Institut de Recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

PhareSST

Rapports de recherche scientifique | Rapports

1998

Analyse des risques et étude des besoins relatifs au procédé de meulage dans l'industrie lourde

Cécile Collinge
IRSST

Éric Lemay
Université de Sherbrooke

Jean-Luc Wojtowicki
Université de Sherbrooke

Chantal Tellier
IRSST, chantal.tellier@irsst.qc.ca

René Benoit
IRSST

See next page for additional authors

Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique

Citation recommandée

Collinge, C., Lemay, É., Wojtowicki, J.-L., Tellier, C., Benoît, R., Charron, F., . . . Perrault, G. (1998). *Analyse des risques et étude des besoins relatifs au procédé de meulage dans l'industrie lourde* (Rapport n° R-186). IRSST.

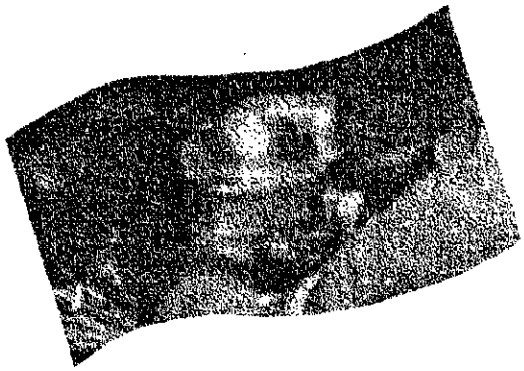
Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

Auteurs

Cécile Collinge, Éric Lemay, Jean-Luc Wojtowicki, Chantal Tellier, René Benoit, François Charron, François Gauthier, Jean Nicolas, and Guy Perrault

This rapports de recherche scientifique is available at PhareSST: https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique/764

Analyse des risques et étude des besoins relatifs au procédé de meulage dans l'industrie lourde

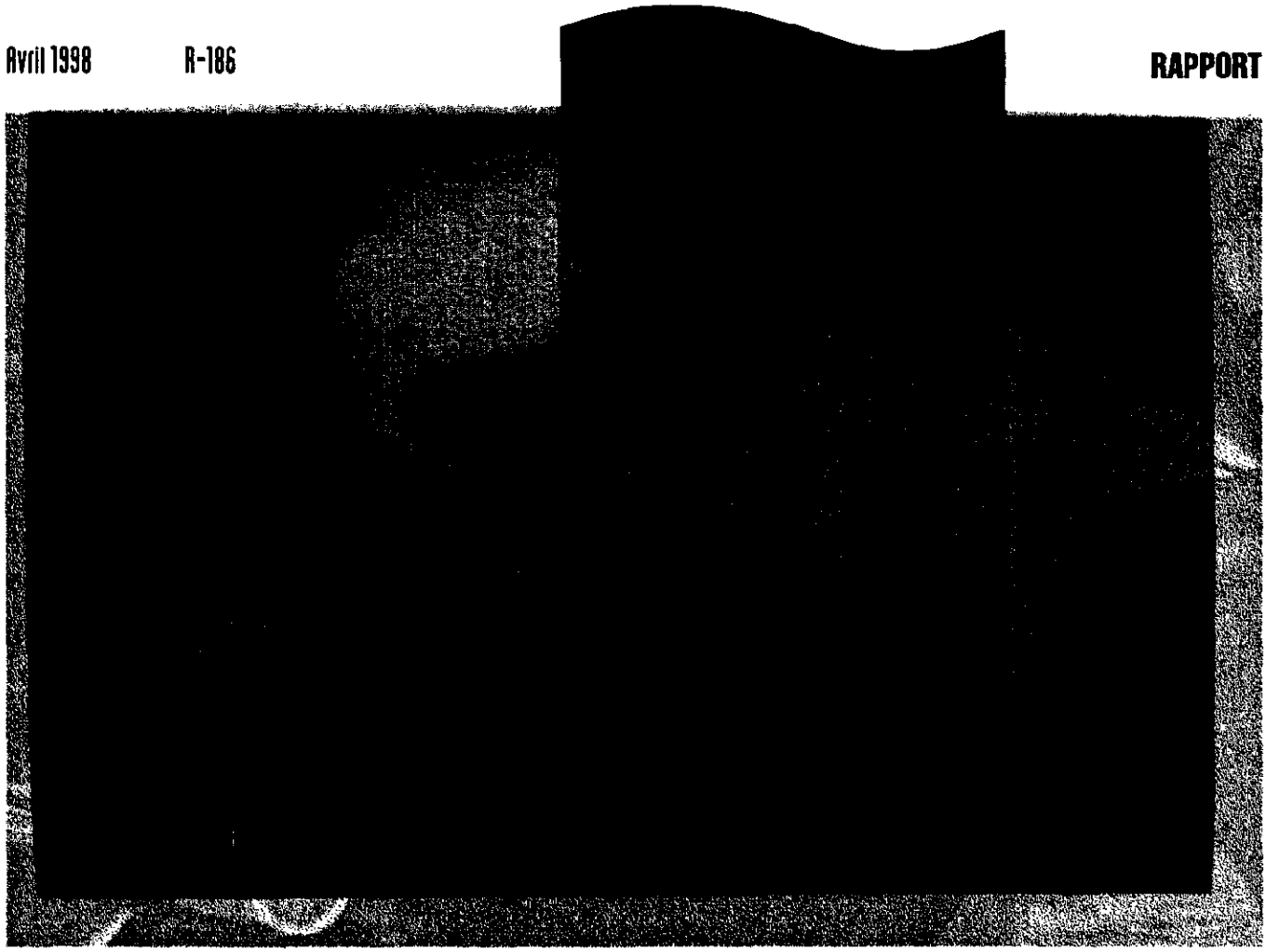


ÉTUDES ET RECHERCHES

Cécile Collinge,
Éric Lemay,
Jean-Luc Wojtowicki,
Chantal Tellier

Avril 1998 R-186

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail,* publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-l 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site intemet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec,

Analyse des risques et étude des besoins relatifs au procédé de meulage dans l'industrie lourde

ÉTUDES ET RECHERCHES

Cécile Collinge[1], Éric Lemay[2], Jean-Luc Wojtowicki[3], Chantal Tellier[4], René Benoît[4], François Charron[2], François Gauthier[2], Jean Nicolas[3] et Guy Perrault[5]

[1]Programme sécurité-ergonomie, IRSST
[2]Groupe de recherche en ingénierie simultanée, Université de Sherbrooke
[3]Groupe d'acoustique et de vibrations, Université de Sherbrooke
[4]Programme sécurité-ingénierie, IRSST
[5]Direction des opérations, IRSST

RAPPORT

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

TABLE DES MATIÈRES

Page

Remerciements vii

1.0 INTRODUCTION : ORIGINE, PROBLÉMATIQUE ET SPÉCIFICITÉS DU PROJET 1
1.1 Origine du projet 1
1.2 Problématique 1
1.3 Mise en contexte 2

2.0 RAPPEL DES OBJECTIFS 5

3.0 DÉMARCHE 7
3.1 Méthodologie générale et groupe de recherche 7
3.2 Analyse des besoins et des attentes 8
3.2.1 Analyse de la littérature et de la documentation 9
3.2.2 Analyse des rapports d'accidents 9
3.2.3 Entretiens et observations préliminaires en usine 9
3.2.4 Entretiens et observations systématiques en usine 10
3.2.5 Groupes de discussions (« focus groups ») 11
3.3 Évaluation comparative (benchmarking) 12
3.4 Échantillonnage de poussières 12
3.5 Étude détaillée des sources de bruit et vibrations 13
3.6 Identification des risques 13

4.0 RÉSULTATS 15
4.1 Caractérisation des procédés, des meules et des meuleuses 15
4.1.1 Caractérisation des procédés de meulage 15
4.1.2 Caractérisation des meules 15
4.1.3 Caractérisation des meuleuses portatives 16
4.2 Revue générale de la littérature et de la documentation 16
4.3 Bruit et vibrations 17
4.3.1 Force de coupe 17
4.3.2 Sources de bruit 18
4.3.3 Sources de vibrations 18
4.4 Poussières 19
4.5 Ergonomie 20
4.5.1 Résultats d'analyse des données d'accidents 20
4.5.2 Principaux résultats d'observations 21

TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

4.6 Synthèse des besoins 23
4.7 Synthèse des risques 24

5.0 DISCUSSIONS 29
5.1 Variété des situations de travail 29
5.2 Contexte technique, économique et stratégique 31
5.3 Ingénierie simultanée 34

6.0 RECOMMANDATIONS 37
6.1 Bruit et vibrations 37
6.1.1 Cahiers des charges vibro-acoustiques 37
6.1.2 Pistes de solutions 38
6.2 Poussières 38
6.3 Ergonomie 39

7.0 CONCLUSION 41

BIBLIOGRAPHIE 45

ANNEXES

A. Résumé de l'approche méthodologique initiale
B. Cheminement et échéancier des activités
C. Caractérisation du procédé de meulage, des meuleuses et des meules
D. Bruit et vibrations
E. Génération de poussières
F. Ergonomie
G. Synthèse de l'analyse des besoins et des attentes
H. Synthèse des risques
J. Outil d'aide
K. Problématique et état des connaissances - issus du protocole de recherche

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Page

Figure 1 : Intégration des aspects fondamentaux du projet par l'approche méthodologique 8
Tableau 1 Principales caractéristiques des entreprises visitées (observations préliminaires) 10
Tableau 2 Entreprises visitées en seconde série (observations systématiques) 11
Tableau 3 Résumé des besoins et attentes des utilisateurs 24
Tableau 4 Risques de nature mécanique 25
Tableau 5 Risques de nature électrique 27
Tableau 6 Risques engendrés par le bruit et les vibrations 27
Tableau 7 Risques engendrés par le non-respect des principes ergonomiques 28

Remerciements

Le groupe de recherche tient à remercier sincèrement :

- les membres du Comité aviseur au projet;
- toutes les usines qui ont participé au projet et les différentes personnes qui, à l'intérieur de ces usines, ont mis temps, énergie et ressources à la disposition du groupe de recherche pour collaborer concrètement au projet;
- l'Association sectorielle fabrication d'équipement de transport et de machines (ASFETM).

Le groupe de recherche remercie également le personnel du centre de documentation et du secrétariat général de la CSST, pour l'aide à l'identification des cas d'accidents graves de la banque de données d'accidents VREN ainsi que pour l'accès aux dossiers physiques. Pour les statistiques d'accidents, le groupe de recherche remercie le personnel du Programme organisation du travail de l'IRSST.

