé aux vibrations) présente en moyenne un seuil légèrement plus élevé (2 dB).

Les temps de latence sensitifs (TLS): Les moyennes observées dans les trois groupes peuvent être considérées comme « normales » car inférieures aux valeurs seuils (3,1 ms). Les seules différences concernent les travailleurs des groupes 1 et 2, les travailleurs exposés aux vibrations ayant, en moyenne, des temps de latence, légèrement supérieurs (donc moins bons) à ceux du deuxième groupe.

Test de dextérité manuelle (PPg): La moyenne observée dans les 3 groupes est d'environ 14 tiges placées en 30 secondes ce qui est inférieur de 2 tiges aux valeurs rapportées pour une population normale. Le groupe 2 se distingue des deux autres groupes avec, en moyenne, une tige en moins de placée.

B. Relations entre les tests fonctionnels et sensitifs

Le tableau 5.12 reprend les coefficients de corrélation calculés entre les différents tests fonctionnels et sensitifs. La signification statistique du coefficient de corrélation dépendant du nombre d'observations (354), le coefficient de corrélation est statistiquement significatif à 5% dès que supérieur à 0,1 et à 1% dès que supérieur à 0,2. Les relations entre tests pour lesquelles la variance commune est supérieure à 25% (R supérieur à 0,5) ont été repérées en gras et soulignées. C'est le cas uniquement pour les différents seuils de perception aux vibrations entre eux et entre les seuils de perception à la pression sur le majeur et sur l'auriculaire. Ces coefficients de corrélation varient entre 0,6 et 0,8.

Les différents tests de famille différente (angles, force, perception à la pression, perception aux vibrations, conduction nerveuse, dextérité manuelle) sont donc peu liés entre eux et sont par conséquent complémentaires pour caractériser les capacités fonctionnelles et sensitives des travailleurs au niveau des poignets/mains.

Tableau 5.12: Coefficients de corrélation entre les données des différents tests fonctionnels et sensitifs (R > 0.5)

	ANGLES MAXIMAUX				FMV	SPP		SPV 63 Hz		SPV 125 Hz.		SPV 250 Hz.		TLS		PPg
	DEVCUB	DEVRAD	EXT	FLEX		Maj.	Aur.	Maj.	Aur.	Maj.	Aur.	Maj.	Aur.	Ind.	Aur.	
Angles maximaux:																
• Déviation cubitale (°)	1.00															
• Déviation radiale (°)	-0.23	1.00														
• Extension (°)	0.25	0.05	1.00													
• Flexion (°)	0.42	0.09	0.08	1.00												
FMV (kg)	0.13	0.11	0.11	0.14	1.00											
Seuil de perception à la pression (SPP)																
• SPP majeur (log force)	-0.17	-0.09	-0.07	-0.23	-0.11	1.00										
• SPP auriculaire (log force)	-0.19	-0.06	-0.12	-0.26	-0.11	<u>0.76</u>	1.00									
Seuil de perception vibrations (SPV):																
• majeur à 63 Hz (dB)	0.02	-0.11	-0.06	-0.10	-0.07	0.21	0.23	1.00								
• auriculaire à 63 Hz (dB)	0.03	-0.08	-0.04	-0.08	-0.11	0.21	0.26	<u>0.62</u>	1.00							
• majeur à 125 Hz (dB)	0.01	-0.06	0.00	-0.09	-0.08	0.25	0.27	<u>0.81</u>	<u>0.59</u>	1.00						
• auriculaire à 125 Hz (dB)	0.00	-0.05	-0.03	-0.14	-0.14	0.24	0.31	<u>0.60</u>	<u>0.79</u>	<u>0.65</u>	1.00					
• majeur à 250 Hz (dB)	-0.06	0.02	-0.04	-0.07	-0.15	0.38	0.40	<u>0.60</u>	0.45	<u>0.77</u>	<u>0.59</u>	1.00				
• auriculaire à 250 Hz (dB)	-0.09	-0.04	-0.06	-0.13	-0.11	0.35	0.39	0.46	0.53	<u>0.59</u>	<u>0.71</u>	<u>0.75</u>	1.00			
Temps de latence sensitifs (TLS):																
• index (ms)	-0,08	0,05	-0,09	-0,15	0,12	0,31	0,25	0,19	0,02	0,08	0,00	0,38	0,03	1,00		
• auriculaire (ms)	-0,10	-0,04	0,07	-0,01	0,17	0,28	0,26	0,28	0,03	0,06	0,00	0,39	0,03	0,38	1,00	
Test de dextérité (PPg): (# tiges)	0,15	0,12	0,03	0,29	0,17	-0,09	-0,07	-0,25	-0,22	-0,24	-0,19	-0,21	-0,18	0,13	-0,05	1,00

C. Analyse multivariée entre les résultats des tests fonctionnels et sensitifs et les caractéristiques des travailleurs.

Les relations entre les résultats de chaque test fonctionnel et sensitif et les caractéristiques personnelles ont été étudiées par régression linéaire multiple selon une procédure pas à pas (« stepwise »).

Le tableau 5.13 reprend les résultats de ces régressions linéaires multiples en indiquant les variables associées significativement avec chacun des tests, le sens de l'association (par + ou -) et la signification du facteur dans le modèle.

L'âge est lié à une réduction des angulations maximales (en déviation radiale et en flexion), à une diminution de la dextérité manuelle et à une augmentation des seuils de perception, que ce soit à la pression ou aux vibrations. Le poids et la taille sont fortement associés aux tests fonctionnels (angulations maximales et force), mais peu aux tests sensitifs.

Comme vu précédemment, la force (FMV) à droite est supérieure à celle à gauche. Le facteur côté n'influence par contre guère les autres tests.

Le fait d'avoir été accidenté (hors du travail ou au travail) au niveau des membres supérieurs est associé à des capacités fonctionnelles (angles et force) plus faibles et à des seuils de perception à la pression plus élevés.

Par contre, des activités sportives actuelles sont associées à des angles maximaux plus importants et à des seuils de perception plus faibles aussi bien à la pression qu'aux vibrations.

Les autres facteurs, hobby, sport concernant le bras, ancienneté au poste de travail, et les facteurs liés à la santé psychique (fatigue anormale, irritation, mal de tête) apparaissent liés de manière non systématique avec les résultats des différents tests sauf peut-être en ce qui concerne la fatigue anormale qui est associée à des seuils de perception plus faibles.

Les plaintes (gênes, douleurs, inconforts ou picotements) éprouvées au cours des 12 derniers mois au niveau des poignets sont associées à des angles en flexion maximale plus faibles et, d'autre part, à des seuils de perception à la pression plus élevés. Cette association est étudiée au point suivant de manière plus complète par analyse de régression logistique.

TABLEAU 5.13 - Régressions linéaires multiples entre les résultats des tests fonctionnels et sensitifs et les caractéristiques principales des travailleurs.

	ANGLES MAXIMAUX				FMV	SPP		SPV 125		TLS		PPg
	DEVCU B	DEVRA D	EXT	FLEX		Maj.	Aur.	Maj.	Aur.	Ind.	Aur.	
Côté (0=Dr, 1=Ga)					_*				_**			
Age (ans)		_**		_***		+***	+***	+**	+*			_***
Poids (Kg)	_***	+*	_*	_***	+**		+*					_***
Taille (cm)	+*		+***	+***	+***			+***			+***	
Ancienneté (entreprise)					_*			+**	+*			
Ancienneté (au poste)		+*										
Accidentés MS	_**		_*		_***	+**	+**					
Tabagie	_**			_*						_*		_**
Alcool					+***	+***	+***					
Sport (MS)	+***		+**			_*	_***	_*	_*			
Sport				+***								
Hobbies								_**				
Fatigue anormale		_*				_*		_*	_*	+*		
Irritabilité					+*							_*
Céphalées	+***			+*								
Plaintes aux poignets				_**		+***	+***					

* p < 0,05 ** p < 0,01 *** p < 0,001

DEVCUB: Déviation cubitale (°)
 DEVRAD: Déviation radiale (°)
 EXT: Extension (°)

FLEX: Flexion (°)
 FMV: Force maximale volontaire (Kg)
 SPP: Seuil de perception à la pression (log force)

SPV: Seuil de perception aux vibrations (dB)
 TLS: Temps de latence sensitif (ms)
 PPg: Dextérité manuelle (# tiges)

D. Associations entre les plaintes neurologiques et les résultats des tests fonctionnels et sensitifs

Des analyses de régression logistique supplémentaires ont été réalisées afin d'étudier l'association entre les résultats des tests et les troubles neurologiques périphériques.

Dans ce but, les résultats des tests ont été ajoutés individuellement aux deux modèles décrits précédemment au tableau 5.10 afin de prendre en compte l'influence des variables personnelles qui se sont déjà avérées associées aux picotements.

Bien que n'étant pas associé aux plaintes, l'âge a été introduit dans les modèles pour tenir compte de son influence principalement sur les différents tests sensitifs (voir tableau 5.13).

A nouveau, les deux approches ont été utilisées: c.à.d. les données du questionnaire relatives au travail ou l'appartenance à un des groupes. Dans les deux approches, seuls les données de trois tests semblent significativement associées à l'existence de troubles neurologiques. Ces données sont une plus petite amplitude maximale en flexion et des seuils de sensibilité à la pression plus importants pour les majeurs et auriculaires.

Les résultats obtenus par les deux approches sont présentés au tableau 5.14. Les odds ratios ont été calculés pour une diminution de 5° en flexion et une augmentation de 0,2 pour les seuils de perception de pression. Ces variations correspondent aux différences moyennes entre les sujets avec et sans plaintes.

TABLEAU 5.14 - Analyse de régression logistique: plaintes neurologiques (picotements) et résultats des tests pris séparément, compte tenu des données du questionnaire (odds ratio, intervalles de confiance à 95% et signification statistique)

	O.R.	IC 95%	Signification
Données du questionnaire + test:			
• Flexion maximale (°)	1,31	1,07 - 1,60	**
• SPP majeur (log force, réf. 0,1 mg)	1,21	0,99 - 1,48	*
• SPP auriculaire (log force, réf. 0,1 mg)	1,29	1,06 - 1,58	**
Appartenance à un groupe + test:			
• Flexion maximale (°)	1,34	1,11 - 1,63	**
• SPP majeur (log force, réf.0,1 mg)	1,22	0,99 - 1,49	*
• SPP auriculaire (log force, réf. 0,1 mg)	1,32	1,08 - 1,62	**

* p < 0,05

** p < 0,01

SPP: seuil de perception à la pression

OR flexion maximale: diminution de 5°

OR SPP (seuil de perception à la pression): augmentation de 0,2

Une autre approche a consisté à introduire, dans les modèles décrits au tableau 5.10, tous les résultats des tests simultanément.

Il ressort du tableau 5.15 que deux des tests sont systématiquement associés à l'existence de picotements, à savoir une plus petite amplitude maximale en flexion et un seuil de perception à la pression plus élevé au niveau des auriculaires.

TABLEAU 5.15 - Analyse de régression logistique: plaintes neurologiques (picotements) résultats des tests pris simultanément, compte tenu des données du questionnaire (odds ratio, intervalles de confiance à 95% et signification statistique)

	O.R.	IC 95%	Signification
--	------	--------	---------------

Données du questionnaire + tests:			
• Flexion maximale (°)	1,26	1,02 - 1,55	*
• SPP auriculaire (log force, réf. 0,1mg)	1,23	1,00 - 1,51	*
Appartenance à un groupe + tests:			
• Flexion maximale (°)	1,31	1,07 - 1,61	**
• SPP auriculaire (log force, réf. 0,1mg)	1,29	1,03 - 1,63	*

* p < 0,05

** p < 0,01

SPP: seuil de perception à la pression

OR flexion maximale: diminution de 5°

OR SPP (seuil de perception à la pression): augmentation de 0,2

Les mêmes calculs ont été réalisés en prenant comme variable dépendante l'existence ou non de TMS au niveau des poignets.

Quelle que soit l'analyse réalisée, c.à.d. en tenant compte des données du questionnaire ou l'appartenance à un groupe, et en introduisant les résultats des tests l'un après l'autre ou simultanément, les résultats obtenus sont identiques. Le seul test associé à l'existence de TMS est une moindre amplitude maximale en flexion, les travailleurs souffrant de TMS présentant une flexion maximale inférieure (OR = 1,3 pour une diminution de 5°).

E. Relation entre la définition subjective de l'atteinte neurologique (Stockholm) et les tests fonctionnels et sensitifs

Comme vu précédemment (tableau 5.8), aucun travailleur ne présente des troubles neurologiques au stade 3 de l'échelle de Stockholm et très peu sont atteints au stade 2.

Les résultats des tests fonctionnels et sensitifs ne sont pas significativement différents (test t non pairés) entre les sujets atteints au stade 1 et ceux au stade 2. La comparaison se fera dès lors sur base des 354 poignets (177 travailleurs), entre les non atteints (n = 285, stade 0) et les atteints (n = 69, stades 1 et 2).

Les sujets atteints sont en moyenne plus âgés (p < 0,01) (tableau 5.16).

TABLEAU 5.16 - Comparaison des résultats des tests fonctionnels et sensitifs chez les sujets non atteints (stade 0) et atteints (stades 1 ou 2) de troubles neurologiques

	Non atteints m (s)	Atteints m (s)	Signification	
			non ajusté	ajusté pour l'âge
Age (années)	34,9 (6,9)	37,5 (6,4)	**	-
D. Angles maximaux				
• Déviation cubitale (°)	33,9 (5,6)	33,3 (6,0)	-	-
• Déviation radiale (°)	16,8 (5,0)	16,0 (4,5)	-	-
• Extension (°)	71,7 (8,9)	72,5 (8,2)	-	-
• Flexion (°)	58,8 (7,9)	54,2 (7,6)	***	***
FMV (kg)	51,4 (9,2)	50,1 (10,0)	-	-
E. Seuil perception pression				
• majeur (log force, réf 0,1mg)	3,31 (0,36)	3,52 (0,29)	***	***
• auriculaire (log force, réf 0,1mg)	3,30 (0,36)	3,55 (0,32)	***	***
Seuil perception vibrations				
• majeur 63 Hz (dB)	110,9 (6,2)	112,6 (7,3)	*	-
• majeur 125 Hz (dB)	100,3 (6,9)	102,5 (8,0)	*	-
• majeur 250 Hz (dB)	103,5 (8,2)	105,9 (9,0)	*	-
• auriculaire 63 Hz (dB)	112,4 (5,6)	112,8 (7,0)	-	-
• auriculaire 125 Hz (dB)	101,8 (6,2)	103,0 (7,8)	-	-
• auriculaire 250 Hz (dB)	102,0 (7,8)	104,1 (8,9)	-	-
• auriculaire 250 Hz (dB)	2,74 (0,44)	2,89 (0,37)	*	-
	2,62 (0,31)	2,57 (0,29)	-	-
Temps de latence sensitifs				
• index (ms)	14,3 (1,6)	13,6 (1,8)	*	-
• auriculaire (ms)				
Test de dextérité: PPg (# tiges)				

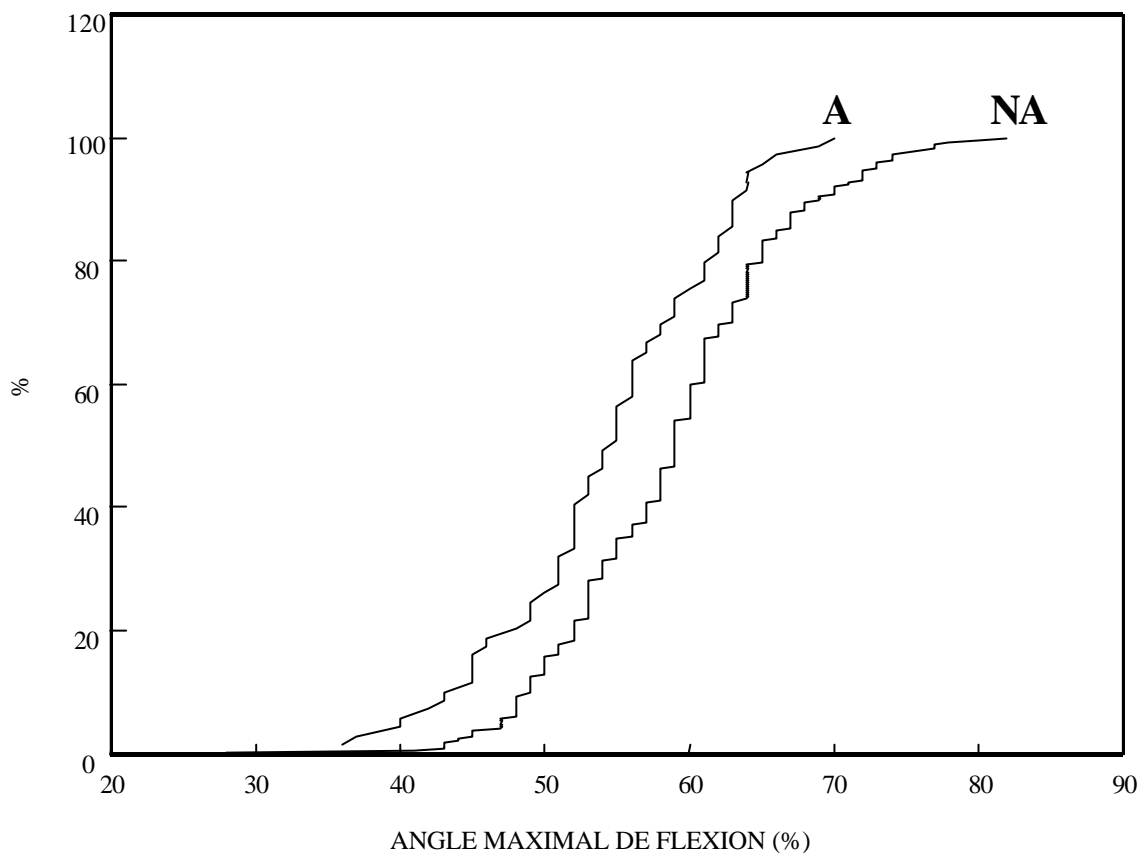
- NS * p < 0,05 ** p < 0,01 *** p < 0,001

Comme le montre le tableau 5.16, il est impératif de tenir compte du facteur âge pour comparer les résultats des tests des poignets atteints et non atteints. C'est ainsi que les seuils de sensibilité aux vibrations (majeur), le temps de latence sensitif (index, nerf médian) et les résultats du test au Purdue Pegboard ne sont pas différents lorsque les données sont ajustées pour l'âge. Les poignets atteints présentent une réduction de flexion maximale de l'ordre de 5° et une diminution de sensibilité à la pression aussi bien au niveau du majeur que de l'auriculaire. Les deux groupes présentent en moyenne une diminution de la perception du toucher léger (Bell-Krotoski, 1990b) (filament supérieur à 2.83). On observe également une diminution de la sensation de protection, au sens donné par Bell-Krotoski, pour 16% des atteints et 4% environ des non atteints.

Les histogrammes cumulés des résultats des tests pour les atteints et les non atteints ne permettent pas de déterminer une valeur seuil séparant les deux groupes. La figure 5.3 illustre ceci pour la flexion maximale du poignet, paramètre distinguant le mieux les deux groupes. Une valeur limite de 70° en flexion maximale donnerait par exemple une sensibilité (détection des vrais atteints) de 100 % mais une spécificité (rejet des

vrais non atteints) d'à peine 15%, tandis qu'une valeur de 60° donnerait une sensibilité de 75 % et une spécificité de 40%.

FIGURE 5.3 - Histogrammes cumulés de l'angle maximal de flexion pour les poignets atteints (A) et non atteints (NA) de troubles neurologiques



IV. Probabilité de plaintes musculosquelettiques et neurologiques et contraintes biomécaniques et vibratoires au poste de travail

Des modèles de régression logistique ont été calculés pour prédire la probabilité de plaintes soit MS, soit neurologiques, au niveau du poignet, en fonction des caractéristiques personnelles (mises en évidence aux tableaux 5.9 et 5.10), des contraintes biomécaniques (moyenne des paramètres relatifs d'angles, de force, de répétitivité et de vitesse angulaire) et des contraintes vibratoires (pourcentage d'utilisation des machines, nombre d'années d'exposition, accélération d'exposition personnelle et dose vibratoire personnelle (tableau 4.6)).

Comme montré par Malchaire et Cock (1995), les contraintes biomécaniques à un poste de travail sont le mieux décrites par les moyennes des paramètres obtenus par mesurages sur différents travailleurs. Vu la corrélation importante (chapitre 3) existant entre la moyenne et le pourcentage de temps au-dessus d'un certain seuil, seule la moyenne de chaque paramètre de contrainte sera considérée dans les analyses multivariées.

Les tableaux 5.17 et 5.18 reprennent les résultats de ces modèles logistiques pour respectivement les TMS et les troubles neurologiques. Dans un premier modèle, les paramètres de contraintes ont été introduits séparément avec les caractéristiques personnelles. Dans un second, ils ont été introduits simultanément et une procédure d'élimination pas à pas (stepdown) a été adoptée pour aboutir au modèle final ne contenant que les paramètres significatifs au seuil de 5%.

Les odds ratios ont été à chaque fois calculés pour une variation de 10 du paramètre de contrainte considéré (10%, 10 #/min, 10 ms², 10 ms² an^{0.5}).

Mis à part les vitesses angulaires, les paramètres de contraintes biomécaniques et vibratoires sont associés positivement aux plaintes MS et neurologiques.

Lorsque les paramètres de contraintes sont pris en compte simultanément, les paramètres de force (OR = 2,05) et la durée d'utilisation des machines vibrantes (OR = 1,31) sont associés ($p < 0,05$), à nouveau positivement, aux plaintes MS.

Pour les plaintes neurologiques, les contraintes associées ($p < 0,05$) sont la moyenne relative en flexion-extension (mFr), la répétitivité en force (rEMG) et la dose vibratoire personnelle (dose HAV) (OR = 1,47). L'association avec la durée d'utilisation (OR = 1,24) et l'accélération d'exposition personnelle (OR = 4,70) est également significative lorsque ces paramètres sont introduits à la place de la dose (tableau 5.18).

TABLEAU 5.17 - Régression logistique multiple: probabilité de plaintes MS au niveau du poignet et contraintes biomécaniques et vibratoires (odds ratios, intervalles de confiance à 95 % et signification statistique)

Paramètres de contrainte	O.R.	IC 95 %	Signification
Paramètres introduits séparément			
• mDr (%)	2,32	(1,66 - 3,23)	***
• mFr (%)	2,06	(1,36 - 3,13)	***
• mEMGr (%)	1,82	(1,47 - 2,25)	***
• rANG (#/min)	1,26	(1,14 - 1,40)	***
• rEMG (#/min)	2,43	(1,56 - 3,79)	***
• mVD (°/s)	-	-	-
• mVF (°/s)	-	-	-
• Durée HAV (%)	7,87	(2,90- 21,38)	***
• A _{EP} (ms ⁻²)	1,63	(1,34 - 1,98)	***
• Dose HAV (ms ⁻² an ^{0,5})	2,09	(1,41 - 3,10)	***
Paramètres introduits simultanément			
• mEMGr (%)	1,46	(1,16 - 1,83)	**
• rEMG (#/min)	2,05	(1,25 - 3,37)	**
• Durée HAV (%)	1,31	(1,07 - 1,61)	**

- NS ** P < 0,01 *** P < 0,001

ANGLES moyenne relative en déviation: mDr (%)
 moyenne relative en flexion-extension: mFr (%)
 REPETITIVITE répétitivité angulaire: rANG (#/min)
 répétitivité en EMG: rEMG (#/min)
 FORCES moyenne relative de l'EMG: mEMGr(%)
 VITESSES moyenne de la vitesse en déviation: mVD (°/s)
 moyenne de la vitesse en flexion-extension: mVF (°/s)
 VIBRATIONS durée d'utilisation des machines vibrantes: durée HAV (%)
 accélération d'exposition personnelle: A_{EP} (ms⁻²)
 dose vibratoire personnelle: Dose HAV (ms⁻² an^{0,5})

TABLEAU 5.18 - Régression logistique multiple: probabilité de plaintes neurologiques et contraintes biomécaniques et vibratoires (odds ratios, intervalles de confiance à 95 % et signification statistique)

Paramètres de contrainte	O.R.	IC 95 %	Signification
Paramètres introduits séparément			
• mDr (%)	1,82	(1,34 - 2,49)	***
• mFr (%)	2,58	(1,75 - 3,79)	***
• mEMGr (%)	1,66	(1,37 - 2,02)	***
• rANG (#/min)	1,23	(1,09 - 1,39)	***
• rEMG (#/min)	1,99	(1,19 - 3,31)	***
• mVD (°/s)	-	-	-
• mVF (°/s)	-	-	-
• Durée HAV (%)	8,82	(3,50 - 22,20)	***
• A _{EP} (ms ⁻²)	1,37	(1,17 - 1,60)	***
• Dose HAV (ms ⁻² an ^{0,5})	1,86	(1,33 - 2,60)	***
Paramètres introduits simultanément			
• mFr (%)	2,29	(1,54 - 3,42)	***
• rEMG (#/min)	1,80	(1,06 - 3,06)	*
• soit dose HAV (ms ⁻²)	1,47	(1,01 - 2,14)	*
• soit A _{EP} (ms ⁻²)	4,70	(1,70 - 12,98)	**
• soit durée HAV (%)	1,24	(1,05 - 1,47)	*

- NS ** P < 0,01 *** P < 0,001

ANGLES moyenne relative en déviation: mDr (%)
 moyenne relative en flexion-extension: mFr (%)
 REPETITIVITE répétitivité angulaire: rANG (#/min)
 répétitivité en EMG: rEMG (#/min)
 FORCES moyenne relative de l'EMG: mEMGr(%)
 VITESSES moyenne de la vitesse en déviation: mVD (°/s)
 moyenne de la vitesse en flexion-extension: mVF (°/s)
 VIBRATIONS durée d'utilisation des machines vibrantes: durée HAV (%)
 accélération d'exposition personnelle: A_{EP} (ms⁻²)
 dose vibratoire personnelle: Dose HAV (ms⁻² an^{0,5})

Ces calculs ont été répétés en caractérisant cette fois l'exposition aux vibrations par les valeurs non pondérées de A_{EP} et de dose vibratoire. Les conclusions de l'analyse logistique sont les mêmes pour le modèle relatif aux plaintes MS. Par contre, en ce qui concerne les plaintes neurologiques, l'association est beaucoup moins nette avec l'accélération d'exposition personnelle non pondérée (OR = 1,31) et elle disparaît avec la dose vibratoire non pondérée (p = 0,13).

La différence entre les accélérations d'exposition personnelle (ou entre la dose) non pondérée et pondérée est d'autant plus grande que la machine produit des vibrations de hautes fréquences. Pour tenir compte de cet effet, la différence entre les deux doses a été introduite dans le modèle de régression logistique avec la dose vibratoire pondérée.

Ces paramètres se sont tous deux avérés non significatifs dans le modèle ainsi construit.

I. INCIDENCES

A. Population

Tous les travailleurs de la première année n'ont pu être revus les deuxième et/ou troisième années pour des raisons diverses: mutations de poste de travail, refus de collaboration à la suite de l'étude, départs de l'entreprise, absence lors des campagnes d'interviews pour cause de maladie ou d'accidents, ...

Les raisons exactes de ces absentéismes ont été recherchées dans la mesure du possible. On peut en conclure, qu'à une exception près (1 travailleur opéré au niveau du poignet), les problèmes de TMS du membre supérieur n'en sont pas la cause directe.

Sur les 177 travailleurs de la première année (respectivement 69, 62 et 46 pour les trois groupes), 152 ont été revus la deuxième année (57, 55 et 40) et 137 la troisième année (47, 51 et 39).

Le protocole de l'interview et de l'examen a été quelque peu modifié, afin d'en limiter au maximum la durée et de perturber le moins possible l'organisation du travail. L'examen clinique du travailleur a été limité aux poignets et la classification de Stockholm n'a été utilisée que pour les troubles neurologiques.

B. Incidences de plaintes musculosquelettiques au niveau de la nuque, des épaules, des coudes, des poignets et du dos et des plaintes neurologiques au niveau des mains

L'incidence étant le nombre de nouveaux cas, les travailleurs se plaignant la première année ont été exclus et les effectifs sont différents pour chaque région anatomique.

Dans le cas de la nuque par exemple, 94 travailleurs n'avaient pas de plaintes la première année. 84 ont été revus la deuxième année et 23 avaient souffert de TMS la deuxième année. Sur les 61 autres sujets, 52 furent revus la troisième année et 3 avaient souffert de TMS. Ainsi, sur un effectif total de 84 personnes, 26 se sont plaints de TMS pour la première fois au cours des deux années et l'incidence annuelle est égale à 15,5 %.

TABLEAU 6.1 – Incidences des plaintes MS et neurologiques (picotements) relevées par le questionnaire

	Effectifs				Incidences (%)				Chi ²
	Total	GR1	GR2	GR3	Total	GR1	GR2	GR3	
Nuque	84	29	32	23	15,5	12,1	21,9	10,9	-
Epaules	118	40	43	35	6,4	22,5	14,0	4,3	**
à droite	127	43	48	36	11,8	19,8	11,5	2,8	**
à gauche	130	47	44	39	9,6	17,0	5,7	5,1	**
Coudes	121	36	49	36	9,9	12,5	11,2	5,6	-
à droite	126	39	51	36	8,7	12,8	9,8	2,8	-
à gauche	137	46	53	38	8,0	10,9	8,5	3,9	-
Poignets	70	18	23	29	17,9	19,4	15,2	19,0	-
à droite	81	21	28	32	17,3	19,0	16,1	17,2	-
à gauche	100	27	40	33	11,5	20,4	8,8	7,6	*
Picotements	115	35	45	35	13,0	18,6	11,1	10,0	-
à droite	122	37	49	36	12,7	17,6	11,2	9,7	-
à gauche	126	42	46	38	8,7	16,7	4,3	5,3	**
TMSMS*	53	12	18	23	26,4	20,8	33,3	23,9	-
à droite	67	16	25	26	21,6	18,8	26,0	19,2	-
à gauche	88	26	31	31	21,0	26,9	19,4	17,7	-
Bas du dos	36	9	12	15	25,0	22,2	25,0	26,7	-

- NS * p < 0,05 ** p < 0,01

* TMSMS: au moins une des 3 régions du membre supérieur (épaule, coude ou poignet) est atteinte

Le tableau 6.1 reprend, pour chacun des trois groupes de travailleurs, les effectifs de départ et les incidences calculées de la même manière pour les différentes régions anatomiques.

L'incidence de plaintes neurologiques (picotements) a été réalisée en considérant comme "cas" les sujets avec symptômes aux stades 1, 2 ou 3 de l'échelle de Stockholm: en effet, il ne fut constaté la seconde année que 1 cas au stades 3 et 4 cas au stade 2, dont 2 évoluèrent vers le stade 3 au cours de la troisième année (2 des 3 stades 3 observés concernent en fait le même travailleur du groupe 1, côtés gauche et droit).

Des différences significatives sont observées entre les 3 groupes en ce qui concerne les incidences de TMS au niveau des 2 épaules et du poignet gauche (tant pour les plaintes MS que pour les picotements): les incidences pour le groupe 1 sont 2 à 5 fois supérieures à celles pour les groupes 2 (travaux lourds) et 3 (contrôle). Les prévalences de plaintes MS étaient telles la première année (dos: > 70 %; membre supérieur global: 60 %; poignets: 30 à 70 %), que les incidences sur les sujets restants sont difficilement interprétables.

Ainsi, il est a priori surprenant de ne pas observer de différences significatives d'incidences entre les 3 groupes pour les plaintes MS au poignet droit, alors que les prévalences étaient nettement supérieures pour le groupe 1. En fait, les travailleurs du groupe 1 sans plaintes la première année proviennent principalement des postes 1 (boulonneurs) et 2 (finition) qui, en termes de durée d'exposition journalière mais aussi d'amplitude des vibrations, sont les postes les moins contraignants (voir tableau 4.5).

C. Incidences des pathologies au niveau du poignet relevées lors de l'examen clinique

17 personnes ont développé une pathologie au niveau des poignets (14 la deuxième année et 3 la troisième année).

Ces nouveaux cas concernent essentiellement le poignet droit (13). Il s'agit de

- 11 ténosynovites (2 à gauche et 9 à droite dont 5 dans le groupe 1 pour 2 dans chacun des deux autres groupes);
- 2 kystes synoviaux dans le groupe 2 (1 à droite et 1 à gauche);
- 3 ténosynovites de de Quervain (à droite), 2 dans le groupe 2 et 1 dans le groupe 1;
- 1 syndrome du canal carpien (groupe 2, à droite).

Calculées comme pour les plaintes ci-dessus, les incidences annuelles de pathologie du poignet sont égales à 3,6 % et 1,4 % respectivement à droite et à gauche. A droite, elles sont égales pour les groupes 1 et 2 (3,9 et 4,0%) et supérieures à celle du groupe 3 (2,6%).

D. Incidence de plaintes avérées MS et neurologiques au niveau du poignet

1. Définition du degré de sévérité des plaintes

Comme indiqué ci-dessus, la non prise en compte des travailleurs se plaignant la première année conduit à des effectifs insuffisants pour l'étude de l'apparition des plaintes tant MS que neurologiques. Aussi a-t-il été décidé de s'intéresser à l'évolution plutôt qu'à l'apparition des plaintes.

Lors des interviews, trois questions supplémentaires étaient posées pour définir le degré de l'atteinte musculosquelettique:

- le caractère de la gêne: fatigue, douleurs diffuses ou douleurs bien localisées et aiguës;
- la durée de la gêne: disparaît après environ 2 heures, disparaît le lendemain, persiste plus longtemps;
- la fréquence des épisodes: rarement, parfois, souvent ou toujours.

A partir de ces données, les plaintes MS des travailleurs ont été classées en deux catégories:

- peu avérées;
- avérées: soit douleurs aiguës et localisées, soit problème persistant plus longtemps qu'un jour, soit problème survenant souvent ou toujours (c.à.d. au moins une fois par semaine).

De la même manière, les plaintes neurologiques (stade 1, 2 ou 3) ont été classées, sur base de la fréquence de survenue des picotements, en:

- peu avérées;
- avérées: survenant souvent ou toujours.

2. Incidences de plaintes "avérées"

L'incidence de plaintes "avérées" a été calculée pour les trois groupes en éliminant les travailleurs présentant des plaintes avérées la première année. Ces incidences sont données au tableau 6.2 par groupe de travailleurs pour des plaintes soit à droite, soit à gauche, soit à droite et/ou à gauche.

TABLEAU 6.2 - Incidences des plaintes MS et neurologiques (picotements) "avérées" au niveau du poignet par travailleur

	Effectifs (nombre de travailleurs)				Incidences (%)				Chi ²
	Total	GR1	GR2	GR3	Total	GR1	GR2	GR3	
TMS poignets	107	34	38	35	13,1	17,6	13,2	8,6	-
à droite	114	37	40	37	11,8	14,9	12,5	8,1	-
à gauche	122	38	48	36	8,6	14,5	7,3	4,2	*
Troubles neurologiques	136	43	54	39	8,5	14,0	7,4	3,8	*
à droite	138	45	54	39	6,9	12,2	5,6	2,6	*
à gauche	141	47	54	40	6,7	12,8	4,6	2,5	*

- NS * p < 0,05

Tout comme pour les prévalences (chapitre 5), les incidences de picotements avérées pour le groupe exposé aux vibrations (groupe 1) sont plus du double de celles pour le groupe exposé à des travaux lourds (groupe 2) et 3 à 4 fois supérieures à celles pour le groupe contrôle (p < 0,05). Elles sont d'environ 12 % dans le groupe 1, et ce aussi bien pour le poignet droit que pour le gauche. Les incidences TMS avérées sont aussi plus importantes pour le groupe 1 (environ 15%) mais de manière significative seulement du côté gauche, les incidences pour les 2 autres groupes étant relativement élevées à droite (12,5 et 8,1%).

3. Incidences de plaintes avérées en terme de poignets

Les plaintes, les caractéristiques fonctionnelles et sensibles et les contraintes biomécaniques et vibratoires ayant été quantifiées séparément pour les deux poignets, les analyses multivariées seront conduites sur base des poignets et non des travailleurs. Sur les 374 poignets vus la première année, 236 et 279 ne faisaient pas l'objet de plaintes "avérées" respectivement musculosquelettiques et neurologiques et ont été revus par la suite. Au cours des deux années suivantes, des plaintes "avérées" MS et neurologiques sont apparues respectivement pour 48 et 38 poignets, soit des incidences annuelles moyennes de 10,2 et de 6,8 %. La répartition des effectifs en terme de poignets et le nombre de nouveaux cas sont repris au tableau 6.3 pour les 3 groupes de travailleurs et pour les 8 postes du groupe 1.

La comparaison des incidences entre les trois groupes en terme de poignets aboutit aux mêmes conclusions que celle menée en terme de sujets:

- le nombre de nouveaux cas de plaintes "avérées" MS est significativement plus important dans le groupe 1: incidences annuelles pour les trois groupes: 14,7%, 9,7% et 6,2%;
- c'est également vrai pour les troubles neurologiques avérées: 12,5%, 5,1% et 2,5% pour les 3 groupes.

TABLEAU 6.3 - Nombre de nouveaux cas de plaintes avérées (MS et neurologiques) en terme de poignets, par groupe et par poste pour le groupe 1

	Plaintes MS "avérées"		Plaintes neurologiques "avérées"	
	Effectifs (nombre de poignets)	Nombre de nouveaux cas	Effectifs (nombre de poignets)	Nombre de nouveaux cas
Postes du groupe 1				
1. Boulonneurs	19	1	21	0
2. Finition	16	0	22	2
3. Rocteurs	6	6	8	3
4. T. pierre	16	2	15	2
6. Palettes	6	6	12	8
7. Sièges	4	2	5	1
8. Wagons	2	2	5	3
9. Canons	6	3	4	4
Groupe 1	75	22	92	23
Groupe 2	88	17	108	11
Groupe 3	73	9	79	4
Total	236	48	279	38

Parmi les 8 postes du groupe 1, trois se distinguent par leur faible incidence de TMS et de troubles neurologiques. Ce sont ceux pour lesquels les effectifs étaient les plus importants au départ, ainsi qu'après application du critère de participation à l'étude prospective, ceci expliquant d'ailleurs cela, une faible incidence entraînant une faible prévalence.

Pour les autres postes de travail du groupe 1, les incidences annuelles sont de 40% pour les TMS et de 28% pour les troubles neurologiques.

II. PROBABILITE DE PLAINTES "AVEREES" MS, FACTEURS PERSONNELS ET CONTRAINTES BIOMECHANIQUES ET VIBRATOIRES

Tout comme pour l'analyse transversale (chapitre 5), la relation entre la probabilité de développer des plaintes MS et les contraintes biomécaniques et vibratoires au poste de travail sera étudiée en tenant compte des facteurs personnels et en caractérisant ces contraintes de trois manières:

- en tenant compte uniquement de la répartition entre les 3 groupes;
- en se basant sur l'opinion des travailleurs à propos de leur poste de travail actuel (charge de travail, effort des poignets, machines vibrantes, ...);
- en utilisant les résultats des mesurages réalisés aux postes de travail (chapitres 3 et 4).

Les résultats de ces trois approches sont présentés ensemble pour les groupes et l'opinion des travailleurs puis séparément pour les paramètres mesurés.

A. Analyse sur base des groupes et des données des interviews

L'exposition professionnelle est donc ici caractérisée soit par l'appartenance à un des groupes, soit par la description donnée par chaque travailleur. Deux modèles de régression logistique ont ainsi été calculés par élimination successive pour ne conserver que les facteurs significatifs ($p < 0,05$) (tableau 6.4).

TABLEAU 6.4 - Analyse de régression logistique multivariée: probabilité de plaintes "avérées" musculosquelettiques en fonction des données du questionnaire

	OR	IC 95 %	Signification
Groupes:			
groupe 1 VS groupes 2 et 3	3,16	1,48 - 6,74	**
poids (écart de 10 kg)	1,33	1,02 - 1,73	*
taille (écart de 10 cm)	0,80	0,70 - 0,91	***
maladies chroniques	4,42	1,77 - 11,04	**
irrité	8,56	1,98 - 37,13	**
ancienneté au poste (écart de 1an)	0,92	0,86 - 0,97	**
Conditions de travail			
côté (droite vs gauche)	2,47	1,08 - 5,65	*
maladies chroniques	1,62	1,74 - 14,72	**
irrité	15,30	2,73 - 85,75	**
ancienneté au poste (écart de 1 an)	0,90	0,84 - 0,96	*
machines vibrantes (écart de 20h/sem.)	5,11	2,21 - 11,81	***
fatigue dans les poignets fréquente	5,53	1,86 - 16,48	**

* $p < 0,05$ ** $< 0,01$ *** $p < 0,001$

Les variables "indépendantes" prises en compte ont été les données de l'interview: facteurs personnels et psychosociaux et les facteurs relatifs aux postes de travail actuels.