Il faut souligner qu'en cours de projet, plusieurs entreprises concernées par cette recherche ont fait l'objet de mesures plus ou moins importantes de restructuration. Le groupe de recherche tient à remercier plus particulièrement les entreprises MIL Davie, GE Hydro et Dominion Bridge, sans la participation desquelles ce projet n'aurait pu être complété.

1.0 INTRODUCTION : ORIGINE, PROBLÉMATIQUE ET SPÉCIFICITÉS DU PROJET

1.1 Origine du projet

La demande initiale de ce projet provient d'une entreprise du secteur de l'industrie lourde. Elle a été acheminée à l'IRSST par l'intermédiaire de l'Association sectorielle fabrication d'équipement de transport et de machines (ASFETM). Plusieurs des établissements de ce secteur économique utilisent des meuleuses[1] portatives et manifestaient à l'ASFETM une préoccupation par rapport à la sécurité lors du meulage.

Après rencontres avec l'ASFETM et plusieurs entreprises de ce secteur, les demandeurs ont manifesté leur intérêt à ce que ce projet considère l'ensemble des problèmes de santé-sécurité associés au procédé de meulage.

1.2 Problématique

Les problèmes liés à la santé et à la sécurité du procédé de meulage dans l'industrie lourde sont nombreux et variés. Les principaux facteurs de risques rapportés par des représentants de ce secteur lors d'une réunion préparatoire à ce projet sont les suivants :

- bruit et vibrations;
- risque d'éclatement des meules;
- poussières et projection de matériel de meulage;
- manipulation et postures;
- contraintes visuelles;
- chocs;
- position, complexité et configuration des pièces à meuler;

---

[1] Définition des termes. Dans ce texte le terme « **meule** » signifie la pièce d'abrasifs agglomérés tournant lors du meulage et opérant par enlèvement de matière, le terme « **meuleuse** » signifie la machine manuelle à meuler, alimentée par une énergie (électrique ou pneumatique) servant à faire tourner la meule, le terme « **meulage** » signifie l'action de meuler ou le procédé lui-même et le terme « **meuleur** » représente le travailleur qui effectue le procédé de meulage. Tous les meuleurs rencontrés sont des hommes et nous utiliserons donc le masculin lorsque nous parlerons de ces travailleurs dans ce texte. Toutefois, cela ne signifie pas que des femmes ne pourraient réaliser ce type de travail.

- choix des équipements à acheter ou à utiliser;
- conception des procédés et des postes de travail;
- lacunes au niveau de la formation et de l'information.

1.3 Mise en contexte

Le projet initial visait l'analyse des risques et l'étude des besoins relatifs au procédé de meulage dans le cadre d'une étude de conception de ce procédé dans l'industrie lourde en regard de la SST. Ainsi donc, à l'origine, le projet s'orientait vers l'étude des procédés actuels de meulage et leur reconception éventuelle en fonction des besoins fonctionnels et de toutes les composantes de santé et de sécurité (SST) liées à la situations de travail.

Ce type de recherche implique de multiples champs disciplinaires au niveau de l'équipe de recherche d'une part, mais aussi au niveau des entreprises participantes. La première usine à l'origine de cette demande supportait explicitement cette approche multidisciplinaire. D'autres usines ont par la suite manifesté le désir de participer à ce projet. Dans ce contexte, plusieurs des principes de l'ingénierie simultanée s'avéraient intéressants à exploiter, dans un premier temps, dans le cadre d'une étude évaluative et le cas échéant, dans un deuxième temps, dans le cadre d'une démarche de reconception plus sécuritaire du procédé de meulage.

La situation générale des usines s'est cependant considérablement modifiée entre le moment de l'intention de projet et la réalisation effective des travaux sur le terrain (part importante du projet). En effet, plusieurs des entreprises intéressées ont éprouvé des difficultés sérieuses : une a fermé, une autre a vécu un long conflit de travail et dans toutes les autres, la production a subi d'importantes modifications dont, entre autres, des baisses de production appréciables affectant directement la quantité et l'importance relative du meulage dans ces usines. Signalons aussi qu'outre le désistement de l'usine à l'origine du projet (elle n'a pas participé à sa réalisation) ou l'ajout de nouvelles usines, la plupart des usines participantes ont fait l'objet de réorganisation interne ou ont été l'objet d'acquisition extérieure. Ces nombreux changements ont inévitablement perturbé le déroulement des activités terrain du projet.

Toutes les conditions favorables à l'application des principes de l'ingénierie simultanée n'ont pu être réunies dans le cadre de ce projet. Sur le plan organisationnel, soulignons que les membres de

l'équipe relèvent de plusieurs directions différentes et même d'organismes différents dans certains cas. L'éloignement géographique des membres de l'équipe de même que celui des différentes usines, la conciliation des agendas avec un grand nombre de personnes en usine et au sein de l'équipe, et les multiples contraintes de production sont autant de facteurs qui limitent la portée de l'application de l'ingénierie simultanée.

Dans ce contexte général, l'étude réalisée constitue donc principalement un constat de la situation du meulage strictement valable dans le secteur de l'industrie lourde. Ce projet a été réalisé en réponse à une demande provenant exclusivement d'usines de ce type. Même s'il n'est pas exclu que certains constats puissent s'appliquer à d'autres secteurs ou à la PME en général, seule une étude valable dans ces autres secteurs ou dans la PME permettra d'identifier scientifiquement ces autres applications éventuelles.

Finalement, il est à noter que les meuleuses portatives considérées dans cette étude sont pneumatiques et que les surfaces meulées sont toutes en acier.

2.0 RAPPEL DES OBJECTIFS

En tenant compte de l'historique présenté ci-haut, le double objectif général de ce projet est devenu le suivant. Il s'agissait d'abord d'établir une base de connaissances par l'analyse de la situation existante en termes de risques à la santé et à la sécurité du travail lors de l'utilisation des meuleuses. En second lieu, il s'agissait de déterminer l'ensemble des besoins des différents utilisateurs et l'ensemble des contraintes du procédé, pour en arriver à proposer des priorités de recherche concernant les meules et les meuleuses ainsi qu'une avenue de solution.

De plus et pour ce faire, les objectifs spécifiques suivants ont donc été poursuivis :

- identifier et caractériser différents types de meules, de meuleuses et de procédés de meulage, utilisés dans les usines participant au projet, ceci pour saisir l'ensemble des aspects concernant la santé et la sécurité relatifs aux procédés, aux meuleuses et aux meules;
- identifier et caractériser les sources de bruit et vibrations;
- réaliser une étude des différentes pistes de solutions de réduction du bruit et des vibrations en vue de l'élaboration d'un cahier des charges fonctionnel;
- déterminer la concentration de poussières en situations réelles de travail à des postes de travail typiques;
- connaître et comprendre les activités réelles de travail des meuleurs ainsi que leurs déterminants;
- identifier les besoins fonctionnels et de sécurité des utilisateurs (travailleurs, contremaîtres, ingénieurs, etc.);
- déterminer les facteurs de risques et les causes d'accidents;
- identifier les critères d'acquisition des meuleuses et des meules par les entreprises, ainsi que les critères de choix des ensembles meuleuse-meule par les meuleurs;
- élaborer, à la lumière des informations recueillies, certaines recommandations sur les actions susceptibles d'améliorer la sécurité et les conditions de travail sur les meuleuses portatives.

Il est à noter que ce rapport scientifique fait un état de la situation étudiée. Il ne s'agit pas d'un recueil de solutions destiné aux entreprises du secteur de l'industrie lourde.

3.0 DÉMARCHE

3.1 Méthodologie générale et groupe de recherche

Avant même la première phase de ce projet, la littérature[2] et les gens du milieu identifiaient plusieurs facteurs de risques associés au procédé de meulage, tels que des problèmes de bruit et de vibrations, des poussières dans l'environnement de travail ainsi que des problèmes reliés à l'ergonomie et la sécurité en général. Ces facteurs sont reliés à des domaines techniques variés et c'est pourquoi l'IRSST a recruté et regroupé plusieurs spécialistes ayant différents champs d'expertise pour former le groupe de recherche. Ces spécialistes provenaient des institutions et équipes suivantes :

- le Groupe de recherche en ingénierie simultanée (GRIS) de l'Université de Sherbrooke, pour la méthodologie générale et la sécurité;
- le Groupe en acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS), pour le bruit et les vibrations;
- le Programme hygiène et toxicologie de l'IRSST, pour les poussières;
- les Programmes sécurité-ergonomie et sécurité-ingénierie pour l'ergonomie, la sécurité et la gestion générale du projet.

Outre les objectifs fondamentaux visant principalement à établir une base de connaissances concernant les meules, les machines à meuler portatives et le procédé de meulage lui-même, ce projet de recherche devait également permettre d'évaluer certains aspects de l'approche méthodologique qui comportait une certaine originalité. En fait, il s'agissait d'utiliser une approche globale en équipe multidisciplinaire, basée sur l'approche de l'ingénierie simultanée, dans le but de considérer l'ensemble des facteurs de risques identifiés et des besoins fonctionnels de façon simultanée dans un même projet.

Ainsi, la prise en charge des aspects méthodologiques de l'étude du procédé de meulage tenait compte des aspects de la sécurité, du bruit et des vibrations, de l'ergonomie et des poussières, mais aussi des autres besoins de type fonctionnel des utilisateurs. Chacun des groupes impliqués a abordé les problèmes selon les méthodes d'analyse traditionnelles propres à leurs disciplines. La tâche du

[2] Pour plus de détails sur les facteurs de risques associés au procédé de meulage et identifiés dans la littérature, se référer à l'annexe K.

GRIS consistait à analyser et élaborer la synthèse des besoins et des risques selon les méthodes propres à l'ingénierie simultanée. Le processus de réalisation de produits (PRP) ainsi que les principaux outils de l'ingénierie simultanée devaient être appliqués à cette fin, dans le but de bien intégrer tous les aspects schématisés ci-dessous et de s'assurer que les pistes de solutions proposées aux différents facteurs de risques identifiés respectent également les besoins fonctionnels des utilisateurs.