Il a été vu précédemment (tableau 5.5) que les conditions de travail antérieures ont été jugées différemment en moyenne par les trois groupes de travailleurs, principalement en ce qui concerne les efforts des poignets et l'utilisation de machines vibrantes. De ce fait les facteurs professionnels des postes antérieurs n'ont pas été pris en compte dans les modèles logistiques finaux.

En tenant compte des conditions de travail, la probabilité de plaintes avérées MS est associée avec le côté (plus importante à droite), l'existence de maladies chroniques, la fréquence à laquelle le travailleur se sent irrité sans raison particulière, l'utilisation de machines vibrantes et une fatigue fréquente au niveau des poignets, tandis qu'elle diminue avec l'ancienneté au poste de travail.

Lorsque les conditions de travail sont décrites par l'appartenance à un groupe, les mêmes associations sont observées, à l'exception de celle avec le côté gauche ou droit, tandis qu'interviennent le poids (positivement) et la taille (négativement). L'appartenance au groupe 1 et donc l'utilisation de machines vibrantes entraîne un risque plus important ($OR = 3$) de plaintes MS "avérées" par rapport aux deux autres groupes.

B. Analyse sur base des contraintes biomécaniques et vibratoires mesurées aux postes de travail

Les variables caractéristiques des postes sont celles présentées aux chapitres 3 et 4 et utilisées lors de l'étude transversale (chapitre 5.IV), à savoir, les moyennes relatives des paramètres d'angles, de force, de répétitivité et de vitesses angulaires, ainsi que le pourcentage du temps d'utilisation des machines vibrantes, le nombre d'années d'exposition, l'accélération d'exposition personnelle pondérée et la dose vibratoire.

Le modèle de régression logistique du tableau 6.4 a été réutilisé en introduisant séparément puis simultanément chacun des facteurs de contrainte, à la place de la classification en groupes. Le tableau 6.5 donne les résultats. Les odds ratios et leurs intervalles de confiance à 95 % ont été calculés pour une variation de 10 du paramètre: (10%, 10 #/min, 10°/s, 10ms⁻² ou 10 ms⁻² an^{0,5}, selon le paramètre).

TABLEAU 6.5 - Analyse de régression logistique multivariée: probabilité de plaintes MS avérées en fonction de contraintes professionnelles compte tenu des données personnelles et psychosociales

Paramètres	OR	IC 95 %	Signification
Paramètres introduits séparément			
mDr (%)	2,24	1,44 - 3,48	***
mFr (%)	4,41	2,04 - 9,50	***
mEMGr (%)	2,86	1,91 - 4,30	***
rANG (#/min)	1,29	1,10 - 1,51	**
rEMG (#/min)	-	-	-
mVD (°/s)	-	-	-
mVF (°/s)	-	-	-
A _{EP} (ms ⁻²)	7,11	1,97 - 25,63	**
Durée HAV (%)	1,76	1,35 - 2,29	***
Dose HAV (ms ⁻² an ^{0,5})	1,95	1,16 - 3,29	*
Paramètres introduits simultanément			
mEMGr (%)	6,00	2,79 - 12,93	***
rANG (#/min)	0,70	0,52 - 0,96	*
mVD (°/s)	0,27	0,08 - 0,92	*

* = p < 0,05 ** = p < 0,01 *** = p < 0,001

ANGLES moyenne relative en déviation: mDr (%)
 moyenne relative en flexion-extension: mFr (%)

REPETITIVITE répétitivité angulaire: rANG (#/min)
 répétitivité en EMG: rEMG (#/min)

FORCES moyenne relative de l'EMG: mEMGr (%)

VITESSES moyenne de la vitesse en déviation: mVD (°/s)
 moyenne de la vitesse en flexion-extension: mVF (°/s)

VIBRATIONS durée d'utilisation des machines vibrantes: durée HAV (%)
 accélération d'exposition personnelle: A_{EP} (ms⁻²)
 dose vibratoire personnelle: Dose HAV (ms⁻² an^{0,5})

On remarque que:

- le paramètre biomécanique le plus liés aux plaintes MS avérées est la force relative moyenne (mEMGr), intervenant à la fois dans le modèle univarié (en tenant compte des données personnelles) et le modèle multivarié;
- les vitesses angulaires (mVD et mVF) n'interviennent pas lorsqu'ils sont considérés individuellement dans le modèle, alors que la vitesse en déviation s'avère un paramètre significatif dans le modèle multivarié (avec un odds ratio inférieur à 1);
- à l'exception de la répétitivité en force, tous les autres paramètres de contrainte professionnelle, lorsque pris séparément, présentent des odds ratios significativement supérieurs à 1, de 1,3 à 4,4 pour les contraintes biomécaniques et de 1,8 à 7,1 pour les contraintes vibratoires (pour une augmentation de l'accélération d'exposition personnelle pondérée de 10 ms²);
- par contre, dans l'analyse multivariée, seul subsiste une association significative avec la répétitivité angulaire dont le OR est inférieur à 1;
- ces associations négatives (OR inférieurs à 1) sont en réalité dues à la corrélation entre rANG, mVD et l'activité musculaire moyenne. Ces deux facteurs interviennent par conséquent dans le modèle final pour y "ajuster" l'influence du paramètre de force, qui, si le OR était considéré séparément, serait particulièrement élevé (OR = 6 pour une augmentation de la force moyenne relative de 10%).

Il est à noter qu'aucun paramètre de contrainte vibratoire ne subsiste dans le modèle final en complément des paramètres biomécaniques.

III. PROBABILITE DE PLAINTES "AVEREES" NEUROLOGIQUES, FACTEURS PERSONNELS ET CONTRAINTES BIOMECANIQUES ET VIBRATOIRES.

L'étude de la relation entre la probabilité de développer des plaintes "avérées" neurologiques et les contraintes au poste de travail sera menée selon les trois mêmes approches que pour les plaintes MS:

- par groupe;
- en fonction des opinions des travailleurs;
- par les résultats des mesurages.

A. Analyse sur base des données de l'interview

Le tableau 6.6 donne les résultats des analyses de régression logistique multivariées en fonction des paramètres personnels et des contraintes de travail décrites par soit l'appartenance à l'un des groupes, soit les opinions des travailleurs.

La première partie du tableau exploite la première approche (par groupe).

Approximativement les mêmes associations sont observées lorsqu'il s'agissait de la probabilité de plaintes MS avérées (tableau 6.4): les associations avec les maladies chroniques et le côté ne sont plus significatives alors que d'autres apparaissent: les antécédents d'accidents au niveau des membres supérieurs (association négative) et deux autres facteurs psychosociaux (troubles du sommeil et céphalées) (association positive).

TABLEAU 6.6 - Analyse de régression logistique multivariée: probabilité de plaintes neurologiques avérées en fonction des données du questionnaire

	OR	IC 95 %	Significatio n
Groupes:			
• groupe 1 VS groupes 2 et 3	10,14	3,54 – 29,03	***
• poids (écart de 10 kg)	1,74	1,29 – 2,35	***
• taille (écart de 10 cm)	0,64	0,55 - 0,75	***
• accidents aux membres supérieurs	0,33	0,14 – 0,80	*
• irrité	10,17	1,93 – 53,61	**
• troubles du sommeil	3,25	1,07 – 9,87	*
• céphalées	6,10	1,82 - 20,42	**
Conditions de travail:			
• âge (écart de 10 ans)	2,61	1,19 - 5,72	*
• poids (écart de 10 kg)	1,78	1,22 – 2,58	**
• taille (écart de 10 cm)	0,49	0,38 – 0,64	***
• accidents aux membres supérieurs	0,20	0,06 – 0,69	*
• irrité	32,35	2,53 – 413,00	**
• troubles du sommeil	7,25	1,85 – 28,46	**
• céphalées	8,51	1,91 – 38,00	**
• tâches fines (difficultés)	0,09	0,01 – 0,78	*
• faiblesse ressentie (mains ou bras)	0,17	0,03 – 0,83	*
• ancienneté au poste (écart de 1 an)	0,91	0,84 – 0,99	*
• répétitivité (poste actuel)	9,46	1,88 – 47,53	**
• machines vibrantes (écart de 20h/sem)	8,00	2,85 – 22,56	***
• fatigue fréquente dans les poignets	10,29	2,70 – 39,26	***

* p < 0,05 ** < 0,01 *** p < 0,001

Lorsque les descriptions individuelles des conditions de travail sont prises en compte, d'autres associations deviennent significatives.

Les associations positives avec l'âge, la répétitivité du travail, une fatigue dans les poignets et le nombre d'heures d'utilisation de machines vibrantes traduisent probablement les différences entre le groupe 1 et les deux autres groupes. Par contre, les associations négatives avec les difficultés dans la réalisation de tâches fines et une faiblesse au niveau des mains et des bras sont assez surprenantes lorsque considérées individuellement.

Ces points seront discutés ultérieurement.

B. Analyse sur base des contraintes biomécaniques et vibratoires mesurées au poste de travail

Le tableau 6.7 reprend les résultats des analyses logistiques en considérant, séparément et puis simultanément, les paramètres de contraintes mesurés aux postes de travail, compte tenu des données personnelles.

TABLEAU 6.7 - Analyse de régression logistique multivariée: probabilité de plaintes neurologiques avérées en fonction de contraintes professionnelles compte tenu des données personnelles et psychosociales

Paramètres	OR	IC 95 %	Significatio n
Paramètres introduits séparément			
mDr (%)	2,27	1,44 - 3,57	***
mFr (%)	2,04	1,21 - 3,42	**
mEMGr (%)	2,56	1,86 - 3,52	***
rANG (#/min)	1,78	1,44 - 2,21	***
rEMG (#/min)	-	-	-
mVD (°/s)	-	-	-
mVF (°/s)	2,97	1,61 - 5,48	***
A _{EP} (ms ⁻²)	25,92	5,64 - 119,09	***
Durée HAV (%)	1,71	1,35 - 2,17	***
Dose HAV (ms ⁻² an ^{0,5})	-	-	-
Paramètres introduits simultanément			
mDr (%)	2,69	1,49 - 4,86	**
mVF (°/s)	3,91	2,02 - 7,54	***
soit A _{EP} (ms ⁻²)	12,9	2,4 - 69,3	**
soit durée HAV (%)	1,65	1,28 - 2,12	***

- NS ** p < 0,01 *** p < 0,001

ANGLES moyenne relative en déviation: mDr (%)
 moyenne relative en flexion-extension: mFr (%)

REPETITIVITE répétitivité angulaire: rANG (#/min)
 répétitivité en EMG: rEMG (#/min)

FORCES moyenne relative de l'EMG: mEMGr(%)

VITESSES moyenne de la vitesse en déviation: mVD (°/s)
 moyenne de la vitesse en flexion-extension: mVF (°/s)

VIBRATIONS durée d'utilisation des machines vibrantes: durée HAV (%)
 accélération d'exposition personnelle: A_{EP} (ms⁻²)
 dose vibratoire personnelle: Dose HAV (ms⁻² an^{0,5})

On remarque que:

- les paramètres de contrainte biomécanique intervenant à la fois séparément et conjointement dans les deux modèles sont mDr (moyenne de l'angle en déviation) et mVF (moyenne de la vitesse en flexion-extension); les odds ratios (pour 10% et 10°/s) sont très importants;
- les contraintes vibratoires sont également présentes soit par la durée d'exposition journalière (%), soit par l'accélération pondérée d'exposition personnelle qui, par définition, tient compte de cette durée;
- par contre, ni la dose vibratoire personnelle pondérée (A_{EP} \sqrt{T} où T correspond à l'ancienneté au poste), ni l'ancienneté au poste (T) ne se révèlent significatives;
- l'activité musculaire moyenne (relative) intervient dans le modèle univarié, mais disparaît dans le modèle multivarié, contrairement au modèle obtenu pour les plaintes MS;
- de même, la vitesse moyenne du poignet en déviation ne paraît pas associée aux plaintes "avérées" neurologiques.

La validité de la pondération fréquentielle de la norme ISO 5349 étant remise en question, les calculs ont été recommencés à partir des accélérations personnelles et doses non pondérées. Les résultats des analyses

logistiques sont semblables aussi bien pour les plaintes MS (A_{EP} et dose non significatives) que neurologiques (seul A_{EP} est significative).

IV. RELATIONS ENTRE LES INCIDENCES D'AGGRAVATION DES PLAINTES MS ET NEUROLOGIQUES ET LES TESTS FONCTIONNELS ET SENSITIFS COMPTE TENU DES FACTEURS PERSONNELS ET PSYCHOSOCIAUX

A. Comparaison des résultats des tests entre sujets (poignets) avec et sans plaintes avérées (MS ou neurologiques)

Les résultats d'aucun des tests fonctionnels et sensitifs ne présentent de différences significatives lorsque sont comparés (test t non pairé) les sujets (poignets) qui par la suite ont et n'ont pas développé de plaintes MS. Par contre, pour les plaintes neurologiques, des différences significatives sont observées en ce qui concerne:

- la flexion maximale $55,4^{\circ} \pm 7,1$ (atteints) vs $58,7^{\circ} \pm 7,7$ (non atteints);
- les seuils de perception à la pression, avec, pour le majeur, un SPP de $3,48 \pm 0,27$ vs $3,32 \pm 0,37$, et, pour l'auriculaire, un SPP de $3,47 \pm 0,26$ vs $3,33 \pm 0,37$ respectivement chaque fois pour les poignets atteints et non atteints.

Cependant, tout comme lors de l'étude transversale (chapitre 5), ces faibles différences, mais aussi la comparaison des histogrammes cumulés des valeurs pour les poignets atteints et non atteints montrent qu'il n'est pas possible de déterminer avec une sensibilité et spécificité intéressantes une valeur seuil permettant de différencier les poignets qui vont développer des troubles neurologiques dans les 12 prochains mois.

B. Analyses logistiques des relations entre plaintes et résultats des tests antérieurs

Des modèles de régression logistique multivariés ont été à nouveau calculés pour étudier la relation entre la survenue de plaintes MS ou neurologiques avérées et les résultats des tests fonctionnels et sensitifs réalisés l'année précédente, compte tenu des données personnelles et psychosociales.

Les analyses sont parties des modèles présentés aux tableaux 6.4 et 6.6 (trois groupes), en y ajoutant toutefois les paramètres âge, poids, taille et latéralité qui sont connus comme ayant une influence sur les résultats des tests.

1. Plaintes MS

Lorsque l'appartenance à l'un des trois groupes est prise en considération, les résultats d'aucun test ne paraissent associés au développement ultérieur de plaintes MS avérées.

Par contre, lorsque cette appartenance n'est pas prise en considération, des associations lâches (p compris entre 0,05 et 0,10) sont observées avec:

- les seuils de perception à la pression au majeur et à l'auriculaire;
- les seuils de perception aux vibrations à 250 Hz pour, à nouveau, les deux doigts.

2. Plaintes neurologiques

A nouveau, des associations n'apparaissent que lorsque l'appartenance au groupe n'est pas prise en considération.

Le tableau 6.8 décrit les modèles obtenus lorsque les résultats des tests sont introduits séparément et puis simultanément dans le modèle correspondant aux plaintes neurologiques.

TABLEAU 6.8 – Analyse de régression logistique entre le développement de plaintes neurologiques avérées et les résultats des tests fonctionnels et sensitifs compte tenu des données du questionnaire

	OR	IC 95%	Signification
Tests pris séparément			
SPP majeur (log force, réf. 0,1 mg)	1,36	(1,05 – 1,77)	*
SPP auriculaire (log force, réf. 0,1 mg)	1,35	(1,04 – 1,75)	*
TLS auriculaire (ms)	3,68	(1,09 – 12,36)	*
Tests pris simultanément:			
extension maximale (°)	0,74	(0,56 – 0,97)	*
SPP auriculaire (log force, réf. 0,1 mg)	1,40	(1,04 – 1,87)	*
SPV majeur à 250 Hz (dB)	0,58	(0,39 – 0,88)	**
SPV auriculaire à 250 Hz (dB)	1,53	(1,03 – 2,28)	*
TLS index (ms)	2,33	(1,01 – 5,35)	*

* $p < 0,05$ ** $p < 0,01$

SPP seuil de perception à la pression (OR pour une augmentation de 0,2)
SPV seuil de perception aux vibrations (OR pour une augmentation de 5 dB)
TLS temps de latence sensitif (OR pour une augmentation de 1 ms)
Extension maximale (OR pour une diminution de 5°)

Lorsque les tests sont considérés individuellement, des associations positives apparaissent entre le développement de plaintes neurologiques avérées et

- les SPP (majeur et auriculaire): OR = 1,4 pour une variation d'un filament;
- le temps de latence sensitive sur l'auriculaire (OR = 4 pour un écart de 1 ms).

Lorsque l'ensemble des tests sont considérés simultanément, des associations positives sont relevées pour trois d'entre eux:

- les SPP et SPV (250 Hz) à l'auriculaire;
- le temps de latence sensitif (index).

Deux autres par contre donnent des associations négatives:

- le SPV (250 Hz) au majeur;
- l'angle maximal en extension.

Il est en fait difficile d'interpréter les résultats d'un modèle dont plusieurs variables sont partiellement corrélées, comme c'est le cas pour les seuils de perception aux vibrations à 250 Hz relevés sur le majeur et l'auriculaire. Le fait que les deux paramètres interviennent en sens opposé suggère que l'un ajuste en fait la relation trouvée en fonction de l'autre.

Notons que les variables âge et latéralité, ajoutées dans le modèle logistique en plus des autres données personnelles et psychosociales (tableau 6.6), ne se sont pas avérées significatives dans le modèle final.

I. METHODOLOGIE

A. Schéma de l'étude

Comme la revue de la littérature (chapitre 1) l'a montré, de très nombreuses études transversales se sont intéressées aux problèmes musculosquelettiques du membre supérieur, mais les études prospectives visant à établir une relation causale sont peu nombreuses. C'est surtout le cas pour les études prenant en compte les vibrations.

Les contraintes au poste de travail sont généralement évaluées par questionnaire ou, plus simplement encore, par appartenance à un groupe professionnel.

Vu les difficultés techniques et le coût, la quantification de ces contraintes est rare et, pour les postes de travail avec exposition aux vibrations, elle n'aborde pas les contraintes biomécaniques.

A notre connaissance, aucune étude scientifique n'a été menée avec à la fois la quantification des contraintes biomécaniques et vibratoires.

Le schéma de cette étude a été conçu pour pallier ce vide en étudiant de manière prospective la relation entre les contraintes professionnelles biomécaniques et vibratoires et la survenue de problèmes musculosquelettiques et/ou neurologiques.

La prévalence de plaintes MS est plus importante chez les travailleurs exposés aux vibrations (2 à 5 fois, chapitre 1). Il n'est cependant pas établi si cette majoration du risque est due à l'exposition aux vibrations en elle-même ou à une aggravation des facteurs de risque biomécaniques résultant de la manipulation de la machine vibrante.

C'est la raison pour laquelle l'étude est basée sur la comparaison de trois groupes de travailleurs:

- groupe 1 exposé aux vibrations et, a priori, probablement aussi à des contraintes biomécaniques importantes;
- groupe 2 occupé à des travaux lourds et répétitifs des membres supérieurs, sans vibrations;
- groupe 3 occupé à des travaux légers et sans vibrations (groupe contrôle).

L'objectivation des plaintes MS et neurologiques (douleurs, engourdissements, picotements, ...) est un autre volet de cette étude. Différents tests ont été proposés à cet effet. En milieu industriel, au contraire du milieu clinique, il s'agit cependant de corroborer des plaintes associées éventuellement à des altérations précoces.

Il est utile d'insister sur ce dernier point. Les personnes étudiées occupaient leur poste de travail. Les symptômes, les plaintes, les résultats des tests cliniques concernent donc immanquablement des pathologies diverses et à un stade précoce, qui n'empêchent pas la personne de travailler. Aussi avons-nous choisi un ensemble de tests fonctionnels et sensitifs et non un test particulier pour objectiver ces plaintes (étude transversale) et déterminer s'il est possible de prédire le développement de plaintes MS et neurologiques (étude prospective).

Il est à noter que, paradoxalement, la sensibilité et la spécificité des tests – semi-objectifs – sont déterminées le plus souvent dans la littérature en prenant comme références les plaintes ou les symptômes évoqués qui sont des données très subjectives.

Certaines études, discutées au chapitre 1, rapportent des sensibilités et spécificités élevées pour certains tests effectués au moment où les plaintes ou les symptômes étaient présents. Cela ne pourra être le cas dans la présente étude où les plaintes sont survenues au cours des 12 derniers mois.

Cette étude est similaire à l'étude prospective menée en Belgique par la même équipe de recherche dans divers secteurs industriels sans exposition aux vibrations (Malchaire, 1995).