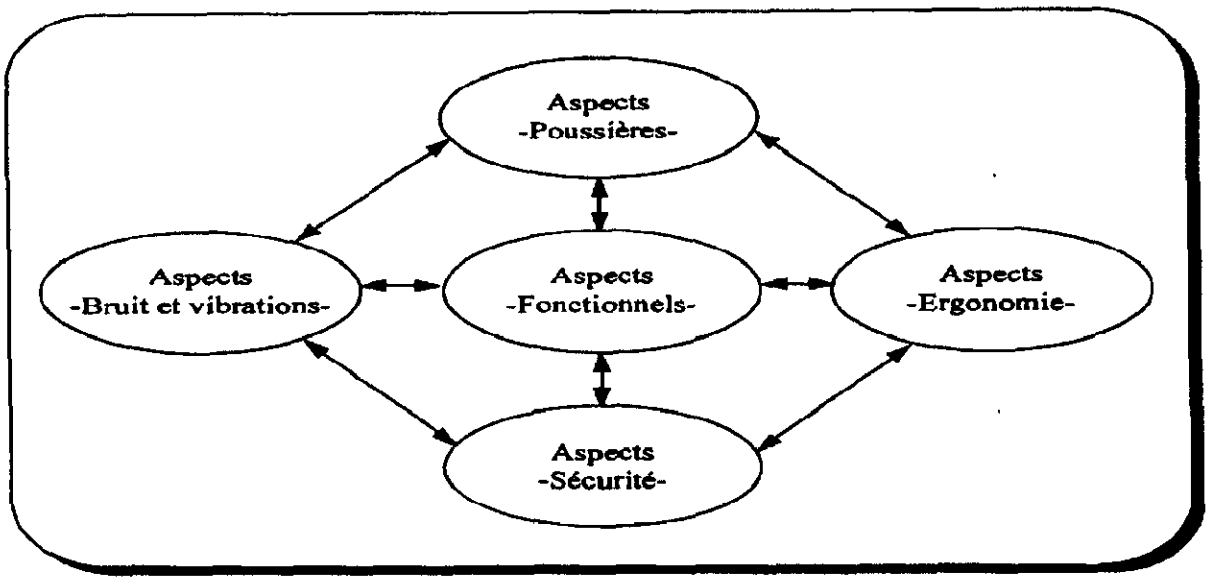


Figure 1 : Intégration des aspects fondamentaux du projet par l'approche méthodologique

L'annexe A présente un résumé de l'approche méthodologique initiale et l'annexe B présente, pour sa part, le cheminement sous la forme de l'échéancier initial du projet.

3.2 Analyse des besoins et des attentes

La satisfaction du client est l'élément le plus important de la philosophie de l'ingénierie simultanée. Tout le processus est conditionné par la nécessité de bien identifier et de satisfaire les besoins de SST et fonctionnels des multiples clients-utilisateurs. À cette fin, voici les activités qui ont été réalisées.

3.2.1 Analyse de la littérature et de la documentation

L'analyse de la littérature a été effectuée préalablement pour la rédaction du protocole puis mise à jour par la suite lors de la réalisation du projet. Cette analyse avait quatre objectifs principaux :

- déterminer les principaux risques répertoriés, inhérents à l'utilisation des meuleuses;
- identifier les principaux besoins des utilisateurs, compte tenu des conditions d'opération et de la technologie disponible;
- analyser les technologies et les solutions disponibles ou en voie de l'être, utilisées pour maîtriser ces risques;
- donner un aperçu des tendances actuelles dans la conception des meuleuses et la fabrication des meules.

3.2.2 Analyse des rapports d'accidents

Une étude des rapports d'accidents a été réalisée afin de mieux connaître les principaux risques reliés au procédé de meulage.

Premièrement, nous avons fait une analyse des accidents graves et mortels reliés au procédé de meulage s'étant produit durant 20 ans, soit de 1975 à 1995. Ces accidents ont été extraits de la base de données VREN de la CSST qui compile les accidents graves ou mortels enquêtés par les inspecteurs de la CSST.

Deuxièmement, nous avons également recueilli les descriptions d'accidents survenus aux meuleurs des entreprises participantes durant quatre années, soit de 1992 à 1995. Ceci avait pour but de tracer un portrait général des types d'accidents se produisant lors du procédé de meulage ainsi que des autres facteurs caractérisant ces accidents (dont l'activité au moment de l'accident et la blessure).

3.2.3 Entretiens et observations préliminaires en usine

Dans le cadre de l'étude évaluative, plusieurs visites sur le terrain (Tableau 1) ont été effectuées par les membres du groupe de recherche. Tout d'abord, des visites préliminaires, réalisées dans cinq usines par l'ensemble du groupe de recherche, avaient les objectifs suivants :

- présenter le projet aux différents intervenants des usines participantes;
- recueillir des informations sur l'usine, les postes de travail, les procédés, les outils utilisés, leur entretien, les procédures d'achat ainsi que sur les accidents et la prévention;
- se familiariser avec l'activité de travail et amasser de l'information dans le but de préparer les grilles d'observation utilisées lors des visites subséquentes.

Tableau 1 Principales caractéristiques des entreprises visitées (observations préliminaires)

Date	Région	Nom de l'entreprise	Types de produits
94-11-01	Lévis	MIL Davie	Construction navale
94-11-15	Sorel	GEC Alsthom	Turbines hydroélectriques
94-12-08	Sherbrooke	Ingersoll Rand	Équipements de pâtes et papiers
95-01-25	Lachine	GE Hydro	Turbines hydroélectriques
96-02-12	Lachine	Dominion Bridge	Structures de ponts

Note : L'usine Dominion Bridge s'est ajoutée au groupe en cours de projet.

3.2.4 Entretiens et observations systématiques en usine

Ces visites préliminaires ont été suivies d'une seconde série, ayant les buts suivants :

- connaître et comprendre les opérations et les activités associées au meulage ainsi que la terminologie et le langage du milieu;
- faire l'analyse ergonomique des différentes situations de travail en fonction des conditions particulières de chaque situation de travail (procédés, critères de qualité attendus, autres tâches réalisées, formation reçue, etc.);
- analyser en particulier, postures, manipulations et efforts liés au meulage;
- connaître les équipements de protection individuelle (EPI) recommandés, fournis, obligatoires ou non, leur taux d'utilisation et les raisons qui motivent une utilisation partielle;
- recueillir différents besoins, soit les besoins fonctionnels, ceux liés à l'ergonomie et ceux liés à la sécurité.

Cette seconde série de visites, spécifique à certaines disciplines, s'est faite en fonction de la disponibilité des usines (Tableau 2). En effet, il faut souligner que plusieurs entreprises concernées par le projet ont fait l'objet de mesures plus ou moins importantes de restructuration et n'étaient plus disponibles pour le projet. Lors de cette seconde série de visites, des observations ont été réalisées à l'aide de grilles d'analyse ergonomique construites spécifiquement pour le projet. L'enregistrement de vidéos a permis d'analyser les postures ainsi que les méthodes de travail et de qualifier les efforts. Des entretiens ont eu lieu avec des meuleurs, des contremaîtres, des responsables SST et des représentants syndicaux. À MIL Davie, les ergonomes du groupe de recherche ont assisté à une formation sur le meulage, la sécurité lors du meulage et la qualité du meulage.

Tableau 2 Entreprises visitées en seconde série (observations systématiques)

Date	Région	Nom de l'entreprise	Types de produits
96-03-20 et 96-03-21	Lévis	MIL Davie	Construction navale
96-03-27	Lachine	GE Hydro	Turbines hydroélectriques
96-03-18, 96-03-28 et 96-04-10	Lachine	Dominion Bridge	Structures de ponts

3.2.5 Groupes de discussions («focus groups »)

Dans le but de valider et de compléter les informations jusque-là recueillies par le biais de la revue de la littérature, des entretiens et des observations lors des visites, des groupes de discussions (communément appelés « focus groups ») ont été organisés. Cette approche est souvent utilisée en combinaison avec d'autres outils de recherche des besoins afin, entre autres, de valider les informations déjà obtenues.

Plus spécifiquement pour ce projet, trois groupes de discussions ont été formés par des intervenants provenant des trois usines qui ont accepté de participer à cette démarche. Le premier groupe était formé de meuleurs d'expérience, le deuxième de gens responsables de l'entretien des meuleuses et le troisième de contremaîtres et de responsables de la SST. Dans chacun de ces groupes, animé par un membre du groupe de recherche, la méthodologie utilisée était basée sur la recherche des problèmes, des besoins et des solutions. Voici les principaux thèmes de discussions, dont l'importance relative variait selon la composition de chaque groupe :

- caractéristiques des meuleuses et des meules;
- environnement de travail et ingénierie des procédés;
- activités de travail, efforts, postures et autres caractéristiques;
- organisation du travail;
- entretiens et sources d'énergie;
- processus d'achat des meuleuses, des meules et des accessoires;
- accidents, incidents, « passer proche »;
- formation et pratiques sécuritaires;
- accessoires, EPI;
- nouveautés à tester et améliorations.

3.3 Évaluation comparative (benchmarking)

Afin d'évaluer et de comparer entre elles les principales caractéristiques des meules et meuleuses existantes, des activités d'études comparatives (*benchmarking*) ont été réalisées. Deux méthodes de comparaisons ont été utilisées : les essais comparatifs et les sondages comparatifs. Les essais comparatifs consistaient à mesurer certaines caractéristiques (généralement des spécifications fonctionnelles) sur plusieurs meuleuses, plus spécifiquement les niveaux de bruit émis et les niveaux de transmission de vibrations en opération. Les essais comparatifs ont également permis d'évaluer, à partir d'enregistrements vidéo, certaines caractéristiques ayant trait à l'ergonomie, telles que la posture, l'effort et la méthode de travail. Les sondages comparatifs, quant à eux, consistaient à recueillir la perception des utilisateurs quant au niveau de satisfaction d'un besoin qu'offre une machine par rapport à d'autres. Plus d'une trentaine de caractéristiques ont été comparées par les opérateurs participant aux sondages comparatifs. Six modèles de meuleuses ont été comparés et quatre opérateurs ont participé à ces études.

3.4 Échantillonnage de poussières

Trois usines ont été visitées : MIL Davie, GE Hydro et Ingersoll-Rand. Du point de vue de l'hygiène industrielle, ces visites visaient à recueillir des renseignements sur les caractéristiques réelles de la tâche du meuleur, qui peuvent avoir une incidence sur la génération de poussière aéroportée. Une première série d'observations a porté sur la nature de la meule, la nature de la surface à meuler et la

contiguïté des meuleurs avec les soudeurs. Ensuite, un échantillonnage et l'étude de rapports disponibles dans les usines mêmes ont fourni des informations sur la concentration et la nature des poussières aéroportées.

3.5 Étude détaillée des sources de bruit et vibrations

La démarche vibro-acoustique a commencé par une étude mécanique et cinématique des meules et meuleuses dans le but d'identifier et de séparer les sources potentielles de vibrations et de bruit pour le procédé de meulage. Les sources prédominantes ont été déterminées expérimentalement en procédant par élimination dans le but de les hiérarchiser. Puis, une étude de sensibilité a été effectuée pour quantifier l'effet d'un (ou de plusieurs) paramètre caractéristique de chacune des sources sur les vibrations et le bruit du procédé (par exemple : niveau de vibration en fonction de l'équilibrage des meules). Cette étude de sensibilité a mené à l'élaboration d'un cahier des charges vibro-acoustiques. Enfin, certaines pistes de solutions pour la réduction à la source des vibrations ont été explorées avec succès dans le but d'aider à la conception future d'une nouvelle machine sécuritaire.