Les résultats de ces deux études seront comparables. En effet, la même méthodologie a été employée pour le mesurage des contraintes biomécaniques (étalé sur les deux années de l'étude et réalisé chez un maximum possible de travailleurs). Par contre, l'examen clinique et les tests fonctionnels et sensitifs ont bien dû être quelque peu modifiés pour tenir compte des troubles principalement neurologiques liés aux vibrations.

Une différence importante existe cependant entre les deux études. Dans leur partie transversale, ces deux études considèrent les prévalences de plaintes au cours des 12 derniers mois et leurs relations avec les tests fonctionnels et sensitifs et les contraintes professionnelles. Par contre, il n'en est pas de même pour les incidences dans leur partie prospective. La prévalence de plaintes dans le groupe exposé aux vibrations était telle que si les mêmes critères de participation avaient été utilisés (absence de plainte), l'étude prospective eut été impossible. C'est pourquoi, dans la partie prospective de la présente étude, un critère de sévérité des plaintes a été adopté. Ce degré de sévérité a été évalué à partir de la fréquence d'apparition des plaintes et de leur importance et ne peut donc être assimilé à la sévérité d'une pathologie.

Le schéma de l'étude peut se résumer par la figure 7.1.

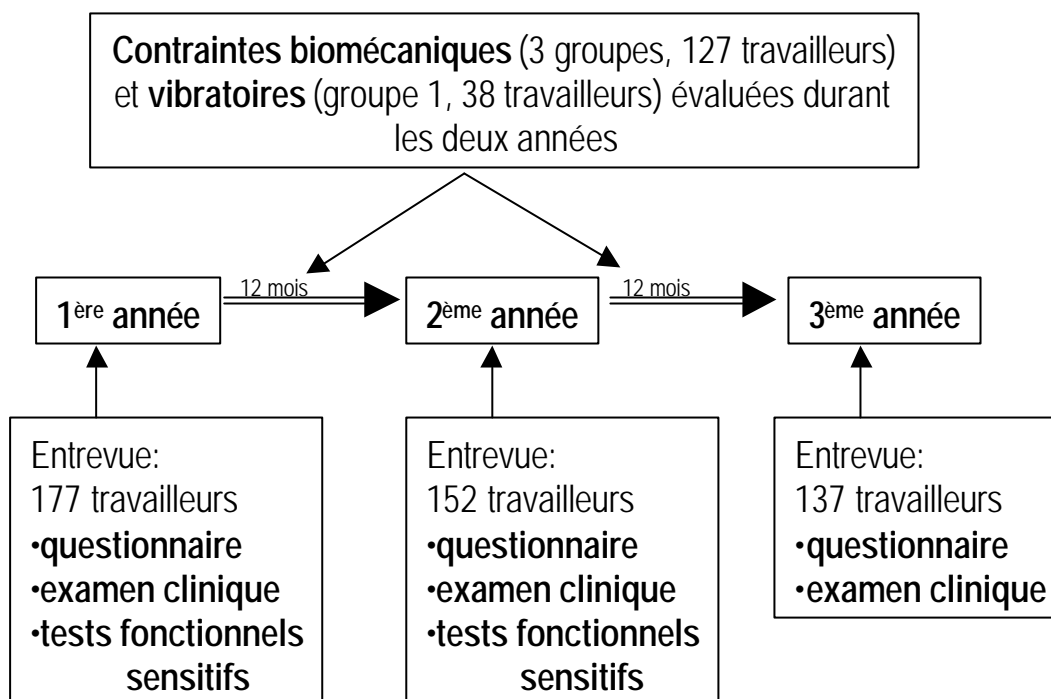
B. Sélection de la population

Les trois groupes de travailleurs sélectionnés comprennent uniquement des hommes et sont issus du milieu industriel.

Les groupes 2 (travaux lourds et répétitifs) et 3 (contrôle) ont été constitués au sein d'une même entreprise sidérurgique. Il n'en a pas été de même pour le groupe 1 (vibrations) qui provient de 9 firmes différentes avec des conditions d'exposition aux vibrations très variables (machines vibrantes et durées d'exposition différentes).

Un des problèmes majeurs de toute étude prospective est le nombre de travailleurs qui ne peuvent être revus dans les années ultérieures. Ce fut le cas pour 25 personnes (14%) en fin de deuxième année et pour 40 travailleurs (23%) en fin de troisième année. Cependant, à une exception près, les raisons des abandons semblent étrangères aux problèmes MS du membre supérieur.

FIGURE 7.1. – Schéma de l'étude



C. Entrevue avec les travailleurs

L'entrevue avec les travailleurs a été adaptée de manière à couvrir leur exposition aux vibrations et l'atteinte neurologique pouvant en résulter. Des questions relatives aux plaintes neurologiques ont été ajoutées et l'examen clinique a été enrichi de tests pour la détection du syndrome des vibrations selon les échelles de Stockholm.

La durée de l'entrevue a été limitée d'emblée à 1 heure 30 minutes par travailleur, afin d'interférer le moins possible avec l'activité industrielle. Cette limitation temporelle de l'entrevue a influencé le choix des tests fonctionnels et sensitifs.

Alors qu'il a été possible d'ajouter quelques questions et de légèrement prolonger l'examen clinique, en revanche l'ajout de tests spécifiques au syndrome des vibrations entraînait une augmentation significative de la durée de l'entrevue. Or, comme vu au chapitre 1, les seuils esthésiométriques et le temps de latence moteur (TLM) ne montrent des modifications qu'à un stade déjà avancé de l'atteinte neurologique. Ils ont dès lors été abandonnés et remplacés par trois tests a priori plus intéressants: le seuil de perception à la pression (Semmes Weinstein), le temps de latence sensitif et la dextérité mesurée par le Purdue Pegboard. Pour des raisons techniques et de temps, le test du seuil de perception à la température n'a pu être réalisé. Ce test eut été complémentaire au test du seuil de perception aux vibrations en cas d'altération neurologique.

Néanmoins, ce test de perception à la température a été utilisé dans le cadre de l'étude annexe portant sur des répercussions à court terme de l'exposition aux vibrations sur les fonctions sensitives et fonctionnelles.

Au terme de la première année, il a été constaté que la durée de l'entrevue était souvent trop grande. Aussi a-t-il été nécessaire de limiter l'examen clinique aux objectifs principaux de l'étude, à savoir l'examen des deux poignets et des troubles neurologiques.

D. Mesurage des contraintes au poste de travail

1. Mesurage des contraintes biomécaniques au niveau des poignets

La méthodologie utilisée pour la quantification des contraintes biomécaniques a été décrite au chapitre 2. Elle est strictement la même que celle utilisée lors de l'étude antérieure (Malchaire, 1995). La comparaison des résultats de cette étude est donc parfaitement possible.

Les contraintes biomécaniques ont été évaluées par mesurages directs. Ces mesurages, bien que techniquement sophistiqués et coûteux, sont nécessaires pour arriver à une définition des contraintes d'une précision telle qu'il soit possible d'étudier l'association ou la relation de cause à effet avec les plaintes. L'observation par vidéo ne permet l'évaluation précise que de la posture et est insuffisante pour la force ou la répétitivité, surtout si celles-ci sont élevées.

Les facteurs biomécaniques à évaluer sont bien connus: la force, les postures, la répétitivité. La façon de les quantifier l'est moins. Elle varie très fortement d'un auteur à l'autre (Pichené, 1995).

En pratique, cependant,

- l'EMG de surface, souvent jugé trop imprécis par les neurophysiologistes, est le seul moyen pour quantifier la force au poste de travail;
- et les goniomètres permettent le plus facilement, non seulement de mesurer les angles, mais également, par différenciation, de calculer la vitesse angulaire.

Des différences méthodologiques entre études (étalonnage, fréquence d'échantillonnage, placement des capteurs, ...) peuvent compliquer les comparaisons, aucune standardisation n'existant à l'heure actuelle. Ce problème de définition et de méthodologie commune est particulièrement important en ce qui concerne la répétitivité (Killbom, 1994; Pichené, 1995).

Pratiquement, chaque auteur utilise un critère de répétitivité différent:

- la vitesse angulaire (Marras et Schoenmarklin, 1993; Ranaivosoa et al., 1992);
- le nombre de cycles de travail (Luopajarvi et al., 1979);
- le nombre d'efforts de la main (Stetson et al., 1991);
- le nombre de mouvements (Moore et al., 1991);
- le nombre de produits similaires fabriqués (Tanaka et McGlothlin, 1987).

Dans la présente étude, la répétitivité a été définie par le nombre de mouvements de ou vers une position extrême.

Pour chaque facteur biomécanique, on a calculé:

- la valeur moyenne et l'écart type;
- le pourcentage de temps au dessus d'une certaine valeur limite.

Cette dernière valeur est bien sûr fonction de la limite utilisée, limite acceptable très peu justifiée dans la littérature. Nous avons utilisé:

- *pour la force*: 15% de l'EMG maximal.

Cette limite a été proposée par Byström (1991) à partir d'essais en laboratoire pour des efforts dynamiques. Putz-Andersson (1988) a proposé une limite égale à 20% de l'EMG maximal. Aucun consensus ne semble exister. Cet écart de 5% peut a priori sembler faible. Cependant, les valeurs rencontrées lors des analyses biomécaniques sur le terrain sont de l'ordre de 15 à 20% en moyenne, de sorte que l'adoption d'une valeur ou de l'autre comme limite a une influence considérable sur le pourcentage de temps pendant lequel la limite est dépassée.

- *pour les angles*: 50% des déviations radio-cubitales maximales et 65% des flexions-extensions maximales.

Certains auteurs (Armstrong, 1986; Punnet et Keyserling, 1987) ont déterminé des limites en valeurs absolues alors que Stetson et al. (1991) ont proposé des valeurs relatives. A nouveau, aucun consensus véritable ne ressort de la littérature. Notre choix est un compromis entre ces différentes études.

- *pour les vitesses*: 30°/s en déviation et 50°/s en flexion-extension.

Ces limites sont sans doute les plus sujettes à discussion puisqu'elles proviennent de l'interprétation des résultats d'une seule étude (Marras et Schoenmarklin, 1991). De plus, la fréquence d'échantillonnage des signaux angulaires a une grande influence sur le calcul des vitesses. Elle était de 300 Hz dans leur étude et de 10 Hz dans la présente étude.

Il nous paraît dès lors que la description de la contrainte par les valeurs statistiques classiques (moyenne et écart type) posent moins de problème de validité. La corrélation entre les deux paramètres (moyenne et pourcentage) étant par ailleurs très grande, il a été décidé de n'utiliser que la moyenne, tant pour l'étude transversale que prospective.

2. Mesurage des contraintes vibratoires au poste de travail

Au contraire des contraintes biomécaniques, la méthode de mesurage des contraintes vibratoires au poste de travail fait l'objet de plusieurs normes. La norme ISO 5349 (1986) définit la méthodologie d'évaluation de l'exposition aux vibrations transmises par les mains. Elle définit entre autres les unités, les axes de mesurage (les 3 axes orthogonaux) ainsi que la pondération fréquentielle à utiliser.

Elle propose également un algorithme de calcul du risque d'apparition de troubles vasculaires en fonction du niveau et de la durée d'exposition aux vibrations.

Bien que faisant l'objet de nombreuses critiques, cette norme reste la référence pour le mesurage des vibrations des machines vibrantes.

Le point le plus controversé de cette norme est la pondération fréquentielle. Cette pondération a été établie sur base de recherches réalisées il y a plus de 20 ans, à une époque où les troubles neurologiques étaient peu pris en compte.

Selon Bovenzi et al. (1994), cette pondération permet d'établir une relation entre la dose vibratoire et les problèmes vasculaires (VWF). Par contre, le même auteur n'a pu établir de relation avec les troubles neurologiques ou musculosquelettiques.

La pondération fréquentielle réduit considérablement l'importance des vibrations de moyennes et hautes fréquences, ce qui modifie l'importance relative des différentes machines vibrantes (Griffin, 1997).

Les différentes pathologies liées aux vibrations (vasculaires, articulaires, neurologiques, ...) dépendent de la fréquence des vibrations. Il est donc probable qu'une pondération fréquentielle différente pour chacune de ces pathologies est plus adaptée pour déterminer des relations de type dose-réponse (Griffin, 1997).

Pelmear et al. soulignaient en 1992 la nécessité pour les études épidémiologiques de prendre en considération à la fois les accélérations d'exposition pondérées et non pondérées. C'est ce que nous avons tenté dans la présente étude.

Cette norme ISO 5349 est actuellement en cours de révision, mais les modifications envisagées à ce jour ne paraissent pas fondamentales (ISO/CD 5349-1, 1997). Un complément est en préparation (ISO/CD 5349-2, 1998): il concerne le mesurage des vibrations au poste de travail et l'évaluation de l'accélération d'exposition personnelle (A_{EP}). Cette accélération est celle qui, en cas d'exposition continue pendant 8 h, donnerait lieu au même apport d'énergie vibratoire que les amplitudes variables auxquelles le travailleur a réellement été exposé durant sa journée de travail. Elle intègre donc la durée de travail réelle, les périodes d'utilisation effective des machines vibrantes, les fluctuations instantanées des vibrations, etc...

Elle est de plus calculée par la somme vectorielle des accélérations relevées dans les 3 axes définis par la norme ISO 5349.

Le projet de directive européenne 93/C77/02 propose les valeurs limites suivantes pour cette accélération d'exposition personnelle:

- valeur seuil: risque acceptable si $A_{EP} < 1 \text{ ms}^{-2}$;
- valeur d'action: $A_{EP} = 2,5 \text{ ms}^{-2}$, programme d'amélioration et/ou organisation du travail;
- valeur plafond: risque inacceptable si $A_{EP} \geq 5 \text{ ms}^{-2}$.

Pour des raisons techniques (les mesurages n'étant possible que dans un seul axe à la fois) et afin de perturber le moins possible les conditions de travail, les vibrations n'ont été mesurées que dans l'axe dominant. En pratique, l'erreur est faible, les vibrations dans l'axe dominant (axe de percussion, de rotation, ...) étant, pour la plupart des machines, nettement supérieures à celles dans les autres axes.

La norme ISO 8662 donne l'axe dominant pour différentes machines vibrantes.

Il est aisé mathématiquement de montrer que l'erreur sur A_{EP} serait de 40% si l'amplitude de vibration dans un second axe était la même que dans l'axe dominant et de 20% si elle est deux fois plus petite.

Pour éviter toute perturbation des conditions de travail, le matériel de mesurage devait être léger et peu encombrant. Dès lors, l'accéléromètre a été monté sur un adaptateur (Bruël & Kjaër UA 0891) tenu en main par l'opérateur. Cet adaptateur se comporte comme un système masse ressort dont la fréquence de résonance serait de l'ordre de 500 Hz (Rasmussen, 1982). Par des tests en laboratoire utilisant le même accéléromètre (Bruël & Kjaër 4384) que dans cette étude, Lemaire (1991) a obtenu une fréquence de résonance supérieure (800 Hz) mais également une variation de la réponse à plus basses fréquences. Le couplage avec la poignée influence également cette réponse en fréquence.

Néanmoins, l'adaptateur est la seule alternative pratique pour tenir compte des durées d'utilisation réelles des différentes machines employées durant un cycle de travail et pour permettre aisément le passage par l'opérateur d'une machine à l'autre. L'utilisation d'un accéléromètre sur chaque machine aurait encombré le poste de travail et perturbé le travail en lui-même (un câble et un préamplificateur par accéléromètre, enregistreur à plusieurs canaux, ...) à un tel point que le mesurage des conditions réelles n'aurait plus été possible.

L'idéal aurait été de mesurer les vibrations avec et sans la pondération fréquentielle. Ceci n'a pu être réalisé que lors des essais en simulation dont le but était de caractériser le spectre de fréquences des machines. Par contre, les mesurages au poste de travail ont été réalisés sans pondération fréquentielle et les valeurs pondérées ont été obtenues en faisant l'hypothèse que le comportement fréquentiel de la machine était le même que durant la simulation.

3. Représentativité des mesurages

Différentes stratégies de mesurage ont été développées dans le domaine des agents chimiques (Hawkins et al., 1991) et de l'acoustique (Malchaire et Piette, 1997). Ces stratégies préconisent de prendre par travailleur plusieurs échantillons d'une certaine durée (en minutes) au cours d'un intervalle de temps (1 jour, 1 semaine, ...) pendant lequel toutes les variantes de travail sont rencontrées.

La complexité des mesurages des vibrations et surtout des facteurs biomécaniques rendent en pratique impossible l'utilisation de telles stratégies. Nous en avons cependant gardé la notion de groupe d'exposition homogène en s'assurant que l'ensemble des travailleurs d'un même poste de travail connaissent la même exposition.

Dès lors, l'ensemble des périodes d'observation de chaque travailleur à un moment donné doit refléter à la fois les variations de contrainte au cours du temps (production différente, différences au cours de la journée, ...) et les variations interindividuelles.

Etant donné que 80% des travailleurs ont fait l'objet d'une observation, on peut estimer qu'un grand nombre de variantes des conditions de travail ont été rencontrées. Dès lors, tout comme au cours de l'étude antérieure (Malchaire, 1995), les moyennes des observations ont été utilisées pour caractériser les contraintes de l'ensemble des travailleurs d'un même poste.

Les conditions de travail, le type de fabrication et l'organisation du travail n'ayant pas évolué au cours des deux années de l'étude, on peut considérer que les contraintes vibratoires et biomécaniques sont restées constantes.

E. Analyse statistique

La probabilité de l'existence (étude transversale) ou de l'apparition (étude prospective) d'une plainte a été étudiée en fonction de plusieurs variables continues et/ou discrètes au moyen de modèles de régression logistique. Les variables et paramètres pris en compte sont les données personnelles et psychosociales de chaque sujet, ses résultats aux tests fonctionnels et sensitifs (en vue d'une valeur diagnostique) et les contraintes aux postes de travail (en vue d'une relation causale).

Les contraintes de travail ont été caractérisées de trois manières différentes: appartenance à un groupe, opinion du travailleur, valeurs moyennes mesurées. Les résultats ont été comparés.

Certains paramètres, tels que l'âge et la latéralité, ont été inclus non pas tant pour une association éventuelle avec les plaintes, mais pour leur influence sur d'autres paramètres tels que les résultats de certains tests fonctionnels.

Les odds ratios donnent une estimation soit du rapport de prévalence (étude transversale) soit du rapport d'incidence ou risque relatif (étude prospective), pour une variation donnée d'un paramètre, compte tenu de l'influence des autres paramètres.

D'autres tests statistiques (régression linéaire simple ou multiple, tests t non pairés, ...) ont été utilisés classiquement pour la comparaison de variables continues.

II. LES CONTRAINTES DE TRAVAIL

A. Contraintes biomécaniques

Des différences statistiquement significatives ont été observées entre les côtés droit et gauche pour certains paramètres, en particulier pour les vitesses angulaires. Ces différences sont cependant faibles et l'on peut valablement considérer que les contraintes sont symétriques. Ceci s'avère justifié pour les trois groupes de travailleurs.

Des différences plus importantes avaient été mises en évidence dans l'étude antérieure en ce qui concerne la force (Malchaire, 1995). Cette étude concernait en fait un plus grand nombre de postes de travail non seulement du secteur secondaire comme dans l'étude présente, mais aussi du secteur tertiaire.

La variabilité des paramètres biomécaniques est grande, les coefficients de variation atteignant quelque 50%. Cette grande variabilité avait déjà été relevée dans l'étude antérieure ainsi que par Aptel (1993).

Comme discuté précédemment, elle englobe à la fois les différences interindividuelles, les différences intraindividuelles et les variations des conditions de travail.

Cette variabilité est cependant la plus faible pour le groupe 1, suggérant que le port et l'utilisation des machines vibrantes pesant jusqu'à 18 kg entraînent des contraintes biomécaniques plus constantes pour les différents travailleurs. Ces contraintes sont aussi systématiquement plus importantes aussi bien en angulations, en forces qu'en répétitivités. C'est surtout le cas de la répétitivité angulaire qui s'avère deux fois plus grande que pour le groupe 2 (travaux lourds et répétitifs).

L'activité musculaire relative est, quant à elle, majorée d'environ 10%. Elle dépasse 15% de l'EMG_{max} pendant quelque 70% du temps en moyenne. Cet accroissement important est probablement dû au fait que le travailleur porte la machine vibrante bien plus longtemps qu'il ne l'utilise réellement.

Les vitesses angulaires sont par contre légèrement plus élevées pour le groupe 2.

Quel que soit le paramètre, le groupe contrôle présente systématiquement les valeurs les plus faibles.