3.6 Identification des risques

Afin d'identifier tous les risques[3] inhérents au procédé de meulage et leurs causes, un des objectifs principaux de la présente étude, une phase d'analyse des risques a été réalisée. Cette analyse s'est amorcée dans le cadre des visites sur le terrain et des groupes de discussions. Les risques identifiés ont par la suite été classifiés selon la description des risques proposée dans la norme européenne EN 292-1 « *Sécurité des machines - Principes fondamentaux, Principes généraux de conception* » [1].

---

[3] Le terme risque est souvent utilisé pour deux significations différentes, ce qui est confondant. Voici les deux définitions données dans la norme européenne EN 292-1 [1].

- Première définition : « Risque : Combinaison de la probabilité et de la gravité d'une lésion ou d'une atteinte à la santé pouvant survenir dans une situation dangereuse ».
- Seconde définition : « Risque/phénomène dangereux : Cause capable de provoquer une lésion ou une atteinte à la santé. NOTE : Employé dans cette acceptation (phénomène dangereux), le mot « risque » est généralement accompagné d'autres mots précisant son origine ou la nature de la lésion ou de l'atteinte à la santé redoutée : risque de choc électrique, risque d'écrasement, risque de cisaillement, risque d'intoxication etc. ».

Dans le second cas, le mot « risque » pourrait être avantageusement remplacé par « danger ou phénomène dangereux ». Dans ce rapport sur le meulage, les dangers identifiés ayant été classifiés selon la description de la norme EN 292-1, le terme « risque » est employé dans le sens de la norme, même si parfois l'emploi du terme « danger » serait plus judicieux.

4.0 RÉSULTATS

4.1 Caractérisation des procédés, des meules et des meuleuses

4.1.1 Caractérisation des procédés de meulage

Le meulage consiste à enlever des particules d'une pièce, par abrasion, à l'aide d'une meule. Cet enlèvement de matière peut avoir différents objectifs; on parlera alors de différents procédés de meulage.

Parmi ceux-ci, mentionnons le tronçonnage (ou sciage), l'ébarbage (débarrasser une surface des aspérités ou des bavures), le rainurage (faire une cannelure ou une entaille), le surfaçage (polir une surface), etc. Parmi tous ces procédés répertoriés dans la littérature, les plus fréquemment rencontrés dans la pratique sont sans aucun doute l'ébarbage et le surfaçage. En fonction du type d'entreprise et des produits fabriqués, les pièces à meuler peuvent être constituées de différents matériaux (acier, béton, pierre, fibre-ciment, etc.). Dans le cadre de ce projet, les pièces meulées étaient toutes en acier.

4.1.2 Caractérisation des meules

Une meule est un outil de coupe tournant et travaillant par abrasion. Elle est composée de milliers de particules abrasives (les grains) retenues ou agglomérées fortement entre elles par un liant. Le choix d'une meule dépendra du type d'outil utilisé et du genre d'opération ou de tâche à accomplir. Les différentes catégories de meules peuvent être classées en fonction des caractéristiques suivantes :

- leur constitution, soit la nature et la grosseur des grains abrasifs, la dureté de la meule ou grade, la structure ou la répartition des grains, la nature de l'agglomérat;
- leur forme plate, conique, à boisseau, à moyeu déporté, etc.;
- leurs dimensions.

Les meules sont des outils relativement fragiles, craignant les chocs. La moindre petite fissure ou imperfection est susceptible de provoquer l'éclatement de la meule, pouvant entraîner ainsi des accidents graves. Le stockage des meules, le montage des meules sur les meuleuses et l'opération de l'ensemble requièrent donc des attentions particulières pour assurer le maximum de sécurité.

4.1.3 Caractérisation des meuleuses portatives

Une meuleuse portative est un outil tournant à haute vitesse (~6000 à 30000 RPM) sur lequel vient se fixer la meule. La meuleuse est constituée d'un moteur, d'un système de transmission et d'un arbre de sortie. Elle est généralement munie de deux poignées et d'une garde. Bien que dans l'industrie on rencontre parfois des meuleuses électriques, seules les meuleuses pneumatiques, beaucoup plus fréquentes, ont fait l'objet d'une étude approfondie dans ce projet.

L'information détaillée sur la caractérisation des procédés, des meules et des meuleuses se retrouve à l'Annexe C.

4.2 Revue générale de la littérature et de la documentation

Les résultats de la revue de littérature se retrouvent dans le protocole de recherche soumis à l'IRSST préalablement à la réalisation de ce projet. Les sections du protocole comprenant la revue de littérature ont été regroupées à l'annexe K.

On pourrait croire qu'il existe une littérature abondante sur la sécurité du procédé de meulage. Mais en fait, le groupe de recherche n'a trouvé qu'une seule étude descriptive ou analytique sur les accidents impliquant des meuleuses portatives [2]. Il existe toutefois une abondante littérature descriptive sur la nature des risques (risques d'éclatement de meule, risques de projection, risques de contact avec la meule en mouvement, etc.). De plus, une littérature encore plus abondante, prescriptible cette fois, traite des bonnes méthodes d'entreposage, de manipulation et d'installation des meules, du bon entretien et de la bonne utilisation des meuleuses, recommandant, entre autres, des vitesses de rotation maximales sécuritaires et des gardes protecteurs. Plusieurs de ces documents traitent aussi des équipements de protection individuelle (EPI) que doit porter le meuleur. Aucun des documents répertoriés ne traite spécifiquement des besoins des clients-utilisateurs.

Plusieurs pays ont émis des normes concernant les meules et les meuleuses (portatives ou fixes). Les normes françaises sont particulièrement nombreuses. Il existe aussi quelques normes ANSI aux États-Unis et quelques normes internationales ISO concernant les meules et/ou les meuleuses.

Finalement, rarissimes sont les documents traitant d'amélioration de la sécurité et dont les solutions semblent concrètes et applicables, à l'exception de certains catalogues de produits directement offerts par quelques compagnies désireuses d'offrir des produits plus fonctionnels et sécuritaires.

La recherche bibliographique sur les brevets, de 1991 à 1996, a fait ressortir plus de 200 brevets concernant les meules et /ou les meuleuses, et traitant de SST. De ces 200 titres, seulement une trentaine semblaient pertinents et ont été commandés. Aucun des brevets répertoriés ne traitent de reconception de la meuleuse en intégrant au procédé, des composantes de sécurité au même titre que les autres caractéristiques de la machine.

Différentes annexes contiennent les analyses bibliographiques qui les concernent particulièrement. Il est à noter que lors de la mise à jour de la bibliographie, les seuls titres nouveaux et pertinents qui sont ressortis traitent tous des vibrations liées aux meuleuses [3,4,5,6,7].

Les informations issues de ces analyses bibliographiques visaient principalement à compléter et appuyer les informations obtenues lors des visites sur le terrain. En réalité, la revue de la littérature concernant la sécurité du procédé de meulage confirme certains des risques relevés sur le terrain (i.e. : risque d'éclatement, risque de projection, etc.). Par contre, elle n'apporte aucune information complémentaire sur les besoins des clients-utilisateurs. Elle confirme également qu'il n'y a pas eu de changement significatif dans le domaine des procédés et des meuleuses durant les 15 dernières années.

4.3 Bruit et vibrations

Le rapport complet sur l'aspect bruit et vibrations comprenant, entre autres, la méthodologie et le détail des résultats, se retrouve à l'annexe D. Cette section-ci présente un résumé des principaux résultats.

4.3.1 Force de coupe

La force de coupe (ou de meulage) a été identifiée comme la source d'excitation principale. Contrairement aux études réalisées par le passé, il a été montré pour la première fois que la force

« dynamique » de coupe ne provient pas des grains ou du liant de la meule, mais de son voilage de fabrication et de montage.

4.3.2 Sources de bruit

Les meules : seules les meules plates sont des sources principales de bruit. Toutes les autres meules (à boisseau, droite, etc.) ne posent pas de problème de bruit. Les meules plates génèrent du bruit par couplage entre leurs vibrations et le milieu (l'air). Les moyens de réduction du bruit passent par la réduction des vibrations, dans le cas de disque peu épais, la meilleure solution consiste à augmenter l'amortissement interne de la structure.

Le moteur de la meuleuse : la quasi-totalité des meuleuses à air comprimé sont équipées de moteur à piston rotatif à palettes. Cette technologie est intrinsèquement bruyante puisqu'elle est basée sur l'ouverture subite de chambres de décompression. La solution consiste à utiliser des technologies de motorisation basées sur un meilleur principe, acoustiquement parlant. Les turbines telles qu'utilisées sur les meuleuses « Turbo-Grinder » d'Atlas Copco ou sur les meuleuses « Air Turbine » sont une solution de remplacement très prometteuse.

Rayonnement de la pièce meulée : c'est la source de bruit la plus délicate puisqu'elle peut être largement prédominante comme totalement négligeable, dépendamment de la situation. Comme il est impossible d'avoir de contrôle sur la pièce, la réduction du bruit de cette source passe par le contrôle de l'excitation, soit de la force de meulage.

4.3.3 Sources de vibrations

Balourd des meules : quel que soit le type de meule, c'est leur mauvais équilibrage qui constitue la source principale de vibration. Toutes les meules ont un balourd excessif, ceci est dû à la procédure de fabrication des meules par moulage qui ne permet pas un contrôle très serré des tolérances. Notons que le balourd fait aussi partie des sources possibles d'éclatement des meules.

Excentration du trou de montage : le trou de montage est suffisamment large pour permettre à la meule de se placer incorrectement sur l'arbre de la meuleuse créant ainsi un balourd dit de montage. Pour réduire cette source de vibration, il faut contrôler la tolérance du trou de centrage des meules en position et en diamètre.

4.4 Poussières

Les problèmes pulmonaires des meuleurs peuvent être reliés à la composition, la granulométrie et la concentration des poussières provenant de la meule elle-même, de la surface métallique à meuler ou d'autres procédés dans le voisinage du meuleur.

Les publications scientifiques sur la toxicité des poussières de meulage sont centrées sur l'utilisation de meules de métaux durs pour polir les surfaces d'acier. L'inhalation de poussières de métaux durs peut induire des pathologies qui sont bien documentées dans la littérature scientifique. Il s'agit surtout d'asthme, de fibrose pulmonaire et possiblement de cardiomyopathie. La surface d'acier peut ajouter aux produits dont la meule est constituée des expositions au fer, au nickel et au chrome. Selon le procédé, l'air ambiant peut contenir de la silice cristalline provenant de meules ou incluse dans l'acier.

À toutes fins pratiques, les meuleurs des trois usines visitées utilisaient très souvent des meules composées de corindon (oxyde d'aluminium), de carbure de silicium avec des petites quantités de zircon et de céramique. Aucune des usines n'utilisait de meules en métaux durs (cobalt - carbure de tungstène). En très grande majorité, le meulage se faisait sur de l'acier inoxydable avec moins de 5 % du temps sur acier doux ou sur du matériel de coulée. La caractéristique prépondérante de la tâche du meuleur est la présence constante d'opérations de soudage dans son environnement immédiat. Dans certaines usines, les meuleurs font aussi du soudage. Mais, de toute façon, le meulage et le soudage se font toujours plus ou moins simultanément. Il s'ensuit la possibilité de l'exposition du meuleur à un mélange de poussières de meulage et de fumée de soudage. Dans au moins une usine, le programme de santé identifie que l'exposition à la fumée de soudage est un danger qui nécessite une surveillance médicale et environnementale.

Selon les données recueillies dans trois des usines, la concentration de poussières totales durant les opérations régulières de meulage se situe entre 1 et 3 mg/m³ [4]. Cette exposition est un mélange de poussières de meulage et de fumée de soudage. En l'absence de cobalt, de silice cristalline, de fibre

[4] Pour les meules composées principalement de corindon et de carbure de silicium non-fibreux, ces concentrations doivent être interprétées en regard de la valeur d'exposition admissible de 10 mg/m³. Si la fumée de soudage devient le contaminant prépondérant, il faut alors comparer les concentrations de poussières à la valeur d'exposition admissible de 5 mg/m³.

de carbure de silicium et de Cr ou Ni dans la poussière, les fumées de soudage représentent le risque prioritaire du point de vue de prévention des maladies pulmonaires.

Le détail de ces résultats sur la génération de poussières est rapporté à l'annexe E.

4.5 Ergonomie

4.5.1 Résultats d'analyse des données d'accidents

De la base de données d'accidents graves et mortels de la CSST, la base VREN, interrogée sur 20 ans, soit de 1975 à 1995, sont ressortis huit accidents graves et mortels concernant les meules et meuleuses. Toutefois, une mise en garde s'impose en ce qui a trait à cette banque de données d'accidents. En effet, il est important de noter que la structure même de la base VREN permet d'identifier les accidents liés au meulage uniquement dans deux cas. Premièrement, les accidents qui ressortent sont ceux où l'accidenté porte officiellement le titre de meuleur, ce qui n'est pas le cas pour la très grande majorité des ouvriers qui font du meulage. Deuxièmement, ressortent les accidents où la meule ou la meuleuse est directement l'agent causal de la blessure. Si, par exemple, un journalier subit des fractures multiples en tombant de la structure où il est juché pour meuler, cet accident n'apparaîtra pas dans VREN. Ainsi, il est très probable qu'il existe d'autres accidents graves ou mortels associés au meulage qui n'ont pas émergé de cette base de données sur les accidents.

Sur les huit accidents graves ou mortels de la base VREN, six concernent l'éclatement de la meule, dans lesquels cas un ou deux travailleurs, le meuleur ou un voisin, a été atteint par les débris de la meule. Dans le septième accident, une particule du métal en train d'être meulé fut projetée dans un contenant de solvant causant un incendie.

Pour ce qui est des autres données d'accidents recueillies, en provenance des usines, les types d'accidents varient sensiblement d'une usine à l'autre. Dans l'ensemble, les accidents se divisent à peu près ainsi : 55 % concernent des particules qui se logent dans les yeux, 15 % sont des troubles musculo-squelettiques (problèmes liés aux vibrations, « tendinites » aux membres supérieurs, maux de dos, etc) et 30% sont de types variés (chute, frappé sur, frappé par, coupure, etc.).

L'annexe F présente de façon plus détaillée les résultats de l'analyse des accidents.

4.5.2 Principaux résultats d'observations

Les résultats présentés ici sont issus des observations et entretiens en usine, en cours normal d'opération de meulage, ainsi que lors de l'évaluation comparative pendant laquelle les chercheurs ont demandé à des meuleurs de s'astreindre à des tâches définies d'avance. Ces résultats découlent de l'analyse ergonomique du travail. Ils comprennent également divers éléments de sécurité liés à l'activité de travail. Les détails de ces résultats se retrouvent à l'annexe F.

Les postures adoptées et les efforts exercés sont parmi les résultats les plus importants. Dans l'ensemble, les résultats d'observation permettent d'affirmer que le meulage est une tâche exigeante physiquement, qui peut même devenir dans certaines situations particulièrement pénible. Les efforts et les postures, ainsi que leur intensité et leur pénibilité dépendent des conditions, souvent intrinsèques, du travail. Le travail en espace restreint ou en espace clos, le meulage d'un « plafond », le travail dehors, aux intempéries, sont parmi les conditions qui influencent les postures, les efforts et la difficulté générale de ce travail. La charge physique du meulage est évidemment aussi liée à l'outil lui-même, entre autres, au poids de l'ensemble meuleuse-meule.

La conception de la meuleuse influence également la situation de travail du meuleur. Deux modifications à la meuleuse sont fréquentes pour la majorité des types d'outils et d'entreprises : la modification ou l'enlèvement de la garde et d'une poignée. Malgré ses manifestations différentes et les problèmes de sécurité différents qu'elles peuvent engendrer, il s'agit d'un problème identique par ses causes : l'impossibilité de « bien travailler » ou de travailler tout court sans ses modifications. Les observations et les entretiens ont montré que le manque d'espace oblige parfois le travailleur à enlever la garde ou la poignée pour atteindre la surface à meuler. L'impossibilité de voir le travail en cours de réalisation incite de nombreux travailleurs à enlever la garde au mépris de leur sécurité.

Il est intéressant de noter que lors du Benchmarking, pour l'exercice de meulage « au plafond », un seul des quatre meuleurs d'expérience a utilisé et seulement de manière sporadique, la deuxième poignée de la meuleuse. Dans la presque totalité des cas, les meuleurs ont guidé la meuleuse avec la main gauche sur la poignée à laquelle est attaché le boyau d'air comprimé, et exercé l'effort avec la main droite sur le corps de la meuleuse, méthode prohibée officiellement. Ces meuleurs étaient observés, filmés, interrogés et pourtant trois meuleurs n'ont jamais adopté la « bonne méthode de travail », qui consiste à poser une main sur chaque poignée, le quatrième ne l'ayant fait que partiellement. Il y a lieu de se questionner sérieusement sur l'adéquation de cette « bonne méthode »,

qui implique, entre autres, un moment et une contrainte beaucoup plus importants au niveau du poignet.

Plusieurs équipements de protection individuelle (EPI), indispensables lors du meulage, sont utilisés par les meuleurs : gants, protecteurs auditifs, lunettes, visières, casque, masque, etc. Or, certains EPI sont mal adaptés au travail (par exemple, une visière qui s'embue nuit à la visibilité et constitue un risque à la sécurité). De plus, il y a carrément incompatibilité de certains EPI avec certaines situations de travail (le casque-masque RACAL dans les cales de bateaux et autres endroits restreints) de même que de certains EPI entre eux (casque-masque RACAL avec lunettes et avec coquilles auditives). Ces faits se reflétent également dans l'appréciation que font les meuleurs de ces EPI. Ainsi, certains ne se passeraient plus de leurs casques-masques RACAL alors que d'autres n'en veulent aucunement. On note également que l'entretien et l'entreposage des masques laissent à désirer dans certains cas. Finalement, on remarque que lors du soulèvement ou de l'enlèvement du casque ou de la visière, il est fréquent que des poussières tombent dans les yeux du travailleur. Ce risque de poussières aux yeux est heureusement sans gravité dans la plupart des cas. Toutes ces contraintes liées aux EPI ajoutent cependant à la pénibilité de la tâche des meuleurs.

Il existe une grande variété dans les outils : meuleuses et meules. Les équipements sont souvent hétéroclites dans une même usine : plusieurs types de meuleuses différents, plusieurs marques de meuleuses d'un même type, achetées au gré des visites des vendeurs de telle ou telle marque, plusieurs types et marques de meules. Il y a un manque de standard entre les outils pour une même usine : les connections des entrées d'air ne sont pas standard et nécessitent quantité d'adapteurs (« fittings ») différents. En plus des pertes de temps pour trouver la bonne connexion, ceci entraîne des improvisations qui sont souvent des entraves à la sécurité. De même, les arbres des meuleuses n'ont pas tous le même diamètre ni tous la même configuration. Ceci crée une difficulté pour assortir les meules aux meuleuses, par exemple, et requiert des outils différents pour installer et enlever les meules. Ainsi, les outils requis ne sont pas toujours disponibles, ce qui fait qu'on utilise souvent le mauvais outil, ou bien la nouvelle meule sert d'outil, ce qui est très dangereux. Cette situation a été observée à plusieurs reprises par le groupe de recherche; elle a été déclarée pratique courante par plusieurs meuleurs, se disant conscients des dangers mais ne disposant pas des outils requis. Il est à remarquer également que les poignées et les clenches (manettes de sécurité et de départ de la machine) diffèrent d'une meuleuse à l'autre. Cette hétérogénéité est une source de confusion supplémentaire, risque additionnel dans les situations contraignantes. Enfin, l'utilisation de telle ou telle meuleuse semble régie plus par le hasard et la disponibilité « ici et maintenant » que par une

logique d'opération, de tâches à réaliser, officielle ou même officieuse. Les coordinateurs en SST, de même que des meuleurs et des contremaîtres, ont d'ailleurs souligné cette grande hétérogénéité et certains des problèmes que cela entraîne. Ils ont, de plus, manifesté un besoin de plus grande uniformité et un besoin d'aide pour s'y retrouver dans cette diversité et choisir le bon ensemble meuleuse-meule pour une tâche donnée.

Les divers aspects de l'organisation du travail n'ont pas fait l'objet d'une analyse spécifique, cela n'était pas prévu au projet. Toutefois, les résultats d'observations et d'entretiens ont fait ressortir plusieurs éléments concernant l'organisation du travail, en lien étroit avec la situation de travail. Ces éléments, comme par exemple, la restructuration des définitions de tâches, les horaires de travail, la formation des meuleurs, les systèmes de gestion des outils ou l'absence de politique d'achat des meuleuses mériteraient d'être étudiés et restitués dans le cadre global du travail de meulage.