Cette majoration globale des contraintes biomécaniques pour le groupe 1 explique, en partie certainement, l'opinion de pénibilité physique et mentale plus importante exprimée par ces travailleurs (corrélation pénibilité-force: $R = 0,6$). Elle pourrait également expliquer les prévalences accrues de TMS constatées chez les travailleurs exposés aux vibrations (Armstrong et al., 1987; Wieslander et al., 1988; Bovenzi, 1991; Pelmear et al., 1992).

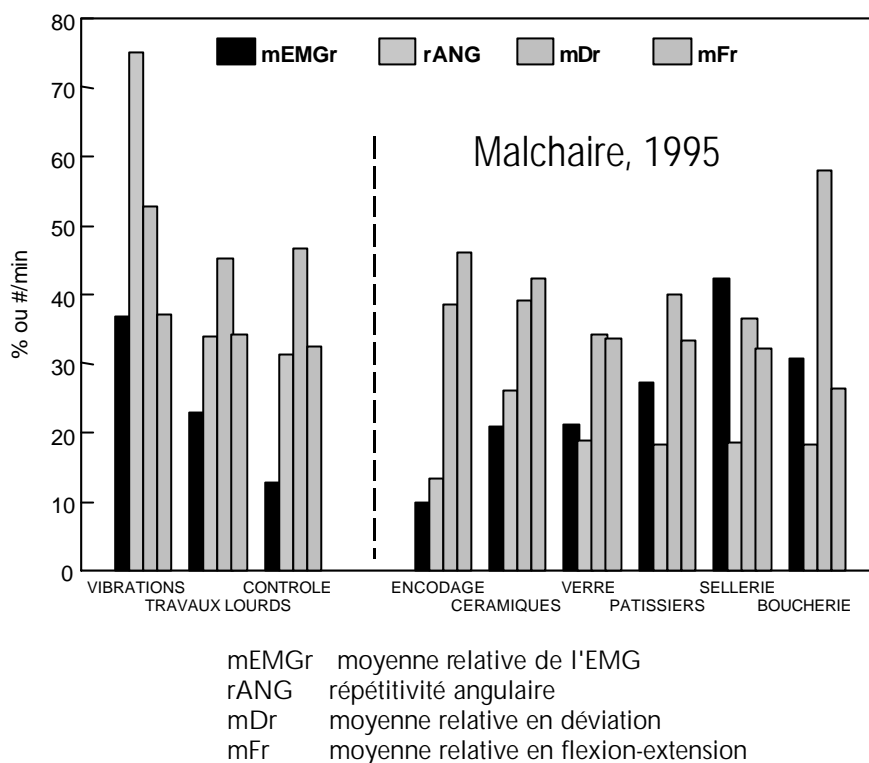
L'utilisation de machines vibrantes a, au moins, une influence indirecte, en imposant une posture et des efforts contraignants pour la manipulation de la machine (Armstrong et al. 1987; Pelmear et al., 1992).

La figure 7.2 compare les contraintes biomécaniques principales relevées pour les trois groupes à celles observées aux 6 postes de travail (hommes) au cours de l'étude antérieure (Malchaire, 1995).

- Les angulations moyennes dans les deux plans sont du même ordre de grandeur à tous les postes à l'exception des bouchers et des travailleurs exposés aux vibrations pour qui les angles en déviation sont en moyenne plus élevés.
- Les activités musculaires (mEMGr) sont du même ordre pour le groupe contrôle et le poste antérieur du secteur de l'encodage (autour de 10% de l'EMG maximal) et nettement inférieures à celles des autres postes (20 à 40%).
- La répétitivité angulaire est systématiquement plus élevée dans la présente étude.

- Globalement, les contraintes biomécaniques pour le groupe 2 (travaux lourds et répétitifs) sont semblables à celles des bouchers, des pâtisseries, des verriers, des travailleurs de la sellerie ou de fabrication de composants céramiques.
- Le groupe de travailleurs exposés aux vibrations se distingue le plus nettement des autres groupes en ce qui concerne la force et la répétitivité.

FIGURE 7.2 – Comparaison des principaux facteurs biomécaniques évalués dans la présente étude et dans la précédente (Malchaire, 1995)



Les groupes 2 et 3, bien que sélectionnés dans une seule entreprise, sont donc bien représentatifs respectivement des postes de travail plus lourds et répétitifs et des situations de travail plus légères. Les différents postes avec vibrations donnant des contraintes systématiquement plus élevées, on doit en conclure que les 3 groupes formés dans la présente étude ne constituent pas des cas particuliers. Par conséquent, les résultats discutés ci-dessous seront bien généralisables.

B. Contraintes vibratoires (groupe 1)

Le problème de représentativité des échantillons discuté ci-dessus concernant les contraintes biomécaniques se pose de manière plus importante encore pour les contraintes vibratoires du fait de la variation au cours du temps des vibrations engendrées par les machines. A titre d'exemple, les amplitudes et fréquences des vibrations émises par une meuleuse peuvent dépendre de nombreux facteurs tels que (Delavignette et al., 1993):

- le balourd du disque
- la position de la main sur la poignée
- la présence d'une poignée antivibratile ou non
- l'utilisation correcte de la machine
- l'entretien de la machine.

Les analyses spectrales réalisées montrent clairement que la fréquence fondamentale peut être déduite des caractéristiques de la machine (fréquence de rotation, de percussion, de clouage, ...) et que des harmoniques de la fréquence fondamentale sont générées par toutes les machines à l'exception des machines à percussion. Ces spectres fréquentiels des machines sont similaires à ceux présentés par Griffin (1997).

La classification en machines de basses, moyennes et hautes fréquences et le lien exclusif entre un type de machine et un type de pathologie sont des approches trop grossières du problème. En effet, une machine de basses fréquences, par exemple, peut également générer des hautes fréquences responsables de troubles neurologiques.

Il faut au contraire retenir que l'atténuation des vibrations par le système main-bras est d'autant meilleure que celles-ci sont de fréquences élevées. Des vibrations, et non des machines, de basses fréquences auront donc un effet essentiellement au niveau des coudes et des épaules, tandis que celles de hautes fréquences toucheront plutôt les mains et les poignets.

Afin de pouvoir valablement évaluer l'exposition professionnelle aux vibrations, il faut donc prendre en considération

- les amplitudes pendant l'utilisation des machines
- les variations dues au travail
- les variations dues aux machines
- les variations dues aux habitudes des travailleurs (pression plus ou moins forte, type de prise,...)
- l'intermittence du travail.

Le projet de norme ISO/CD 5349-2 (1998) propose d'évaluer les vibrations au cours d'une simulation en dernier ressort, lorsque les expositions sont très intermittentes.

L'observation au cours de notre étude a montré que les postures, les forces, les types de prise, pouvaient être fondamentalement différents au cours de la simulation qu'au cours du travail réel.

Aussi n'avons-nous utilisé les essais en simulation que pour caractériser l'allure spectrale des vibrations et en particulier la différence systématique entre les amplitudes pondérées et non pondérées.

L'évaluation de l'exposition a été réalisée, comme pour les paramètres biomécaniques, en observant chaque travailleur durant des phases de travail différentes et en confondant donc dans les différences entre échantillons, toutes les variations citées ci-dessus.

Pour les 8 postes de travail, l'accélération pondérée d'exposition personnelle (A_{EP}) dépasse la limite du seuil d'action ($2,5 \text{ ms}^{-2}$) de la proposition de directive européenne 93/C77/02. Pour 6 postes, elle est supérieure au niveau plafond (risque inacceptable) de 5 ms^{-2} .

La dose vibratoire est calculée à partir de l'accélération d'exposition personnelle et de l'ancienneté au poste de travail par $A_{EP} \sqrt{T}$. Elle représente l'énergie vibratoire à laquelle le travailleur a été exposé à son poste actuel. Elle ne tient donc nullement compte de l'exposition aux vibrations aux postes de travail antérieurs. Or, près de 40% des travailleurs ont déclaré avoir déjà utilisé des machines vibrantes antérieurement.

Cette méconnaissance de l'exposition antérieure devrait cependant avoir un effet limité sur les résultats car l'ancienneté des travailleurs à leur poste actuel est supérieure à 5 ans, sauf à deux postes de travail:

- le poste de réparation des palettes créé récemment et dont l'ensemble des travailleurs proviennent d'un autre poste issu de la même entreprise où aucune machine vibrante n'était utilisée
- et le poste de ponçage des sièges où les travailleurs sont jeunes et sans antécédents professionnels.

Les accélérations d'exposition personnelle caractérisant les postes de travail repris dans notre étude sont toutes supérieures au niveau d'action et, pour la plupart, au niveau plafond décrit par la proposition de directive européenne.

Il s'agit donc de postes de travail et de travailleurs effectivement – et non seulement occasionnellement – exposés aux vibrations.

III. ETUDE TRANSVERSALE

A. Prévalences

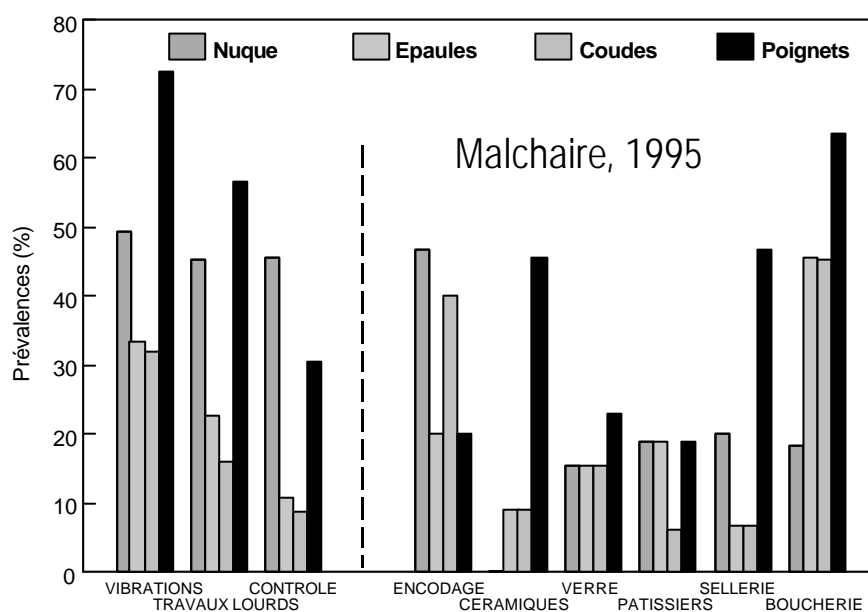
Les travailleurs des trois groupes sont comparables, sauf pour de légères différences de poids.

Le jugement des contraintes par les travailleurs, relevé lors de l'interview, est en rapport avec la sélection des groupes. A l'inverse de ce que les mesurages ont établi, les travailleurs du groupe 2 jugent leurs contraintes plus sévèrement que ceux du groupe 1: ceci est probablement dû à des échelles subjectives de référence différentes, basées sur l'expérience limitée de chacun des travailleurs.

Comme expliqué au chapitre 1, les prévalences de plaintes MS sont difficilement comparables avec celles de la littérature en raison entre autres des méthodologies employées différentes.

Pour situer le problème en Belgique, il est par contre possible de comparer ces prévalences (figure 7.3) avec celles d'autres secteurs (Malchaire, 1995), puisque le recueil des données a été identique (même questionnaire, par interview, ...).

FIGURE 7.3 – Comparaison des prévalences de plaintes MS au cours des 12 derniers mois dans la présente étude et dans l'étude antérieure (Malchaire, 1995)



Les prévalences de TMS sont importantes (près de 50%) au niveau de la nuque pour les 3 groupes de la présente étude et comparables au secteur de l'encodage de l'étude antérieure. Au niveau des épaules et des coudes, les prévalences sont les plus grandes pour le poste des bouchers (près de 50%), suivi des travailleurs exposés aux vibrations (plus de 30%).

C'est essentiellement au niveau des poignets que ces derniers travailleurs présentent les taux de plaintes les plus importants (plus de 70%). Ce résultat est à mettre en parallèle avec les contraintes biomécaniques plus élevées mesurées pour le groupe 1 (vibrations).

Les prévalences de TMS des poignets sont nettement moindres (30 à 50%) pour les deux postes du secteur automobile de ce groupe que pour les autres postes (80 à 100%). Ces deux postes, qui reprennent près d'un tiers des travailleurs du groupe 1, présentent également les contraintes biomécaniques et les durées d'utilisation de machines vibrantes les plus basses. Le fait d'avoir de tels postes à plus faibles contraintes dans l'étude permet d'augmenter la précision à bas niveaux des relations (dose-réponse) qui en découlent.

Quant au groupe 2 de la présente étude (travaux lourds et répétitifs), les prévalences de plaintes aux poignets sont comparables (entre 45 et 60%) aux plaintes relevées aux postes les plus contraignants de l'étude antérieure, à savoir la fabrication de produits céramiques, la sellerie et la boucherie.

Peu de symptômes de pathologies ont été dépistés lors de l'examen clinique. Ces symptômes sont majoritairement rencontrés chez les travailleurs du groupe 1 (vibrations) et mettent en évidence, pour les poignets, des ténosynovites et des kystes.

La présente étude confirme la liaison entre les plaintes neurologiques (picotements) et l'exposition aux vibrations, liaison constatée par d'autres auteurs (Maeda et Griffin, 1993; Nishiyama et al., 1994; Maeda et al., 1996). Cette liaison est très forte puisque la prévalence est de 40% alors que, pour les 2 groupes de non exposés, elle est environ deux fois plus faible (15 à 20%). La distinction est surtout marquante en ce qui concerne la fréquence d'apparition de ces picotements, puisque 25% des travailleurs les éprouvent "souvent" à "toujours", pour seulement 2% dans les deux autres groupes.

Cette prévalence de 40% ne paraît pas exceptionnellement élevée, d'autres auteurs, sur des groupes bien sûr différents, ayant rapporté des valeurs entre 10 et 80% (Pyykkö, 1986; Pelmeur et al., 1992; Gemne et al., 1993).

Selon l'échelle de Stockholm, l'atteinte serait en majorité de stade 1 (peu sévère) avec 9% seulement des cas au stade 2 et aucun au stade 3.

McGeoch et al. (1994) ont rapporté par contre des atteintes beaucoup plus sévères (25% au stade 2 et 9% au stade 3), sur cependant une population plus âgée (25 ans en moyenne d'exposition aux vibrations).

Les questions relatives aux postes de travail (efforts, utilisation de machines vibrantes, ...) associées aux plaintes MS et neurologiques, ne fait que traduire différemment la classification en trois groupes.

Quant aux autres questions, il ressort de l'étude que la tabagie est associée à une diminution de ces plaintes.

Notre revue de la littérature montre que cinq études se sont intéressées à ce critère mais qu'aucune n'a trouvé d'association avec les plaintes au niveau des poignets ou des mains.

L'âge et l'ancienneté n'apparaissent pas comme facteur significatif dans l'étude transversale, probablement du fait que le groupe de travailleurs est relativement jeune (35 ans).

La littérature rapporte 21 études où l'âge a été considéré: 6 seulement ont montré une association. En ce qui concerne l'ancienneté, il s'agit de 5 études sur 15.

La relation logiquement attendue entre les plaintes et l'âge due au vieillissement des tissus n'est donc pas aussi évidente à montrer.

Les odds ratios rapportés par les différentes études ne peuvent être comparés qu'après avoir vérifié que non seulement les groupes exposés mais également les groupes de référence et les critères de classification sont semblables.

Le odds ratio relatif aux plaintes MS des poignets est, dans notre étude, de 2 pour le groupe 2 "travaux lourds répétitifs" et de 9 pour le groupe 1 "vibrations" par rapport au groupe 3 "travaux légers DANS l'industrie".

Cette augmentation des prévalences de TMS en cas de vibrations est supérieure à celles (de 3 à 7) rapportées dans la littérature (Canon et al., 1981; Wieslander et al., 1989; Bovenzi et al., 1991, 1994; Buckle, 1997).

Toutes ces études n'ont cependant pris en considération que le syndrome du canal carpien (SCC) et doivent donc aboutir à des prévalences plus faibles.

Par contre, les groupes contrôles ont été formés, non en milieu industriel (sidérurgique), mais en milieu tertiaire où la probabilité de SCC est a priori plus faible. Ceci conduirait à des OR plus élevés que dans notre étude.

Pour les mêmes raisons, le OR de 4,5 entre travailleurs exposés et non exposés aux vibrations n'est pas directement comparable aux OR (de 1,1 à 2) rapportés par la littérature (Silverstein et al., 1987; Wieslander et al., 1989; Buckle, 1997).

En ce qui concerne les plaintes neurologiques, le odds ratio est également de 4,5 pour le groupe exposé aux vibrations par rapport aux deux autres groupes pour lesquels les prévalences sont du même ordre.

Même si les contraintes biomécaniques sont supérieures pour le groupe 1, il est fondé de penser que les troubles neurologiques résultent essentiellement des vibrations. En effet, ces contraintes sont également plus grandes pour le groupe 2 par rapport au groupe 3, mais les troubles neurologiques sont de même importance.

Les picotements sont par conséquent liés principalement aux vibrations. Les prévalences de picotements sont cependant de quelque 20% chez les non exposés. Cela n'est pas négligeable et il est assez surprenant que peu d'études non liées aux vibrations aient couvert ce problème (excepté lorsqu'il résultait du syndrome du canal carpien).

Le questionnaire scandinave traditionnellement utilisé pour relever les plaintes MS ne contient d'ailleurs pas de questions relatives à ces troubles neurologiques (Kuorinka et al., 1987).

B. Objectivation des plaintes MS et neurologiques à partir des tests fonctionnels et sensitifs

Les tests fonctionnels et sensitifs donnent des résultats différents pour les trois groupes, différences qui doivent être interprétées en tenant compte des facteurs confondants.

Les corrélations entre les résultats des différents tests sont faibles ($R < 0,4$) suggérant qu'ils sont bien complémentaires comme souhaité lors du choix des tests. Pour un même test, les valeurs relevées sur des doigts différents (majeur et auriculaire pour les SPP et SPV) ou à des fréquences différentes (SPV) sont par contre très corrélées (R de 0,6 à 0,8). Ce n'est qu'en cas d'un syndrome du canal carpien qu'un déséquilibre entre doigts peut se manifester du fait de l'atteinte du nerf médian et pas du nerf cubital. Ceci n'intervient qu'occasionnellement et les corrélations globalement restent donc très significatives.

Ces résultats sont similaires à ceux obtenus lors de l'étude antérieure (Malchaire, 1995).

Les principaux facteurs qui sont liés et apparemment qui influencent les résultats des tests sont l'âge, le poids, la taille, la pratique d'un sport et l'antécédent d'accidents aux membres supérieurs. La latéralité influence essentiellement la force maximale volontaire. Ces relations avaient à nouveau déjà été constatées dans l'étude antérieure (Malchaire, 1995). Bien que peu liés aux plaintes, ces facteurs doivent donc être pris en compte lors de l'analyse de la relation entre ces tests et les plaintes.

L'analyse logistique multivariée montre une légère association entre les plaintes, une diminution de l'angle maximal de flexion du poignet et une augmentation du seuil de perception à la pression (majeur et auriculaire).

Cette association est cependant trop faible que pour permettre de fixer des valeurs limites ayant une sensibilité et une spécificité suffisamment élevée pour établir un diagnostic fiable.

Pour déterminer si les résultats des différents tests, individuellement et collectivement, permettent bien de confirmer l'existence de troubles neurologiques en cas de plaintes, il y aurait probablement lieu de réaliser les tests lorsque les sujets se plaignent. Cela n'a pas été le cas: les plaintes sont celles survenues au cours des 12 derniers mois et on peut penser que la situation s'est améliorée. C'est certainement vrai dans les cas les plus graves où les plaintes auraient donné lieu à des arrêts de travail, puisque les sujets étaient au travail lors de la passation des tests.

On doit donc en conclure non pas que les tests ne permettent pas le dépistage d'une pathologie, mais que les tests ne montrent aucun signe résiduel chez les sujets ayant présenté des plaintes au cours de l'année antérieure, mais ayant continué ou étant revenus au travail.

En conclusion, les picotements (stade 1 de l'échelle de Stockholm) ressentis occasionnellement par quelque 40% des utilisateurs de machines vibrantes ne peuvent être corroborés par les tests fonctionnels et sensitifs.

Or, la littérature suggère, entre autres, que les seuils de perception à la pression et aux vibrations évoluent en fonction de l'atteinte neurologique. Il faut donc en conclure que les symptômes de stade 1 observés au cours de l'étude ne sont pas objectivables par les tests utilisés. Ils seraient les premiers symptômes de l'atteinte neurologique et précéderaient toute modification significative des fonctions sensitives. Cette conclusion contredit quelque peu l'observation de Lawson et Nevell (1997): le nombre de cas étudiés par ces auteurs était cependant trop faible.