En résumé, l'analyse ergonomique a permis de révéler la variété des situations de travail, les contraintes au niveau de la posture et de l'effort, la variété dans les meuleuses et les meules, ainsi que les modifications à l'ensemble meuleuse-meule, les contraintes liées aux EPI et la présence de problématiques spécifiques à divers aspects de l'organisation du travail.

4.6 Synthèse des besoins

Les différentes visites de même que les groupes de discussions et l'analyse de la littérature réalisés dans le cadre de ce projet ont permis de recueillir une bonne quantité d'information, tant des besoins des utilisateurs par rapport aux outils et au procédé que des fonctions du produit lui-même ainsi que des spécifications techniques (ou d'étude) s'y rattachant. Certains commentaires ont également servi à alimenter l'analyse des risques présentée au point suivant du présent rapport. De plus, la majorité des spécifications d'étude recueillies au cours de ces activités ont été incluses dans la liste des points à vérifier lors de l'évaluation comparative.

Le tableau 3 présente un résumé des besoins des utilisateurs. L'annexe G comprend un résumé des activités rattachées à l'analyse des besoins et des attentes des utilisateurs de même que l'ensemble des informations recueillies.

- Poignée plus adhérante, plus confortable et isolante
- Position des poignées ajustable
- Choix de grosseur de poignée
- Meuleuse plus puissante
- Ne bourre pas
- Montage et démontage facile et rapide de la meule (système de serrage amélioré et uniformisé)
- Position du garde ajustable
- Installation du garde facile et rapide
- Offrir une bonne visibilité (garde, ...)
- Protéger de la projection de poussières ou autres
- Empêcher perforation du boyau d'air
- Efficacité
- Moins bruyant
- Gâchette facile à engager et désengager avec faible force de maintien (Low trigger force, positionnement et fonctionnalité)
- Loquet de sécurité plus facile à engager et à désengager (positionnement et fonctionnalité)
- Système d'arrêt d'urgence efficace
- Système de connexion (entrée d'air) facile
- Arbre de montage uniforme d'une meuleuse à l'autre
- Meuleuse légère
- Facilement manipulable
- Système simple et efficace du maintien automatique de la gâchette (Lock off throttle)
- Facilite l'accessibilité aux endroits restreints
- Faire une coupe "froide"
- Maintenir le RPM
- Régulariser (contrôler) la pression
- Durabilité
- Avoir des boyaux de couleurs
- Robustesse, résistance aux chocs (chutes, poignées qui cassent, ...)
- Moins de vibrations
- Motorisation plus résistant
- Système de rangement des équipements et des accessoires
- Abordable
- Meule bien balancée
- Meuleuse bien balancée
- Compatibilité entre les différents accessoires de protections (EPI)
- Entretien facile et simple
- Bonne formation

Tableau 3 Résumé des besoins et attentes des utilisateurs

4.7 Synthèse des risques

Au cours de l'analyse de risques, de même qu'au cours des différentes autres activités du projet, plusieurs risques spécifiques ainsi que plusieurs de leurs causes ont été identifiés. Ces risques et agents causals sont reliés à la conception des meules et meuleuses, aux procédés, à l'environnement physique de travail ou à des dysfonctionnements de l'activité de travail. Les risques identifiés ont été classifiés selon la description des risques proposée dans la norme européenne EN 292-1 « Sécurité

des machines - Principes fondamentaux, Principes généraux de conception » [2]. Cette classification aborde les risques selon leur nature (mécanique, électrique, thermique, etc.). Les tableaux 4, 5, 6, et 7 présentent les risques de nature mécanique (tableau 4), les risques de nature électrique (tableau 5), les risques engendrés par le bruit et les vibrations (tableau 6) ainsi que les risques engendrés par le non-respect des principes ergonomiques. L'annexe H détaille l'identification et la classification des risques, ainsi que leurs associations avec les causes et les potentiels de dangers.

Tableau 4 Risques de nature mécanique

Types de risques	Risques identifiés	Causes possibles (défaillance)	Sources de danger (potentiels de danger)
Risques d'objet ou de matériaux projetés (blessures aux yeux, la tête, ...)	Projection de fragments de la meule	Éclatement soudain et imprévu de la meule	• Coincement de la meule • Mauvais transport de la meule • Mauvais stockage de la meule (position) • Exposition à l'eau ou à l'humidité • Exposition à des températures extrêmes • Défauts de la meule avant montage • Défauts de montage • Pression de travail trop forte • Chocs accidentels • Vitesse trop élevée • Mauvaise utilisation (effort latéral par exemple) • Échauffement de l'arbre de fixation • Encrassement et déformation • Machine démunie de carter • Balourds
	Projection de particules	Projection de particules de meule et/ou de métal en provenance de la pièce usinée	• Carter inadéquat • Position de travail propice (au dessus de la tête, etc.)
		Projections diverses de poussières, grains abrasifs et métalliques	• Raccordement du boyau d'air comprimé à la machine • Débranchement subit du boyau d'air comprimé à la machine • « Vent » du grinder qui soulève la poussière
Risques de brûlures	Risques de brûlures	Inflammation par étincelles, solvants ou vapeurs de solvants ou de matières combustibles	• « Feux » du grinder dirigés toujours au même endroit
		Brûlures sur des soudures	• Vérification trop hâtive d'une soudure avec la main, avant de la meuler (non refroidie)

Types de risques	Risques identifiés	Causes possibles (défaillance)	Sources de danger (potentiels de danger)
Risques de coupures ou de sectionnement	Coupures ou sectionnement aux membres inférieurs et supérieurs de l'opérateur (mains, avant-bras, thorax, jambes, pieds etc.)	Intervention manuelle de l'opérateur pendant que la machine est encore en marche et contact accidentel	• Absence ou mauvais état des protecteurs • Bourrage fréquent • Accès trop facile à la meule • Mauvaise perception du risque • Vêtements amples
		Perte de contrôle de la pièce à usiner	• Pièce à usiner mal fixée ou tenue dans une main
		Démarrage intempestif	• Démarrage intempestif (rétablissement inopiné de l'énergie motrice) par le raccordement à la prise de courant ou par ouverture du robinet de la conduite d'air comprimé
		Perte de contrôle et chute de la machine	• Commande à automaintien qui laisse la machine fonctionner même après que le meuleur ait perdu le contrôle • Temps d'arrêt de la meule trop long, inertie ou énergie résiduelle faisant tomber la machine • Positions de travail instables • Outil non compatible aux travaux entrepris
		Démarrage intempestif suite à la chute de la machine	• Démarrage intempestif par le raccordement à la prise de courant ou par ouverture du robinet de la conduite d'air comprimé • Espace ou système de rangement inadéquat ou inexistant permettant de reposer les machines • Temps d'arrêt de la meule trop long, inertie ou énergie résiduelle faisant tomber la machine • Commande à automaintien qui laisse la machine fonctionner même après que le meuleur ait perdu le contrôle
		Frottement sur pièce à usiner coupante ou écharde de métal ou de bois	

Types de risques	Risques identifiés	Causes possibles (défaillance)	Sources de danger (potentiels de danger)
Risques de chutes de personnes	Trébuchement ou chute de l'opérateur	Chute par déséquilibre due à la réaction brutale de la machine	• Coincement de la meule • Brutalité du couple de démarrage sur machines puissantes
		Tuyau d'air comprimé traînant par terre ou autres obstacles (matériaux, débris, huile, etc.)	
		Positions de travail instables ou en hauteur	
Risques de chocs	Risques de chocs	Réaction brutale de la machine	• Coincement de la meule

Tableau 5 Risques de nature électrique

Types de risques	Risques identifiés	Causes possibles (défaillance)	Sources de danger (potentiels de danger)
Risques d'électrocution	Risques d'électrocution	Câbles mal isolés	• Travaux en atmosphère humide • Négligence de branche la « mise à la terre »

Tableau 6 Risques engendrés par le bruit et les vibrations

Types de risques	Risques identifiés	Causes possibles (défaillance)	Sources de danger (potentiels de danger)
Risques de trouble d'équilibre et/ou détérioration permanente de l'acuité auditive	Exposition de l'opérateur au bruit	Motorisation bruyante	
		Échappement bruyant	
		Meule bruyante (meules plates)	• Voilage des meules important
		Bruit rayonné par la pièce meulée	• Force de meulage importante
Risques de troubles ou lésions d'ordres vasculaires, nerveux, musculaires et osseux	Exposition de l'opérateur aux vibrations	Déséquilibrage des meules	• Balourd des meules important
		Contact non constant entre la meule et la pièce	• Voilage de fabrication et de montage des meules
		Transmission de vibrations par la meuleuse	• Paliers défectueux (entretien inadéquat) • Poignées inadéquates

Tableau 7 Risques engendrés par le non-respect des principes ergonomiques

Types de risques	Risques identifiés	Causes possibles (défaillance)	Sources de danger (potentiels de danger)
Risques d'effets physiologiques sur des personnes	Effort de manutention excessif	Manipulations de pièces lourdes	• Mauvaise conception des meuleuses (poids, position et conception des poignées, etc.)
		Poids des meuleuses important (utilisation prolongée)	
	Postures de travail contraignantes	Travail en espaces restreints	
		Travail en hauteur	
		Travail impliquant une staticité dans les postures	
Risques de troubles ou lésions d'ordres vasculaires, nerveux, musculaires et osseux aux membres supérieurs	Postures de travail exigeantes au niveau des membres supérieurs et des mains	Travail au-dessus de la tête, bras dans les airs et poignets en extension	• Mauvaise conception des meuleuses (poids, position et conception des poignées, etc.)
		Travail en espaces restreints, impossibilité de prendre une posture adéquate	
	Chute de l'opérateur	Travail en hauteur sur des échafaudages, échelles, escabeaux, etc.	• Postures de travail difficiles lorsque grimpé, peuvent provoquer un déséquilibre • Instabilité des échafaudages, échelles et escabeaux • Bris des échelles, escabeaux
		Objet encombrant l'espace de travail	• Bouts de bois, de métal, débris traînant par terre, flaque d'huile, etc.
Risques reliés à un manque de formation	Projection de fragments de la meule	Éclatement soudain et imprévu de la meule	• Mauvais choix de la meule • Meule mal montée • Mauvaise utilisation de la meule • Intégrité de la meule non vérifiée (meule pas sonnée)
	Projection de particule	Projection de particules de la meule ou de métal en provenance de la pièce	• Carter enlevé, modifié ou inadéquat • Position de travail • Raccordement des boyaux
	Efforts excessifs lors de manutention	Manipulation de pièces trop lourdes	
	Postures de travail inadéquates		
	Travail dans un lieu mal préparé, encombré	Omission de nettoyer l'espace de travail avant de commencer	
	Travail en hauteur sur des structures mal stabilisées	Omission de stabiliser les échafaudages, échelles, escabeaux.	
	Utilisation inadéquate des équipements de protection	Entretien inadéquat des équipements de protection	
		Omission de porter un équipement de protection	

5.0 DISCUSSIONS

5.1 Variété des situations de travail

Au cours de ce projet sur le procédé de meulage, le groupe de recherche a remarqué une très grande variété dans les environnements de travail, dans les tâches et les organisations, ainsi que dans les techniques et les savoir-faire employés.