Qu'en est-il pour les plaintes aux stades 2 et 3 de l'échelle de Stockholm? Notre étude ne permet pas de conclure.

En milieu industriel, on est intéressé par la prévention des manifestations dès le stade 1: les tests ne permettent donc pas de corroborer les plaintes à ce niveau.

C. Associations entre les contraintes aux postes de travail et les plaintes MS (poignets) et neurologiques

Les contraintes biomécaniques et vibratoires mesurées permettent a priori de caractériser avec plus de précision l'exposition des différents travailleurs que la simple classification en trois groupes ou les opinions émises par chacun d'eux sur leurs conditions de travail.

L'association avec les plaintes MS et neurologiques a été étudiée en prenant en considération les cofacteurs (âge, ...).

L'étude a montré que chacun des paramètres de contrainte pris séparément, à l'exception des vitesses angulaires, est significativement associé à l'existence des plaintes MS ou neurologiques.

Quand ces paramètres sont considérés simultanément, la force est le facteur le plus important aussi bien pour les plaintes MS que neurologiques. Ceci corrobore les résultats de l'étude antérieure (Malchaire, 1995), ainsi que ceux de Silverstein (1986).

La durée d'utilisation des machines vibrantes intervient aussi probablement de façon différente pour les deux types de plaintes:

- par le port de la machine pour les plaintes MS
- et par l'exposition aux vibrations pour les plaintes neurologiques.

Par contre, les paramètres de vibration ne sont liés qu'aux plaintes neurologiques. Ceci est en accord avec la littérature où les troubles neurologiques sont mis en évidence dans les études avec exposition aux vibrations et peu dans les études sur les TMS (voir chapitre 1).

Ces plaintes neurologiques sont plus significativement associées à l'accélération d'exposition personnelle (A_{EP}) qu'à la dose vibratoire personnelle ($A_{EP} \sqrt{T}$). L'ancienneté au poste (T) n'apparaît pas comme un facteur essentiel. Cette ancienneté est en moyenne relativement faible dans notre étude (5 à 7 ans selon le poste).

Les accélérations d'exposition personnelle utilisées ci-dessus sont les valeurs pondérées en fréquence selon les indications de la norme ISO 5349. Il faut remarquer que la relation avec les plaintes neurologiques a été nettement plus faible lorsque les valeurs non pondérées ont été utilisées et que la prise en compte indirectement du contenu spectral par la différence entre les valeurs pondérées et non pondérées n'a rien donné. Les résultats ne permettent donc pas de critiquer la pondération fréquentielle de la norme.

IV. ETUDE PROSPECTIVE

A. Incidences

Les prévalences de plaintes rapportées au tableau 5.4 étaient assez considérables. Les incidences au cours des deux années de l'étude prospective le sont tout autant (tableau 6.1): quelque 20% des sujets, quel que soit le groupe, développent des plaintes MS et 10 à 20% des picotements dans les mains. Les plaintes sont aussi importantes quel que soit le côté considéré des membres supérieurs. Ces incidences sont supérieures à celles relevées lors de l'étude antérieure (Malchaire, 1995), à l'exception de celles pour le groupe 3 qui sont du même ordre.

Etant donné les prévalences de plaintes MS et neurologiques importantes, les effectifs pour l'étude prospective auraient été très faibles si le critère d'absence d'antécédents avait été retenu comme pour l'étude antérieure. La puissance statistique aurait été a priori insuffisante. Ce problème est classique et avait été rencontré notamment par Bovenzi et al. (1994) qui, au départ de leur étude sur 62 travailleurs de la pierre, constataient la présence de symptômes neurologiques dans 75% des cas. Un critère de sévérité des plaintes a dès lors été utilisé, ce qui rend les résultats difficilement comparables avec ceux de la littérature et notamment avec ceux de l'étude antérieure.

La "sévérité" des plaintes neurologiques est définie seulement en fonction de la fréquence de survenue des picotements (souvent à toujours). Un critère d'intensité eut été peu fiable du fait de la subjectivité de l'évaluation.

Pour les TMS et en raison de la diversité des pathologies (musculaires, tendineuses, ...) et des symptômes (durée et nature: fatigue, douleur, gêne, ...), la "sévérité" a été définie en plus en fonction du caractère de la gêne (douleurs aiguës et localisées) et de sa durée (supérieure à un jour).

Les incidences sont supérieures dans le groupe exposé aux vibrations aussi bien pour les plaintes MS (15%) que neurologiques (13%). Le risque relatif pour les plaintes MS avérées est de 1,5 par rapport au groupe 2 (travaux lourds répétitifs) et de 2,5 par rapport au groupe 3 (travaux légers). Il est environ 2 fois supérieur (2,5 et 5 respectivement) pour les plaintes neurologiques avérées.

Aucune comparaison ne paraît possible avec des données de la littérature. En effet, celle-ci ne rapporte que des études transversales et les rares études prospectives concernent le développement de troubles vasculaires (Brubaker et al., 1987; Koskimies et al., 1992; Petersen et al., 1995).

Les risques relatifs obtenus au cours de la présente étude prospective sont dès lors particulièrement intéressants. Ils sont de l'ordre de grandeur (2 à 7) des odds ratios rapportés par différentes études transversales pour les troubles MS (Silverstein et al., 1987; Canon et al., 1987; Buckle, 1997).

L'examen clinique montre des incidences annuelles de pathologies au niveau des poignets, de près de 4% à droite et de 1% à gauche. Il s'agit de ténosynovites, dans 14 des 17 nouveaux cas dont 3 ténosynovites de de Quervain.

Cette prédominance de ténosynovites des poignets ainsi que d'épicondylites (surtout latérales) au niveau des coudes est tout à fait comparable, ainsi qu'on l'a vu au chapitre 1, à la répartition des dossiers, examinés en 1997 par la commission "système ouvert" du Fonds des Maladies Professionnelles (FMP, 1998).

C. Prédiction des plaintes MS (poignets) et neurologiques avérées à partir des tests fonctionnels et sensitifs

L'analyse logistique ne montre aucune relation entre le développement de plaintes avérées MS et les résultats des tests fonctionnels et sensitifs un an auparavant. Les tendances observées (seuils de perception à la pression et aux vibrations) sont différentes de celles notées lors de l'étude antérieure (angles, force de pincement) et donc l'apport des tests ne paraît guère significatif au niveau des groupes. Cela n'empêche qu'au niveau de chaque travailleur considéré individuellement, le temps de latence sensitif par exemple, pourra mettre en évidence une atteinte différente entre les nerfs médian et cubital et suggérera donc l'existence d'un syndrome du canal carpien.

Les tests sensitifs sont a priori plus orientés vers la détection de troubles neurologiques. L'analyse logistique multivariée montre que trois d'entre eux sont positivement associés à la survenue ultérieure de plaintes neurologiques avérées (voir tableau 6.8).

Il paraît cependant difficile de vouloir exploiter ces tests pour prédire le risque au niveau individuel. En effet, le modèle logistique multivariée donne une probabilité de développement de plaintes neurologiques avérée supérieure à 0,5 pour 25% seulement des poignets qui firent l'expérience de ces problèmes au cours de l'année suivante.

Ceci paraît logique, compte tenu des conclusions de l'étude transversale. Si les tests ne permettent pas d'objectiver les plaintes sur le plan individuel, il leur est, a fortiori, plus difficile encore de prédire la survenue d'une plainte au cours de l'année suivante.

D. Relations entre les contraintes biomécaniques et vibratoires et les plaintes MS (poignets) et neurologiques

Le risque de survenue de plaintes "avérées" MS (OR = 3) ou neurologiques (OR = 10) est nettement plus important pour les travailleurs exposés aux vibrations que pour ceux des deux autres groupes. Pour les plaintes neurologiques, la relation avec les vibrations est plus marquée que celle trouvée lors de l'étude transversale. C'est l'inverse pour les plaintes MS.

Six caractéristiques individuelles sont associées à la survenue de plaintes MS "avérées":

- le côté droit: les contraintes vibratoires y sont en général plus élevées;
- le poids, associé positivement et la taille, associée négativement;
- les maladies chroniques: ceci fut également observé lors de l'étude antérieure (Malchaire, 1995) mais pas dans d'autres études couvrant ce facteur (Canon et al., 1981; Silverstein et al., 1987);

- l'ancienneté au poste de travail, associée négativement, peut-être à cause du "healthy worker effect", bien qu'il s'agisse essentiellement de sujets jeunes;
- le fait d'être souvent irrité.

Le risque de développement de plaintes neurologiques avérées est lié aux mêmes facteurs, avec en plus:

- l'âge: expliqué par la dégénérescence des tissus (voir chapitre 1);
- les troubles psychosociaux (caractère irrité mais aussi troubles du sommeil et céphalées): avec des OR très importants (7 à 30). Il est à remarquer que ces facteurs psychosociaux touchent moins le groupe 1 (vibrations) pour lequel les contraintes et les plaintes sont les plus importantes.

Ceci corrobore les résultats de l'étude antérieure pour les incidences de TMS ainsi que la littérature en général (Hagberg et al., 1995).

- les accidents aux membres supérieurs survenus au cours de la vie: avec apparemment un effet protecteur. Aucune explication ne nous paraît plausible.
- les difficultés à réaliser des tâches fines: le nombre de travailleurs concernés (6) est cependant très limité;
- la faiblesse et la fatigue fréquente dans les mains ou les bras: ces deux facteurs concernent essentiellement le groupe 2 (travaux lourds et répétitifs) et, en quelque sorte, avec les autres données relatives au poste de travail, établit la distinction avec le groupe 1 (vibrations). Ces deux facteurs sont fortement corrélés et interviennent conjointement dans le modèle logistique avec des OR opposés qui s'équilibrent.

Les modèles logistiques multivariés montrent clairement que

- la probabilité de développement de plaintes MS avérées est associée aux forces mises en jeu;
- celle de plaintes neurologiques avérées est associée à l'exposition aux vibrations.

Les figures 7.4 et 7.5 traduisent ces relations, dans le cas d'un sujet "standard" (35 ans, 8 ans d'ancienneté, 80 kg, 175 cm), sans troubles psychosociaux ni antécédents (accidents, maladies) et rencontrant les contraintes de travail moyennes relevées au cours de cette étude (modèle MS: mEMGr = 25%, rANG = 50#/min; mVD = 25°/s; modèle neurologique: mVF = 40°/s, mDr = 50% et $A_{EP} = 1 \text{ ms}^{-2}$).

Il faut cependant retenir que forces, répétitivité et exposition aux vibrations sont des facteurs liés: ainsi, les variables A_{EP} et mEMGr sont corrélées à $R = 0,57$. Les relations avec les plaintes ne sont donc pas aussi nettes et définitives qu'exposées ci-dessus.

Cela est d'autant plus vrai que pour les plaintes neurologiques, l'association est très nette avec A_{EP} , qui représente l'énergie vibratoire moyenne reçue par jour, mais est inexistante avec la dose: énergie reçue au poste actuel.

FIGURE 7.4 – Evolution de la probabilité de survenue de plaintes MS et neurologiques avérées en fonction de la moyenne relative de l'activité musculaire

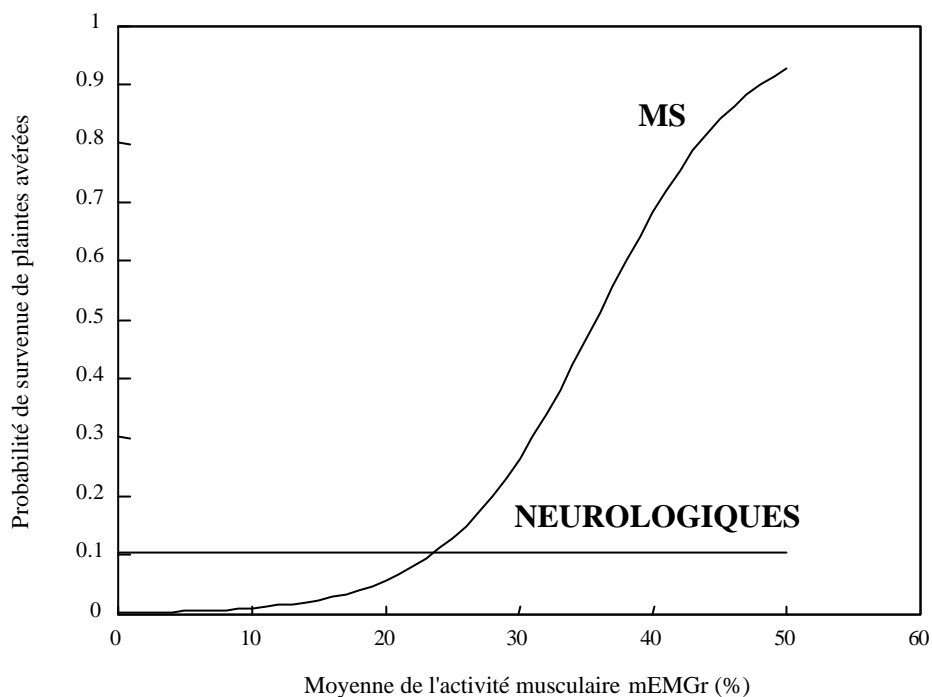
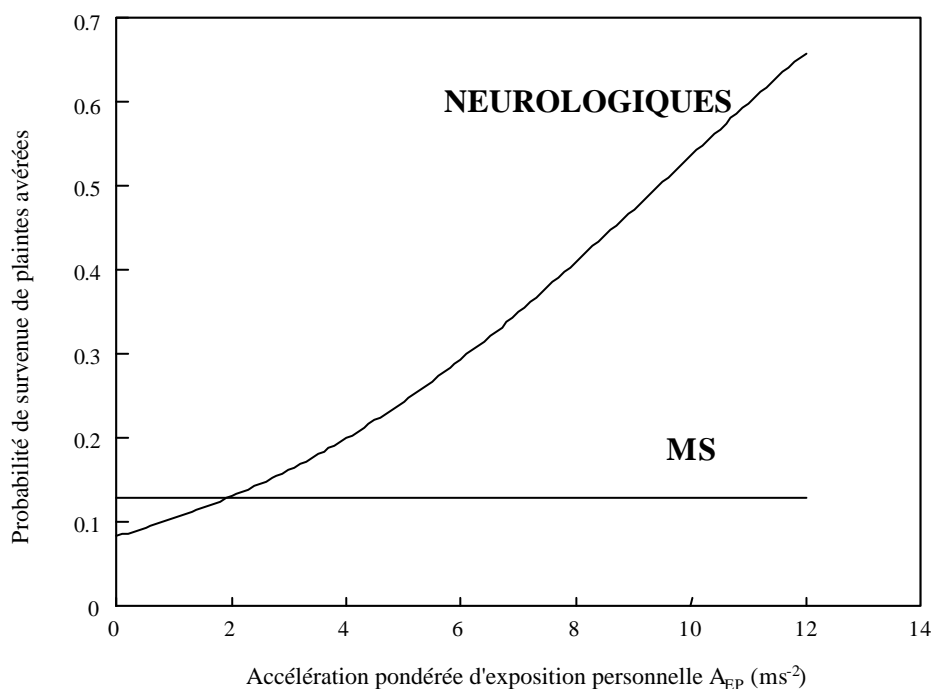


FIGURE 7.5 – Evolution de la probabilité de survenue de plaintes MS et neurologiques avérées en fonction de l'accélération pondérée d'exposition personnelle



La probabilité de survenue de plaintes neurologiques avérées (figure 7.5) peut être calculée par l'expression simplifiée suivante:

$$p\% = \frac{A_{EP}^2}{2} + 11 \quad (R = 0,994)$$

Cette relation de prédiction du risque de troubles neurologiques est linéaire en fonction du carré de l'accélération d'exposition personnelle et cela pour une large variation de cette accélération (0 à 10 ms⁻²).

Elle est complémentaire au modèle de prédiction du risque vasculaire proposé par la norme ISO 5349.

Contrairement à Bovenzi et al. (1994), les résultats de cette étude ont donc permis d'établir une relation de type dose-réponse. Elle ne tient cependant compte que de l'énergie vibratoire reçue quotidiennement (A_{EP}^2) et non du nombre d'année d'exposition (dose vibratoire personnelle).

Ceci pourrait souligner le caractère temporaire et réversible de ces troubles neurologiques en début d'exposition professionnelle, comme de nombreuses études en laboratoire l'ont démontré sur des sujets sains (Maeda et Griffin, 1993; Kihlberg et al., 1995; Maeda et al., 1996; Malchaire et al., 1998).

L'étude de ces troubles temporaires est le sujet de l'étude annexe.

L'importance de ce modèle de prédiction du risque neurologique est à souligner puisqu'à notre connaissance aucun autre de ce type n'existe dans la littérature.

Comme déjà dit auparavant et confirmé par les résultats de la partie prospective, la structure de la présente étude n'a pas permis de discuter de la pertinence ou non de la pondération fréquentielle définie par la norme ISO 5349 pour le mesurage de l'exposition aux vibrations. Les relations entre les plaintes et la contrainte vibratoire exprimée avec ou sans cette pondération sont en effet semblables.

CONCLUSIONS

L'étude prospective, menée sur une période de trois ans, avait les objectifs suivants:

1. Faire la synthèse de la littérature sur les problèmes musculosquelettiques du membre supérieur chez les travailleurs avec et sans exposition aux vibrations.

La synthèse de quelque 300 articles et ouvrages de référence constitue le premier chapitre de ce rapport. Il introduit la problématique des troubles musculosquelettiques (TMS), du syndrome des vibrations (HAVS) et fait le lien entre ces pathologies, les tests fonctionnels et sensitifs pouvant servir à leur dépistage et les facteurs de risque connus ou suspectés.

Une revue épidémiologique situe l'ampleur du problème dans la plupart des pays industrialisés et en particulier en Belgique par l'étude antérieure des auteurs sur les troubles MS (Malchaire, 1995).

2. Etudier les prévalences de problèmes musculosquelettiques, vasculaires et neurologiques dans la population ouvrière belge.

Les prévalences ont été relevées pour trois groupes de travailleurs:

- Groupe 3: travaux légers non répétitifs: groupe contrôle.
- Groupe 2: travaux lourds et répétitifs.
- Groupe 1: travaux lourds et répétitifs + exposition aux vibrations.

La comparaison des données avec celles obtenues lors de l'étude antérieure (Malchaire, 1995) souligne l'importance du problème: les prévalences de TMS sont les plus importantes parmi les travailleurs exposés aux vibrations et ce dans chaque zone anatomique.

Les plaintes neurologiques sont également nettement plus fréquentes chez les utilisateurs de machines vibrantes (40%) que dans les autres groupes (15 à 20%). La fréquence de survenue de ces troubles neurologiques distingue encore plus nettement les travailleurs exposés aux vibrations, 25% éprouvant souvent ou toujours des picotements pour seulement 2% dans les deux autres groupes.

Par contre, les troubles vasculaires sont relativement peu nombreux (10%) et à un stade léger chez les travailleurs exposés aux vibrations.

3. Etudier la relation entre ces prévalences de problèmes MS et neurologiques et les facteurs individuels, les facteurs biomécaniques et les caractéristiques d'exposition aux vibrations.

Les prévalences de plaintes neurologiques ne dépendent pas des caractéristiques individuelles, à l'exception de l'opinion sur son état de santé.

Les plaintes MS au niveau des poignets sont associées aux contraintes biomécaniques et tout particulièrement aux contraintes de force, tandis que les plaintes neurologiques sont essentiellement liées aux contraintes vibratoires. Il est à noter que les contraintes biomécaniques sont plus importantes chez les travailleurs exposés aux vibrations vraisemblablement en raison du poids de la machine à manipuler.

4. Discuter la validité de la pondération fréquentielle proposée par la norme ISO 5349.

La relation entre les fréquences des vibrations et l'apparition des troubles neurologiques n'a pu être mise en évidence, la corrélation étant du même ordre lorsque sont utilisées les accélérations pondérée et non pondérée.

Cette relation sera discutée dans l'étude annexe ainsi que la validité de la pondération fréquentielle proposée par la norme.

5. Etudier la relation entre les différents stades d'atteinte neurologique de l'échelle de Stockholm et les résultats de certains tests fonctionnels et sensitifs.

Les tests fonctionnels mais surtout sensitifs (SPV, SPP, TLS, ...) ont été choisis sur base des données de la littérature, en raison de leur complémentarité et de leur pertinence pour la détection d'altérations neurologiques.

L'étude n'a cependant pas permis de mettre en évidence de relation suffisamment précise entre les différents stades et les résultats des tests, de sorte que ceux-ci ne permettent pas de corroborer la classification de Stockholm.