Les différentes usines visitées ont des environnements de travail très différents les uns des autres, ceci engendre des conditions de travail également très différentes. Par exemple, la construction de structure de ponts implique beaucoup de structures droites, très longues, basses, beaucoup de surfaces verticales à meuler, que le travailleur peut ajuster en hauteur. La fabrication de turbines hydroélectriques comporte presque uniquement des surfaces arrondies, plus ou moins grandes, plus ou moins accessibles, plus ou moins mobiles. La construction et la réparation de bateaux impliquent des espaces restreints, immobiles, le travail au froid ou au chaud, souvent malgré les intempéries. La construction de matériel militaire ou nucléaire impose des standards de qualité sans égal dans aucun autre domaine. Ceci implique des postures, des efforts, des contraintes environnementales et des choix d'outils très différents d'une usine à l'autre.

Au niveau des tâches, des méthodes, de la planification et des organisations du travail, le lien procédé - organisation du travail est un déterminant fondamental des méthodes et de l'activité de travail. Ainsi, quand le meulage est effectué par le soudeur ou par le coupeur, celui-ci ne travaille pas nécessairement de la même manière que si c'est un autre travailleur qui effectue le meulage. Il mettra par exemple moins de soudure pour avoir à meuler le moins possible, quitte à s'appliquer davantage et à prendre plus de temps pour souder. Cela peut avoir de l'influence sur la quantité de soudure, sur la minutie du travail, mais également sur les postures adoptées, sur les efforts déployés et sur la meuleuse utilisée pour meuler. Dans une usine on vient de regrouper les fonctions de meuleurs et de journaliers. Dans une autre, pratiquement tous les travailleurs font du meulage à l'occasion. Dans une troisième, certains employés ne font que du meulage, 40 heures par semaine. Un même travailleur effectue souvent différents types de meulage : surfaçage, ébarbage, meulage au plafond, d'une surface verticale, dans un espace restreint. La gestion des outils de même que les types d'outils employés sont également très variables d'une entreprise à l'autre. Dans une usine, chaque travailleur garde ses meuleuses dans son casier, dans une autre, on est à restructurer la gestion de l'ensemble des outils manuels, dans une troisième, il y a le système officiel et le système réel. Dans une entreprise, on utilise

principalement les grosses meuleuses verticales de telle ou telle marque, dans une autre, on emploie les meuleuses à angles et surtout de telle autre marque. Dans quelle mesure tous ces aspects influencent-ils la situation de travail et les astreintes vécues par les travailleurs? Une analyse de la situation du point de vue de l'organisation du travail apporterait certainement un éclairage complémentaire pertinent.

Il existe également une grande variété dans les techniques et les savoir-faire employés. Par exemple, le « sautillement » de la meuleuse (aussi appelé « faire danser la meuleuse ») ne semble utilisé que dans une usine (ou principalement dans une usine). Cette technique qui adoucit davantage la surface est particulièrement contraignante pour les membres supérieurs. Les environnements de travail différents et les divers niveaux de qualité requis influencent également les techniques et les savoir-faire employés.

On a également remarqué une grande variété dans l'utilisation des EPI, dans les problèmes et les avis rapportés par les gens des différentes usines. Ainsi, par exemple, le casque-masque RACAL est soit très prisé, soit détesté des travailleurs. On l'apprécie principalement pour son apport en air frais. On n'en veut pas, car il est trop volumineux dans les espaces restreints, qu'il est trop encombrant pour être entreposé dans le casier personnel ou encore, parce qu'il est sale, car il n'est prévu ni temps, ni lieu, ni responsable pour en faire l'entretien.

Toutes ces différences dans les situations des usines font qu'il a parfois été difficile de comparer les réalités des usines. L'ergonome, entre autres, recherche en général les sources de variabilité comme autant d'indices permettant une meilleure compréhension de la situation de travail et des effets des modifications à cette situation sur les contraintes vécues par les travailleurs et les moyens qu'ils développent pour s'y adapter. Toutefois, dans ce cas-ci, les variations étaient tellement importantes que les situations n'étaient plus comparables. Les différences de situations, en termes d'environnement de travail, d'organisation du travail, de techniques employées par exemple, étaient de beaucoup plus importantes que les ressemblances. Cette vaste variété des situations permet peu de regroupements qui conduisent généralement à des recommandations communes, recherchées dans ce type de projet. Ainsi, que ce soit sur les méthodes de réduction du bruit et des poussières parvenant à l'opérateur, sur l'étude des besoins ou sur le diagnostic ergonomique, cette très vaste

diversité des situations de travail a pour impact de réduire d'autant la possibilité de solutions communes applicables à une majorité de situations.

Il est évident que cette très vaste diversité des situations de travail a eu un impact considérable sur les résultats de ce projet de recherche. En effet, dans ce projet l'on recherchait justement à établir des caractéristiques communes permettant de proposer des solutions communes. Or, sauf exception, cela n'est pas possible. Ceci est d'autant moins possible que les trois usines ayant participé activement au projet ne s'entendaient pas sur le choix d'une meuleuse ou d'un type de meuleuse à considérer. Pour améliorer la santé et la sécurité du procédé de meulage dans les usines, ce qui est la demande à l'origine de ce projet, il sera donc nécessaire de considérer la situation d'un tout autre point de vue. Il faudra, entre autres, considérer tous les aspects de l'organisation du travail, qui jouent une influence prépondérante dans ce cas et qui n'a pas été étudiée spécifiquement.

Ainsi, les caractéristiques communes sont trop peu nombreuses. Le manque d'uniformité est un problème, d'ailleurs soulevé par de nombreux utilisateurs. La diversité des situations et des types de meuleuses préférés est trop grande pour aborder la reconception d'une seule meuleuse et espérer avoir un impact positif significatif sur la SST de l'ensemble du meulage. Il serait donc opportun d'envisager la possibilité de fournir aux entreprises un outil leur permettant de mieux s'y retrouver dans cette très grande diversité. Un outil de sélection des meuleuses et des meules, tenant compte de cette diversité, pourrait permettre aux entreprises de faire les choix les plus judicieux possibles. Le besoin d'un tel outil a d'ailleurs été exprimé par divers clients-utilisateurs. Un tel outil pourrait également prendre en compte, avantageusement, divers aspects de l'organisation du travail.

5.2 Contexte technique, économique et stratégique

L'évolution technique, économique et stratégique du secteur de l'industrie lourde a entraîné, ces dernières années, une série de modifications majeures ayant, entre autres, des répercussions considérables sur le travail des meuleurs. Certains de ces facteurs du contexte global ont d'ailleurs eu un impact non négligeable sur le déroulement de ce projet de recherche. Trois changements majeurs méritent ici d'être appréciés en regard de leurs conséquences sur les aspects de la SST liés au meulage.

Parmi ces changements, la première manifestation visible pour le groupe de recherche est la diminution des mises en chantier, entraînant également une baisse quantitative du meulage manuel. En effet, les fluctuations de ce marché de gros oeuvre, très influencé par le contexte économique difficile ces dernières années, ont entraîné moins de chantiers, des fermetures d'usine et des grèves. Ainsi, une des entreprises à l'origine de ce projet a fermé. Une autre a considérablement diminué sa production, dont le meulage, si bien qu'on a eu peine à observer quelques minutes de meulage au cours d'une visite de plusieurs heures. Une troisième entreprise a vécu une grève, puis nous a répondu être trop occupée et trop contrainte financièrement pour poursuivre le projet, nous recevoir et participer aux groupes de discussion. Pour le groupe de recherche, cette situation a évidemment limité la cueillette des données lors de ce projet. Pour le secteur, elle est surtout la manifestation d'une diminution appréciable de la quantité de meulage manuel effectué dans l'industrie lourde[5].

Le second changement est lié à l'aspect technique du procédé de meulage. Dans ce contexte économique difficile, on mise généralement sur les innovations techniques pour améliorer qualité et productivité. Concrètement, ceci entraîne une plus grande automatisation des procédés de soudage, de découpage et de meulage, laissant aux humains les situations qui ne peuvent être automatisées. Ceci participe, d'une part, à la réduction du meulage manuel en général, mais d'autre part, à une augmentation proportionnelle des situations de meulage les plus contraignantes. Ainsi, pour plusieurs travailleurs, ce fait amène une concentration des situations de travail pénible.

Le troisième et dernier changement est lié à l'aspect organisationnel du travail, également en mutation, modifiant ici encore les caractéristiques quantitatives et qualitatives du travail des meuleurs. De par la nature même de ce secteur, chaque nouveau projet demande une ingénierie particulière et un ajout dans le carnet de commandes, ce qui peut modifier considérablement le portrait d'une usine en quelques semaines. Ainsi, une entreprise recevant le mandat de construire quelques gros bateaux, ou des composantes d'une centrale hydroélectrique ou nucléaire, peut doubler ou quadrupler sa main-d'oeuvre en quelques semaines. Pour améliorer leur capacité d'adaptation, les entreprises requièrent une plus grande polyvalence de leurs travailleurs. C'est ainsi que dans une usine on a regroupé les postes de meuleurs et de journaliers. Dans une autre, le meulage est réalisé par les soudeurs. Lors

[5] Il est à noter qu'aucune banque de données statistiques ne permet, toutefois, de confirmer la tendance à la baisse observée dans la quantité de meulage manuel. Ainsi, le Classification canadienne descriptive des professions (CCDP) ne permet pas d'isoler la profession meuleur, car elle est regroupée sous un même titre générique incluant limeurs, lustreurs, nettoyeurs et meuleurs (#8393). Le système de classifiaction des accidents de la CSST ne permet pas non plus de faire ressortir les accidents liés au meulage avec meuleuses portatives.