Il est postulé que cette absence de relation est due à ce que les premiers symptômes (picotements) apparaissent avant toute modification significative des tests sensitifs, alors que les atteintes neurologiques rencontrées au cours de l'étude n'étaient que faibles (stade 1).

6. Prédire l'atteinte neurologique en fonction de la nature de l'exposition aux vibrations.

L'évolution à long terme (sur deux années) des troubles neurologiques avérés, c'est-à-dire fréquents, a pu être établie en fonction de l'accélération pondérée d'exposition personnelle.

La relation obtenue tient compte des caractéristiques personnelles (âge, poids, taille), mais aussi des facteurs psychosociaux (irrité, troubles du sommeil, céphalées).

La comparaison des évolutions des TMS d'une part et des plaintes neurologiques d'autre part a clairement mis en évidence que les vibrations sont le facteur principal responsable des troubles neurologiques.

Les travailleurs exposés aux vibrations présentent également les contraintes biomécaniques les plus élevées en raison du port de la machine mais aussi de l'interaction des vibrations sur ces contraintes. Ceci paraît expliquer le risque accru de TMS (voir chapitre 1) constaté chez les utilisateurs de machines vibrantes.

7. Déterminer des valeurs limites de l'exposition aux vibrations.

L'étude prospective du développement des plaintes neurologiques en fonction de l'accélération d'exposition personnelle (A_{EP}) permet de préciser le risque associé aux valeurs limites proposées par le projet de directive européenne 93/C77/02:

- valeur seuil: A_{EP} inférieure à 1 ms^{-2} , risque acceptable, probabilité de plaintes neurologiques inférieure à 10%;
- valeur d'action: A_{EP} égale à $2,5 \text{ ms}^{-2}$, probabilité de plaintes neurologiques égale à 15%;
- valeur plafond: A_{EP} supérieure à 5 ms^{-2} , risque inacceptable, probabilité de plaintes neurologiques égale à 25%.

L'étude a montré que les utilisateurs de machines vibrantes constituent un groupe particulièrement à risque à la fois de TMS et de problèmes neurologiques. Des mesures de prévention s'imposent donc tant au niveau des vibrations, que des postures, des forces, ...

Une brochure (Malchaire, 1998) actuellement en cours de publication par le Ministère de l'Emploi et du Travail a été rédigée dans le but d'organiser, d'orchestrer la collaboration des différents intervenants (travailleurs, encadrement technique, préventeurs, ...) pour aboutir à une prévention réelle de ces risques liés aux vibrations manubrachiales. Les facteurs biomécaniques ont été abordés dans le même esprit dans un précédent ouvrage (Malchaire et Indesteege, 1997).

Les auteurs espèrent que ces travaux encourageront la recherche de solutions concrètes de nature à éviter aux utilisateurs de machines vibrantes la morbidité décrite dans cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

----- Les profils de postes. Méthode d'analyse des conditions de travail de la Régie Nationale des Usines Renault. Masson, Paris, 1979, pp. 98.

Aatola S.A., Färkkilä M., Pyykkö I. et al., Vibration perception threshold of forest worker's finger during temporary obstructed blood circulation. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1990, 62, 451-453.

Ahonen M., Launis M., Kuorinka T. (eds) *Ergonomic workplace analysis*. Ergonomics Section, Finnish Institute of Occupational Health, 1989.

Allieu Y., Brahim B., Ascencion G., Les instabilités du carpe. Bilan et sémiologie radiologique. *Ann. Radiol.*, 1992, 25, 275-287.

Aptel M., Etude dans une entreprise de montage d'appareils électroménagers des facteurs de risque professionnels du syndrome du canal carpien. I.N.R.S., France, 1993, pp. 66.

Armstrong T.J., Upper-extremity posture: definition, measurement and control. In: Corlett N., Wilson J., Manenica I. (eds) *The ergonomics of working postures*. Taylor and Francis, London, 1986, 59-73.

Armstrong T.J., Fine L.J., Radwin R.G. et al., Ergonomics and the effects of vibration in hand-intensive work. *Sc. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 286-286.

Ashbury F.D., Occupational repetitive strain injuries and gender in Ontario 1986-1991. *J. Occup. Environ. Med.*, 1995, 37, 4, 479-485.

Banister P.A., Smith F.V., Vibration-induced white fingers and manipulative dexterity. *Brit. J. Industr. Med.*, 1972, 29, 264-267.

Beaumont D., Noeueglise M., Vibert M.L., Touboul E.A., Fumery B., Mains et vibrations. La tactilométrie digitale. *Revue de Médecine du Travail*, 1992, XIX, 1, 11-14.

Bell-Krotoski J.A., Sensibility testing: state of the art. In: Hunter J.M., Schneider L.H., Mackin E.J., Callahan A.D. (eds) *Rehabilitation of the hand: surgery and therapy*. The C.V. Mosby Co, St. Louis, 1990a, 575-584.

Bell-Krotoski J.A., Light touch-deep pressure testing using Semmes-Weinstein monofilaments In: Hunter J.M., Schneider L.H., Mackin E.J., Callahan A.D. (eds) *Rehabilitation of the hand: surgery & therapy*. The C.V. Mosby Co, St. Louis, 1990b, 585-593.

Bernard B.P. (ed.), *Musculoskeletal disorders (MSDs) and workplace factors*. NIOSH, 1997.

Bleecker M.L., Recent developments in the diagnosis of carpal tunnel syndrome and other common nerve entrapment disorders. *Seminars in occupational medicine*, 1986, 1, 3, 205-211.

Bleecker M.L., Agnew J., New techniques for the diagnosis of carpal tunnel syndrome. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 385-388.

Bovenzi M., Finger thermometry in the assessment of subjects with vibration-induced white finger. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 348-351.

Bovenzi M., Medical aspects of the hand-arm vibration syndrome. *Int. J. Indust. Erg.*, 1990, 6, 61-73.

Bovenzi M., Fiorito A., Volpe C., Bone and joint disorders in the upper extremities of chipping and grinding operators. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1987, 59, 189-198.

Bovenzi M., Zadini A., Franzinelli A. et al., Occupational musculoskeletal disorders in the neck and upper limbs of forestry workers exposed to hand-arm vibration. *Ergonomics*, 1991, 34, 5, 547-562.

Bovenzi M., Cerri S., Merseburger A. et al., Hand-arm vibration syndrome and dose-response relation for vibration induced white finger among quarry drillers and stonecarvers. *Occupational and Environmental Medicine*, 1994, 51, 603-611.

Bovenzi M., Griffin M.J., Ruffell C.M., Acute effects of vibration on digital circulatory function in healthy men. *Occupational and Environmental Medicine*, 1995, 52, 834-841.

- Bovenzi M., Franzinelli A., Mancini R. et al., Dose-response relation for vascular disorders induced by vibration in the fingers of forestry workers. *Occupational and Environmental Medicine*, 1995, 52, 722-730.
- Bovenzi M., Griffin M.J., Haemodynamic changes in ipsilateral and controlateral fingers caused by acute exposures to hand transmitted vibration. *Occupational and Environmental Medicine*, 1997, 54, 566-576.
- Brammer A.J., Modèle pour l'apparition des doigts blancs pendant l'exposition des mains aux vibrations des tronçonneuses. *Archives des Maladies Professionnelles*, 1984, 45, 5, 315-322.
- Brammer A.J., Piercy J.E., Auger P.L., Assessment of impaired tactile sensation: a pilot study. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 380-384.
- Brammer A.J., Pyykkö I., Vibration-induced neuropathy. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 317-322.
- Brammer A.J., Taylor W., Lundborg G., Sensorineural stages of the hand-arm vibration syndrome.. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 279-283.
- Brezinova V., Quinton D.N., Response to cold and abnormalities of nerve conduction velocity in hand-arm vibration syndrome. *Brit. J. Industr. Med.*, 1991, 48, 353-354.
- Brubaker R.L., Mackenzie C.J.G., Hertzman C. et al., Longitudinal study of vibration-induced white finger among coastal fallers in British Columbia. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 305-308.
- Buckle P.W., Work related upper limb syndrome. *British Medical Journal*, 1997, pp. 11.
- Buckle P., Upper limb disorders and work: the importance of physical and psychosocial factors. *Journal of Psychosomatic Research*, 1997, 43, 1, 17-25.
- Burdorf A., Monster A., Exposure to vibration and self-reported health complaints of riveters in the aircraft industry. *Ann. Occup. Hyg.*, 1991, 35, 3, 287-298.
- Burke M.J., Fear E.C., Wright V., Bone and joint changes in pneumatic drillers. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 1977, 36, 276-279.
- Byström S., Physiological response and acceptability of isometric intermittent handgrip contractions. *Arbete och Hälsa*, 1991, 38, pp. 174.
- Callahan A.D., Sensibility testing: clinical methods In: Hunter J.M., Schneider L.H., Mackin E.J., Callahan A.D. (eds) *Rehabilitation of the hand: surgery and therapy*. The C.V. Mosby Co, St. Louis, 1990, 594-610.
- Cannon L.J., Bernacki E.J., Walter S.D., Personal and occupational factors associated with carpal tunnel syndrome. *J. Occup. Med.*, 1981, 23, 4, 255-258.
- Carpentier P., Dimitriou R., Puech A.M., De Gaudemaris, Franco A., Mode de dépistage objectif des troubles vasculaires périphériques chez les sujets exposés à la fabrication de chlorure de vinyle. *Arch. Mal. Prof.*, 1984, 45, 298.
- Claus D., Hilz M.J., Hummer I. et al., Methods of measurement of thermal thresholds. *Acta Neurol. Scand.*, 1987, 76, 288-296.
- Chrisanne G. et al., Electrodiagnostic characteristics of acute carpal tunnel syndrome. *Arch. Phys. Med. Reha.*, 1987, 68, 545.
- Cock N., Masset D., Le diagnostic précoce de troubles musculosquelettiques du membre supérieur en médecine du travail. *Cahiers de Médecine du Travail*, 1994, XXXI, 2, 93-100.

- Cook T.M., Rosecrance J.C., Brokman S.J. et al., Reliability of a digital electroneurometer for the determination of motor latency of the median nerve. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 1991, 1, 2, 105-112.
- Cooper C., Baker P.D., Upper limb disorders. *Occupational Medicine*, 1996, 46, 6, 435-437.
- Dahalan J.B., Fernandez J.E., Psychophysical frequency for a gripping task. *Int. J. Indust. Erg.*, 1993, 12, 219-230.
- Delavignette J.P., Malchaire J., Huberlant J.M., Conditions ergonomiques d'utilisation des machines vibrantes. VIème programme ergonomique CECA. Rapport final de la Recherche 7250-13-015, 1993, pp. 95.
- Dellon A.L., Evaluation of sensibility and re-education of sensation in the hand. Williams & Wilkins, Baltimore/London, 1981, 141-167.
- Deng H., He F., Zhang S. et al., Quantitative measurements of vibration threshold in healthy adults and acrylamide workers. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1993, 65, 53-56.
- Desrosiers J., Hébert R., Bravo G. et al., Comparison of the Jamar dynamometer and the Martin vigorimeter for grip strength measurements in a healthy elderly population. *Scand. J. Rehab. Med.*, 1995, 27, 137-143.
- Desrosiers J., Hébert R., Bravo G., Dutil E., The Purdue Pegboard test: normative data for people aged 60 and over. *Disability and Rehabilitation*, 1995, 17, 5, 217-224.
- Duclaux R., Exposés didactiques. Les récepteurs thermiques cutanés. *J. of Physiol.*, 1977, 73, 849-862.
- Durnil W.G., Rosecrance J.C., Cook T.M., Reliability of distal sensory latency measures of the median nerve using an electroneurometer. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 1993, 3, 2, 105-112.
- Dutra Leao R., Comparaison de méthodes d'analyse du risque musculosquelettique des membres supérieurs. Mémoire de Licence en Ergonomie, Université catholique de Louvain, 1994, pp. 126.
- Dyck P.J., Zimmerman I., Gillen D.A. et al., Cool, warm, and heat-pain detection thresholds: testing methods and inferences about anatomic distribution of receptors. *Neurology*, 1993, 43, 1500-1508.
- Ekenvall L., Nilsson B.Y., Gustavsson P., Temperature and vibration thresholds in vibration syndrome. *Brit. J. Industr. Med.*, 1986, 43, 825-829.
- Ekenvall L., Lindblad L.E., Effect of tobacco use on vibration white finger disease. *J. Occup. Med.*, 1989, 31, 1, 13-16.
- Ekenvall L., Gemne G., Tegner R., Correspondence between neurological symptoms and outcome of quantitative sensory testing in the hand-arm vibration syndrome. *Brit. J. Industr. Med.*, 1989, 46, 570-574.
- English C.J., Maclaren W.M., Court-Brown C. et al., Relations between upper limb soft tissue disorders and repetitive movements at work. *Am. J. Ind. Med.*, 1995, 27, 75-90.
- Erdil M., Dickerson O.B., Glackin E., Cumulative trauma disorders of the upper extremity In: Zenz C., Dickerson O.B., Horvath E.P. (eds) *Occupational Medicine*. Mosby, St. Louis, 1994, 48-64.
- Färkkilä M., Grip force in vibration disease. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1978, 4, 159-166.
- Färkkilä M., Pyykkö I., Korhonen O. et al., Vibration-induced decrease in the muscle force in lumberjacks. *Eur. J. of Appl. Physiol.*, 1980, 43, 1-9.
- Färkkilä M., Aatola S., Starck J. et al., Hand-grip force in lumberjacks: two-year follow-up. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1986, 58, 203-208.

- Färkkilä M., Pyykkö I., Jäntti V. et al., Forestry workers exposed to vibration: a neurological study. *Brit. J. Industr. Med.*, 1988, 45, 188-192.
- Fernandez J.E., Strength and range of motion of females with carpal tunnel syndrome. *Int. J. Indust. Erg.*, 1991, 7, 323-326.
- Fleishman E.A., Dimensional analysis of psychomotor abilities. *Journal of Experimental Psychology*, 1954, 48, 6, 437-454.
- Fleishman E.A., Ellison G.D., A factor analysis of fine manipulative tests. *Journal of Applied Psychology*, 1962, 46, 2, 96-105.
- Fonds des Maladies Professionnelles - Commission "système ouvert". Rapport d'activités 1997. Fonds des Maladies Professionnelles, 1997, CT 98/05/03, pp. 21.
- Fruhstorfer H., Lindblom U., Schmidt W. G., Method for quantitative estimation of thermal thresholds in patients. *J. of Neurology*, 1976, 39, 1071-1075.
- Futatsuka F., Pyykkö I., Färkkilä M., Korhonen O., Starck J.P., Blood pressure, flow and peripheral resistance of digital arteries in vibration syndrome. *Br. J. Ind. Med.*, 1983, 40, 434-441.
- Gautherie M., Meyer S., Bruy C. et al., Examen chronothermodynamique informatisé des mains. Application à la détection précoce de la maladie professionnelle des vibrations. *Revue de Médecine du Travail*, 1992, XIX, 1, 15-28.
- Gelberman R.H., Szabo R.M., Williamson R.V. et al., Sensibility testing in peripheral-nerve compression syndromes. *J. Bone Joint Surg.*, 1983, 65-a, 5, 632-638.
- Gellman H., Gelberman R.H., Tan A.M. et al., Carpal tunnel syndrome. *J. Bone Joint Surg.*, 1986, 68-A, 5, 735-737.
- Gemne G., Pathophysiology and multifactorial etiology of acquired vasospastic disease (Raynaud syndrome) in vibration-exposed workers. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1982, 8, 243-249.
- Gemne G., Diagnostics of hand-arm system disorders in workers who use vibrating tools. *Occupational and Environmental Medicine*, 1997, 54, 90-95.
- Gemne G., Pyykkö I., Taylor W. et al., The Stockholm workshop scale for the classification of cold-induced Raynaud's phenomenon in the hand-arm vibration syndrome (revision of the Taylor-Pelmeur scale). *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 275-278.
- Gemne G., Saraste H., Bone and joint pathology in workers using hand-held vibrating tools. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 290-300.
- Gemne G., Lundström R., Hansson J.-E., Disorders induced by work with hand-held vibrating tools. *Arbete och Halsa*, 1993, 6, 1-83.
- Gerr F., Letz R., Harris-Abbott D. et al., Sensitivity and specificity of vibrometry for detection of carpal tunnel syndrome. *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 1995, 37, 9, 1108-1115.
- Gomes Ferreira M.L., L'exposition aux vibrations lors de l'utilisation des meuleuses. Mémoire de Licence en Ergonomie, Université catholique de Louvain, 1993, pp. 129.
- Griffin M.J., Vibration injuries of the hand and arm: their occurrence and the evolution of standards and limits. London, Her Majesty's Stationery Office, 1980, 1-36.
- Griffin M. J., Handbook of human vibration. Academic Press, 1990, pp. 988.

Griffin M. J., Measurement, evaluation, and assessment of occupational exposures to hand-transmitted vibration. *Occupational and Environmental Medicine*, 1997, 54, 73-89.

Grunert B.K., Wertsch J.J., Matloub H.S. et al., Reliability of sensory threshold measurement using a digital vibrogram. *J. Occup. Med.*, 1990, 32, 2, 100-102.

Guyton A.C., *Neurophysiologie*. Masson, 1984, pp. 357.

Hagberg M., Silverstein B., Wells R. et al., *Work related musculoskeletal disorders (WMSDs). A reference book for prevention*. Taylor & Francis, 1995, pp. 421.

Haines T., Chong J.P., Peripheral neurological assessment methods for workers exposed to hand-arm vibration. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 370-374.

Hamilton A., A study of spastic anemia in the hands of stonecutters. *Industrial Accidents and Hygiene Series Bulletin*, 1918, 236, 19, 169-182.

Hammarskjöld E., Harms-Ringdahl K., Ekholm J. et al., Effect of short-time vibration exposure on work movements with carpenters' hand tools. *Int. J. Indust. Erg.*, 1991, 8, 125-134.

Harada N., Esthesiometry, nail compression and other function tests used in Japan for evaluating the hand-arm vibration syndrome. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 330-333.

Harada N., Nakamoto M., Kohno H., Kondo H., Tanaka M., *Hormonal responses, hand arm vibrations*. Kanazawa, Japan Kyoci Press Co, 1990, 267-272.

Hawkins N.C., Norwood S.K., Rock J.C., *A strategy for occupational exposure assessment*. American Industrial Hygiene Association, Akron, Ohio, U.S.A., 1991.

Hilz M.J., Zimmermann P., Claus D. et al., Thermal threshold determination in alcoholic polyneuropathy: an improvement of diagnosis. *Acta Neurol. Scand.*, 1995, 91, 389-393.

Hirosawa I., Nishiyama K., Watanabe S., Temporary threshold shift of temperature sensation caused by vibration exposure. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1992, 63, 531-535.

Hirosawa I., Watanabe S., Fukuchi Y. et al., Availability of temperature sense indices for diagnosis of vibration disease. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1983, 52, 215-222.

Hoppenfeld S., Hutton R., *Examen clinique des membres et du rachis*. Masson, Paris, 1984, pp. 302.

Hosmer D., Lemeshow S., *Applied logistic regression*. Wiley Interscience, 1989, pp. 307.

ICOH, Recueil des résumés. 23^{ème} Congrès international de la Médecine du Travail, Montréal, 22-28 septembre 1990, pp. 768.

International Organization for Standardization , ISO 5349: Mechanical vibration: Guidelines for the measurement and the assessment of human exposure to hand-transmitted vibration. May 1986.

International Organization for Standardization , ISO/CD 8662/6: Hand-held portable power tools – Measurement of vibrations at the handles. Part 6: Impact drills. November 1990.

International Organization for Standardization , ISO/CD 13091, Measurement and interpretation of vibrotactile perception thresholds at the fingertips for the assessment of sensory nerve function. November 1995.

Janda D.H., Geiringer S.R., Hankin F.M. et al., Objective evaluation of grip strength. *J. Occup. Med.*, 1987, 29, 7, 569-571.

Johansson R.S., Vallbo A.B., Westling G., Thresholds of mechanosensitive afferents in the human hand as measured with von Frey hairs. *Brain Research*, 1980a, 184, 343-351.

Johansson R.S., Vallbo A.B., Spatial properties of the population of mechanoreceptive units in the glabrous skin of the human hand. *Brain Research*, 1980b, 184, 353-366.

Johansson R.S., Vallbo A.B., Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *TINS*, 1983, 27-32.

Joseph B.S., Ergonomic considerations and job design in upper extremity disorders. *State of the Art Reviews*, 1989, 4, 3, 547-557.

Juntunen J., Matikainen E., Seppäläinen A.M. et al., Peripheral neuropathy and vibration syndrome. A clinical and neurophysiological study of 103 patients. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1983, 52, 17-24.

Kakosy T., Tunnel syndromes of the upper extremities in workers using hand-operated vibrating tools. *Med. Lav.*, 1994, 85, 6, 474-480.

Kamon N., Quantitative measurement of vibratory perception threshold using a new vibrometer TM-31A. *J. Occup. Med.*, 1994, 36, 9, 989-996.

Kenshalo D.R., Somesthetic sensitivity in young and elderly humans. *J. of Gerontology*, 1986, 41, 6, 732-742.

Keyserling W.M., Stetson D.S., Silverstein B.A., Brouwer M.L., A checklist for evaluating ergonomic risk factors associated with upper extremity cumulative trauma disorders. *Ergonomics*, 1993, 36, 7, 807-831.

Kihlberg S., Attebrant M., Gemne G. et al., Acute effects of vibration from a chipping hammer and a grinder on the hand-arm system. *Occup. and Environm. Medicine*, 1995, 52, 731-797.

Kilbom A., Repetitive work of the upper extremity: Part II – The scientific basis (knowledge base) for the guide. *Int. J. Indust. Erg.*, 1994, 14, 5-86.

Koris M., Gelberman R.H., Duncan K. et al., Carpal tunnel syndrome. Evaluation of a quantitative provocative diagnostic test. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 1990, 251, 157-161.

Koskimies K., Pyykkö I., Stark J. et al., Vibration syndrome among Finnish forest workers between 1972 and 1990. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1992, 64, 251-256.

Kroemer K.H.E., Cumulative trauma disorders: their recognition and ergonomic measures to avoid them. *Applied Ergonomics*, 1989, 20, 4, 274-280.

Kumlin T., Wiikeri M., Sumari P., Biological changes in carpal and metacarpal bones and phalanges caused by chain saw vibration. *Brit. J. Industr. Med.*, 1973, 30, 71-73.

Kuorinka I., Jonsson B., Kilbom A. et al., Standardised Nordic questionnaires for the analysis of musculoskeletal symptoms. *Applied Ergonomics*, 1987, 18, 3, 233-237.

Kwang-Yuan Chang, Shien Tsong Ho, Hsin-Su Yu, Vibration induced neurophysiological and electron microscopical changes in rat peripheral nerves. *Occupational and Environmental Medicine*, 1994, 51, 130-135.

Lasfargues G., Troubles angioneurotiques d'origine professionnelle. Aspects épidémiologiques et cliniques. *Revue de Médecine du Travail*, 1992, 1, 5-10.

Lawson I.J., Nevell D.A., Review of objective tests for the hand-arm vibration syndrome. *Occupational Medicine*, 1997, 47, 1, 15-20.

Lemaire B., Evaluation du risque lié à l'exposition de vibrations manu-brachiales engendrées par des machines vibrantes portatives. Mémoire de Licence en Sécurité et Hygiène du Travail, Université catholique de Louvain, 1991, pp. 108.

Lidström I-M., Hagelthorn G., Bjerker N., Vibration perception in persons not previously exposed to local vibration and in vibration-exposed workers. In: Brammer & Taylor (eds) Vibration effects on the hand and arm in industry. Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 59-66.

Liebhuber F., Carpal tunnel syndrome: neurographical parameters in different stages of median nerve compression. Acta Neurochir., 1986, 81, 3-4, 125.

Lifshitz Y., Armstrong T.J., A design checklist for control and prediction of cumulative trauma disorder in intensive manual jobs. Proceedings of the Human Factors Society 30th Annual Meeting, Dayton, Ohio, U.S.A., 1986, 837-841.

Lindsell C.J., Griffin M.J., Standardised methods for assessing components of the hand-arm vibration syndrome. (en préparation)

Loriga G., Il lavoro con i martelli pneumatici. Boll. Ispettorato del Lavoro, 2, 35-60 (The use of pneumatic hammers. Occup. Health in Ontario, 3, 157-161. Cité par Griffin, 1990).

Lundborg G., Lie-Stenstran A. K., Sollerman C. et al., Digital vibrogram: a new diagnostic tool for sensory testing in compression neuropathy. J. Hand Surgery, 1986, 11a, 693-699.

Lundborg G., Sollerman C., Strömberg T. et al., A new principle for assessing vibrotactile sense in vibration-induced neuropathy. Scand. J. Work Environm. Health, 1987, 13, 375-379.

Lundborg G., Dahlin L.B., Danielsen N., Kanje M., Vibrations exposure and nerve fibre damage. J. Hand Surg., 1990, 15A, 346-351.

Lundström R., Response of mechanoreceptive afferent units in the glabrous skin of the human hand to vibration. Scand. J. Work Environm. Health, 1986, 12, 413-416.

Lundström R., Johansson R.S., Acute impairment of the sensitivity of skin mechanoreceptive units caused by vibration exposure of the hand. Ergonomics, 1986, 29, 5, 687-698.

Lundström R., Strömberg T., Lundborg G., Vibrotactile perception threshold measurements for the diagnosis of sensory neuropathy. Description of a reference population. Int. Arch. Occup. Environ. Health, 1992, 64, 201-207.

Luopajarvi T., Kuorinka I., Virolainen M. et al., Prevalence of tenosynovitis and other injuries of the upper extremities in repetitive work. Scand. J. Work Environm. Health, 1979, 3, 48-55.

Maeda S., Griffin M.J., Temporary threshold shifts in fingertip vibratory sensation from hand-transmitted vibration and repetitive shock. Brit. J. Industr. Med., 1993, 50, 360-367.

Maeda S., Yanekawa Y., Kanada K., et al., Vibrotactile TTS of fingertip vibratory sensation from hand-transmitted vibration having the same equal equivalent tool vibration levels according to the JIB B 4900 determination method. Industrial Health, 1996, 34, 257-266.

Malchaire J., Pathologie musculosquelettique du membre supérieur. Rapport final. SSTC, 1995, pp. 147.

Malchaire J., Gestion du risque: "Vibrations mécaniques". Cahiers de Medecine du Travail, 1995, XXXII, 3, 157-161.

Malchaire J., Physiologie du travail en ergonomie. Bruxelles, Université catholique de Louvain, 1997.

Malchaire J., Stratégie d'évaluation et de prévention/amélioration des risques liés aux vibrations mains bras. Ministère de l'Emploi et du Travail, 1998 (sous presse).

Malchaire J., Maldague B., Huberlant M. et al., Bone and joint changes in the wrists and elbows and their association with hand and arm vibration exposure. *Ann. occup. Hyg.*, 1986, 30, 4, 461-468.

Malchaire J., Cock N., Relation entre contraintes du travail, tests fonctionnels et sensoriels et le développement de problèmes musculosquelettiques des poignets: étude prospective. *Cahiers de Médecine du Travail*, 1995, XXXII, 4, 231-240.

Malchaire J., Piette A., A comprehensive strategy for the assessment of noise exposure and risk of hearing impairment. *Ann. occup. Hyg.*, 1997, 41, 4, 467-484.

Malchaire J., Indestegee B. *Troubles musculosquelettiques - analyse du risque*, Bruxelles, INRCT, 1997, pp. 122.

Malchaire J., Rodriguez Diaz L.S., Piette A., Golcalves Amaral F., de Schaetzen D., Neurological and functional effects of short-term exposure to hand-arm vibration. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1998, 71, 4,1 270-276.

Marshall A.J., Roberts C.J., Baritt D.W., Raynaud's phenomenon as side effect of beta-blockers in hypertension. *British Medical Journal*, 1976, 1, 1498-1499.

Margolis W., Kraus J.F., The prevalence of carpal tunnel syndrome symptoms in female supermarket checkers. *J. Occup. Med.*, 1987, 29, 12, 953-956.

Marras W.S., Schoenmarklin R.W., Wrist motions and CTD risk in industrial and service environments. In: Quéinnec Y. and Daniellou F. (eds) *Designing for everyone*. Proceedings of the 11th Congress of the Int. Ergonomics Association. Paris, 1991, Vol I, 36-38.

Marras W.S., Schoenmarklin R.W., Wrist motions in industry. *Ergonomics*, 1993, 36, 4, 341-351.

Martin B.J., Roll J.P., Di Renzo N., The interaction of hand vibration with oculo-manual coordination in pursuit tracking. *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 1991, 145-152.

Mathiowetz V., Grip and pinch strength measurements. In: Amundsen L.R. (ed) *Muscle strength testing. Instrumented and non-instrumented systems*. Churchill Livingstone, New York, 1990, 163-177.

McGeoch K.L., Gilmour W.H., Taylor W., Sensorineural objective tests in the assessment of hand-arm vibration syndrome. *Occupational and Environmental Medicine*, 1994, 51, 57-61.

McQuillan W., Sensory recovery after nerve repair. *Hand.*, 1970, 2, 1, 7-9.

Mirbod S.M., Yoshida H., Jamali M. et al., Assessment of hand-arm vibration exposure among traffic police motorcyclists. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1997, 70, 22-28.

Miyakita T., Miura H., Futatsuka M., Noise-induced hearing loss in relation to vibration-induced white finger in chain-saw workers. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1987, 13, 32-36.

Moore A., Wells R., Ranney D., Quantifying exposure in occupational manual task with cumulative trauma disorder potential. *Ergonomics*, 1991, 34, 12, 1433-1453.

Moore J.S., Garg A., Upper extremity disorders in a pork processing plant: relationships between job risk factors and morbidity. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1994, 55, 8, 703-715.

Moore J.S., Garg A., The strain index: a proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1995, 56, 443-458.

Murata K., Araki S., Aono H., Central and peripheral nervous system effects of hand-arm vibrating tool operation. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1990, 62, 183-188.

Murata K., Araki S., Maeda K., Autonomic and peripheral nervous system dysfunction in workers exposed to hand-arm vibration: a study of R-R interval variability and distribution of nerve conduction velocities. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1991, 63, 205-211.

Nathan P.A., Keniston R.C., Myers L.D. et al., Longitudinal study of median nerve sensory conduction in industry: relationship to age, gender, hand dominance, occupational hand use, and clinical diagnosis. *J. Hand Surgery*, 1992, 17a, 850-857.

Nilsson T., Burstrom L., Hagberg M., Risk assessment of vibration exposure and white fingers among platers. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1989, 61, 473-481.

Nilsson T., Hagberg M., Burström L. et al., Impaired nerve conduction in the carpal tunnel of platers and truck assemblers exposed to hand-arm vibration. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1994, 20, 189-199.

Nishiyama K., Toada K., Yamashita H., Watanabe S., Application of a new, self-recording, vibratory sensation meter to measure temporary threshold shift of vibratory sensation caused by local vibration exposure. *Int. Arch. Occup. Environ. Health*, 1994, 66, 97-102.

Osterman A.L., Aversa B.A., Greenstein D., Use of the nervepace electroneurometer as an effective screening tool in the diagnosis of carpal tunnel syndrome. American Society for Surgery of the Hand, 44th annual meeting. Seattle, Washington, scientific exhibit, 1989, Septembre 13-16.

Pelizzoni V., Playing dexterity detective testing for carpal tunnel syndrome. *NJ Rehab*, 1990, March, 32-34.

Pelmear P.L., Taylor W., Hand-arm vibration syndrome: clinical evaluation and prevention. *J. Occup. Med.*, 1991, 33, 11, 1144-1149.

Pelmear P.L., Taylor W., Wasserman D.E., Hand-arm vibration. A comprehensive guide for occupational health professionals. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, pp. 226.

Petersen R., Andersen M., Mikkelsen S. et al., Prognosis of vibration induced white finger: a follow-up study. *Occup. and Environm. Medicine*, 1995, 52, 110-115.

Pichené A., Quantification des facteurs de risque biomécaniques du syndrome du canal carpien. INRS, France, NS 0130, 1995, pp. 201.

Pransky G., Long R., Hammer K. et al., Screening for carpal tunnel syndrome in the workplace. *J.O.E.M.*, 1997, 39, 8, 727-733.

Pujol M., Pathologie professionnelle d'hypersollicitation. Atteinte périarticulaire du membre supérieur. Masson, Paris, 1993, pp. 168.

Punnett L., Keyserling W.M., Exposure to ergonomic stressors in the garment industry: application and critique of job-site work analysis methods. *Ergonomics*, 1987, 30, 7, 1099-1116.

Putz-Anderson V., Cumulative trauma disorders - A manual for musculoskeletal diseases of the upper limbs. Taylor & Francis, London, 1988, pp. 149.

Putz-Anderson V., Cumulative trauma disorders: an emerging occupational health problem. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, 1990, 5, 3, 138-145.

Pyykkö I., Clinical aspects of the hand-arm vibration syndrome. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1986, 12, 439-447.

Pyykkö I., Hyvärinen J., The physiological basis of the traumatic vasospastic disease: a sympathetic vasoconstrictor reflex triggered by high frequency vibration. *Work-Environment*, 1973, 10, 36-47.

Pyykkö I., Koskimies K., Starck J. et al., Risk factors in the genesis of sensorineural hearing loss in Finnish forestry workers. *Brit. J. Industr. Med.*, 1989, 46, 439-446.

Radwin R.G., Armstrong T.J., Assessment of hand vibration exposure on an assembly line. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1985, 46, 4, 211-219.

Radwin R.G., Armstrong T.J., Chaffin D.B., Power hand tool vibration effects on grip exertions. *Ergonomics*, 1987, 30, 5, 833-855.

Ranaivosoa A., Loslever P., Cnockaert J.C., Analyse des mouvements du poignet et des forces musculaires de préhension au poste de travail II. Application à des postes générateurs du syndrome du canal carpien. *Le Travail Humain*, 1992, 55, 3, 291-306.

Rasmussen G., Human body vibration. Technical review to advance techniques in acoustical, electrical and mechanical measurement. *Bruël & Kjaër*, 1, 1982.

Rempel D.M., Harrison R.J., Barnhart S., Work-related cumulative trauma disorders of the upper extremity. *Journal of the American Medical Association*, 1992, 267, 6, 838-842.

Ricci P.T., Possible interaction between vibration thresholds by sex and motor dominance in the index finger and big toe. *Perceptual and Motor Skills*, 1997, 85, 1091-1098.

Rodgers S.H., A functional job analysis technique. *Occupational Medicine: State of the Art Reviews*, 1992, 7, 4, 679-711.

Rosecrance J.C., Cook T.M., Bingham R.C., Comparison of a digital electroneurometer and standard nerve conduction studies for the measurement of median nerve sensory latency. *Journal of Occupational Rehabilitation*, 1993, 3, 4, 191-200.

Rosecrance J.C., Cook T.M., Satre D.L. et al., Vibration sensibility testing in the workplace day-to-day reliability. *J. Occup. Med.*, 1994, 36, 9, 1032-1037.

Sakakibara H., Kondo T.A., Miyao M. et al., Digital nerve conduction velocity as a sensitive indication of peripheral neuropathy in vibration syndrome. *Am. J. Ind. Med.*, 1994, 26, 359-366.

Sakakibara H., Hirata M., Hashiguchi T. et al., Digital sensory nerve conduction velocity and vibration perception threshold in peripheral neurological test for hand-arm vibration syndrome. *Am. J. Ind. Med.*, 1996, 30, 219-224.

Schady W., Sheard A., Hassell A. et al., Peripheral nerve dysfunction in scleroderma. *Quarterly Journal of Medicine*, 1991, New series 80, 292, 661-675.

Silverstein B., The use of checklists for upper limb risk assessment. *Proceedings of the 13th Triennial Congress of the International Ergonomics Association*, Tampere, Finland, 1997, 109-111.

Silverstein B.A., Fine L.J., Armstrong T.J., Hand wrist cumulative trauma disorders in industry. *Brit. J. Indust. Med.*, 1986, 43, 779-784.

Silverstein B.A., Fine L.J., Armstrong T.J., Occupational factors and carpal tunnel syndrome. *Am. J. Ind. Med.*, 1987, 11, 343-358.

Steinberg D.R., Gelberman R.H., Rydevik B. et al., The utility of portable nerve conduction testing for patients with carpal tunnel syndrome: a prospective clinical study. *J. Hand Surgery*, 1992, 17, 1, 77-81.

Stetson D.A., Keyserling W.M., Silverstein B.A. et al., Observational analysis of the hand and wrist: a pilot study. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, 1991, 6, 11, 927-937.

Stock S.R., Workplace ergonomic factors and the development of musculoskeletal disorders of the neck and upper limbs: a meta-analysis. *Am. J. Ind. Med.*, 1991, 19, 87-107.

- Stockstill J.W., Harn S.D., Strickland D., Prevalence of upper extremity neuropathy in a clinical dentist population. *J.A.D.A.*, 1993, 124, 67-72.
- Szabo R.M., Gelberman R.H., Williamson R.V. et al., Vibratory sensory testing in acute peripheral nerve compression. *J. Hand Surgery*, 1984, 9a, 1, 104-109.
- Takamatsu M., Futatsuka M., Sakurai T. et al., Risques liés aux vibrations transmises à une partie du corps. Etude de la situation au Japon. *Industrial Health*, 1982, 20, 177-190.
- Takeuchi T., Takeya M., Imanishi H., Ultrastructural changes in peripheral nerves of the fingers of three vibration-exposed persons with Raynaud's phenomenon. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1988, 14, 31-35.
- Tanaka S., McGlothlin J.D., A conceptual quantitative model for prevention of work-related carpal tunnel syndrome (CTS). *Int. J. Indust. Erg.*, 1993, 11, 181-193.
- Tanaka S., Wild D.K., Seligman P.J. et al., Prevalence and work-relatedness of self-reported carpal tunnel syndrome among U.S. workers: Analysis of the occupational health supplement data of 1988 national health interview survey. *Am. J. Ind. Med.*, 1995, 27, 451-470.
- Taylor W., Pearson J., Kell R.L. et al., Vibration syndrome in forestry commission chain saw operators. *Brit. J. Industr. Med.*, 1971, 28, 83-89.
- Thompson J.S., Phelps T.H., Repetitive strain injuries. How to deal with "the epidemic of the 1990s". *Postgraduate Medicine*, 1990, 88, 8, 143-149.
- Tyler L.E. et al., Hand-transmitted vibration: clinical effects and pathophysiology. Part 1: Report of a working party. The Royal College of Physicians of London, 1993, pp. 47.
- Vallbo A.B., Single-afferent neurons and somatic sensation in humans In: Gazzaniga M.S., *The cognitive neurosciences*. The Mit Press-Cambridge, 1995, 237-252.
- Vallbo A.B., Johansson R.S., Properties of cutaneous mechanoreceptors in the human hand related to touch sensation. *Human Neurobiology*, 1984, 3, 3-14.
- Verdugo R., Ochoa J.L., Quantitative somatosensory thermotest. *Brain*, 1992, 115, 893-913.
- Viikari-Juntura E., Neck and upper limb disorders among slaughterhouse workers. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1983, 9, 283-290.
- Virokannas H., Dose-response relation between exposure to two types of hand-arm vibration and sensorineural perception of vibration. *Occupational and Environmental Medicine*, 1995, 52, 332-336.
- Waris P., Occupational cervicobrachial syndromes - A review. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1980, 6, suppl. 3, 3-14.
- Waris P., Kuorinka I., Kurppa K., et al., Epidemiologic screening of occupational neck and upper limb disorders. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1979, 5, suppl. 3, 25-38.
- Webster B.S., Snook S.H., The cost of compensable upper extremity cumulative trauma disorders. *J. Occup. Med.*, 1994, 36, 7, 713-717.
- Wenemark M., Lundström R., Hagberg M. et al., Vibrotactile perception thresholds as determined by two different devices in a working population. *Scand. J. Work Environm. Health*, 1996, 22, 204-210.
- Werner R.A., Albers J.W., Relation between needle electromyography and nerve conduction studies in patients with carpal tunnel syndrome. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 1995, 76, 246-249.
- Werner R.A., Franzblau A., Albers J.W., Predictive value of nerve conduction studies. *Occupational and Environmental Medicine*, 1997, 54, 765-768.

White K.M., Congleton J.J., Huchingson R.D. et al., Vibrometry testing for carpal tunnel syndrome: a longitudinal study of daily variation. *Arch. Phys. Med. Rehabil.*, 1994, 75, 25-28.

Wieslander G., Norbäck D., Göthe C-J., Luhlén L., Carpal tunnel syndrome (CTS) and exposure to vibration, repetitive wrist movements, and heavy manual work: a case-referent study. *Brit. J. Indust. Med.*, 1989, 46, 43-47.

Yeudall L.T., Normative data stratified by age and sex for 12 neuropsychological tests. *J. Clin. Psychol.*, 1986, 42, 6, 918-946.

Young V.L., Seaton M.K., Feely C.A. et al., Detecting cumulative trauma disorders in workers performing repetitive tasks. *Am. J. Ind. Med.*, 1995, 27, 419-431.