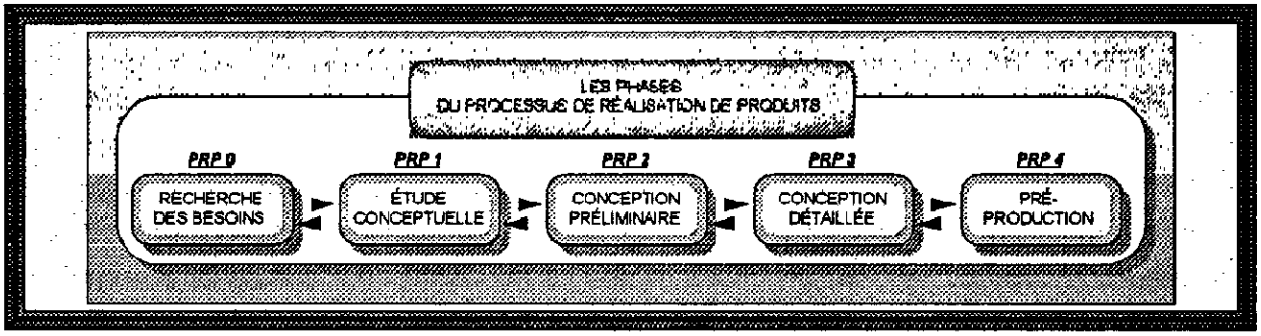
postes de meuleurs et de journaliers. Dans une autre, le meulage est réalisé par les soudeurs. Lors des grands mouvements de personnels, les travailleurs « rappelés » ou nouveaux, ne sont pas toujours adéquatement formés pour le meulage et fréquemment, en période de pointe, on ne prend guère le temps de les former, surtout s'ils ne meulent que sporadiquement. De toute façon, dans les situations critiques, nécessitant rapidité et qualité, on fait d'abord appel aux meuleurs d'expérience quel que soit leur titre officiel. En plus, ces périodes de pointe peuvent avoir une incidence sur le choix des outils disponibles et donc employés par les meuleurs. Ces grands mouvements de personnels ne sont pas nouveaux, ils sont inhérents à ce type d'entreprises. Toutefois, la situation économique de ces dernières années, l'attente d'une productivité escomptée toujours plus élevée, ainsi que la concentration des situations de travail contraignantes lors du meulage en amplifient les effets.

Ces trois changements tendent à classer les ouvriers meulant en deux catégories. Il y a ceux pour qui le meulage est une tâche secondaire ou même très sporadique. Ces travailleurs sont peu soumis aux bruit et vibrations, aux poussières et à la charge physique du meulage, même si les autres tâches qu'ils effectuent peuvent également être contraignantes physiquemement. La meuleuse n'est pas leur outil privilégié, ils utilisent souvent celle qui est disponible, peu importe la tâche à réaliser. Pour ces travailleurs, le meulage est peu susceptible de nuire à leur santé. Par contre, ils sont des sujets particulièrement à risque en ce qui concerne la sécurité, entre autres, par leur manque de formation et par leur manque d'habitude de l'outil et de son emploi.

La seconde catégorie est constituée des meuleurs que l'on peut qualifier de professionnels, ceux pour qui le meulage est la tâche principale. Le nombre total de ces travailleurs semble en diminution dans l'industrie lourde. Cependant, pour ceux qui restent, en général, leur situation ne s'améliore pas. Ils sont contraints aux tâches qu'on ne peut mécaniser ni automatiser, aux endroits restreints ou difficilement accessibles, aux postures pénibles, aux lieux très bruyants et mal ventilés. Bref, ils sont souvent limités aux situations qui sont intrinsèquement les plus difficiles et où les améliorations possibles sont, soit réduites, soit techniquement ou économiquement irréalisables. Pour ces meuleurs professionnels, les risques sont importants autant pour les aspects touchant la santé que pour ceux ayant trait à la sécurité.

5.3 Ingénierie simultanée

Pour mieux saisir l'essentiel de cette discussion, rappelons d'abord la démarche du projet de recherche inspirée du processus de réalisation de produits (PRP) de l'ingénierie simultanée. C'est une approche multidisciplinaire qui englobe toutes les activités reliées de près ou de loin au produit. Le PRP de l'ingénierie simultanée débute par l'identification d'un problème, d'une opportunité, d'un besoin ou d'un marché et se termine lorsque le produit est entre les mains du client ou consommateur. Cette démarche est décrite en détail à l'annexe A d'où la figure suivante est tirée.



Réf. : Annexe A figure 2.1 : Les phases du processus de réalisation de produits

Cette figure illustre les différentes phases du PRP. Il est à remarquer que même si les éléments semblent être dans un ordre séquentiel, ce processus traite l'information de façon simultanée, ce qui est représenté par les flèches à double sens entre les éléments. La contribution de chaque discipline varie en importance selon la phase du PRP. Par exemple, les spécialistes de la fabrication voient leur nombre et leur contribution culminer à la phase 4, tandis que ce sera l'inverse pour les concepteurs. Idéalement, il y a toujours au moins un représentant de chaque discipline à chaque phase.

Le cadre de ce projet était limité aux deux premières phases seulement du PRP, c'est-à-dire la phase de recherche des besoins et celle de l'étude conceptuelle (partiellement). La première phase du processus, la recherche des besoins du client, est d'une importance capitale puisqu'elle oriente l'évolution du projet lui-même. L'ingénierie simultanée propose certains outils pour ces deux premières

phases du processus. Les quatre outils suivants ont été appliqués dans le cadre de ce projet de façon satisfaisante :

- les groupes de discussions;
- les essais comparatifs;
- les sondages comparatifs;
- les outils d'identification et d'analyse de risques.

Malgré les contraintes imposées par le contexte de la réalisation du projet, décrit à la section 1.3, les membres des différentes disciplines de l'équipe de recherche ont été exposés aux mêmes problèmes et aux mêmes besoins des utilisateurs. Leurs analyses et leurs conclusions ont été mutuellement discutées. Toutefois, les solutions optimales sont le résultat de la conciliation de plusieurs contraintes, besoins et points de vue disciplinaires. À cette étape, la participation explicite et réelle d'un fabriquant (ses concepteurs entre autres) est essentielle lorsqu'il s'agit de l'équipement. Lorsqu'il s'agit du procédé spécifiquement, il faut la participation des concepteurs de l'usine. Ces participants ne sont pas les seuls requis bien sûr, mais ils sont essentiels. Cependant, dans le cadre général de ce projet, nous n'avons eu aucun contrôle sur leur participation effective. De plus, l'usine qui avait exprimé clairement son intention de participer, selon cette approche, s'est malheureusement retirée du projet.

L'approche de l'ingénierie simultanée, bien que très performante et des plus avantageuses pour l'intégration de la SST, peut exiger des conditions spécifiques pour en faciliter une application intégrale. Cette application intégrale n'était pas l'objectif de ce projet.

6.0 RECOMMANDATIONS

De ce projet visant, entre autres, à proposer des avenues de solutions et des priorités de recherche en ce qui a trait aux meules, aux meuleuses et aux procédés, il est ressorti des recommandations spécifiques concernant le bruit et les vibrations, les poussières et l'ergonomie. Elles sont présentées ici.

6.1 Bruit et vibrations

6.1.1 Cahiers des charges vibro-acoustiques

Les données ci-dessous résument les paramètres qu'il faut contrôler et les valeurs maximales de ces paramètres. Pour plus d'explications sur ces données techniques, le lecteur peut se référer à l'annexe D.

Meule :

Classe d'équilibrage	G100
Tolérance du trou d'alésage	d9
Voilage maximum	0.1 mm
Excentration maximum	déterminée par la classe d'équilibrage et la tolérance d'alésage
Amortissement interne	15 % requis pour les meules plates uniquement

Meuleuse :

Motorisation	Pneumatique à turbine
Tolérance arbre de montage	H9
Voilage du flasque de serrage	0 (pour les meules plates seulement)

6.1.2 Pistes de solutions

Les solutions de réduction des vibrations par augmentation de l'inertie et par poignée lourde sont très prometteuses, et doivent être exploitées impérativement dans la poursuite du projet ou dans le cadre d'une autre étude connexe.

Inertie des meuleuses : la modélisation analytique simple de la cinématique de la meuleuse donne une équation qui donne le niveau de vibration inversement proportionnel à l'inertie rotationnelle de l'ensemble meule et meuleuse. Les essais ont montré qu'il est possible d'augmenter significativement l'inertie rotationnelle, en augmentant faiblement la masse totale de la meuleuse et d'obtenir facilement des réductions des niveaux de vibrations. Au laboratoire, le GAUS a obtenu des réductions de 6 dB du niveau de vibrations d'une meuleuse en n'ajoutant que 10 % du poids initial pour doubler l'inertie rotationnelle grâce à des masselottes placées au bout des poignées de l'outil.

Poignées antivibratiles : la poignée antivibratile est une solution simple, mais qui a toujours été mal exploitée. Recouvrir une poignée avec un matériau amortissant ou souple a obligatoirement une efficacité réduite, pour la simple raison que la masse dynamique du système main-bras à la fréquence d'excitation (typiquement 100 Hz) devient négligeable en regard de la masse statique et de l'effort de pression exercé sur l'outil. Les poignées antivibratiles classiques sont donc beaucoup trop raides pour isoler efficacement le système main-bras. L'idée exploitée est de suspendre la poignée par rapport au reste du corps de la meuleuse et non de suspendre le système main-bras de la poignée. Un prototype non optimisé dit à « poignée lourde » découplée du corps de la meuleuse, a été mis au point et a permis d'obtenir sans problème de 15 à 21 dB de réduction des niveaux de vibrations dans les poignées rendant l'outil totalement sécuritaire. Notons qu'un tel système est transférable à la plupart des outils à mains (scie à chaîne, marteau piqueur, etc.).

6.2 Poussières

Telles que présentées dans les résultats (point 4.4 de ce rapport), dans les usines visitées, les fumées de soudage représentent le risque prioritaire du point de vue de la prévention des maladies pulmonaires. Toute modification au procédé de meulage devrait éviter d'introduire des contaminants fibrogènes ou cancérigènes ou d'augmenter la concentration de poussières aéroportées. La valeur de poussière totale de 1 à 3 mg/m³ constitue le point de référence des meuleuses actuelles.

6.3 Ergonomie

L'analyse de la situation de travail a révélé plusieurs éléments qu'il est important de rappeler avant de présenter la recommandation découlant de la composante ergonomique du projet :

- la situation est vaste, diversifiée et changeante. Les usines ont des environnements de travail très différents les uns des autres. Les procédés de fabrication, les procédés de meulage, les planifications du travail, les tâches, les méthodes de travail, les organisations du travail, les techniques et les savoir-faire employés varient considérablement d'une usine à l'autre;
- s'il se fait de moins en moins de meulage manuel dans l'industrie lourde, et si beaucoup de gens de métiers connexes (soudeurs, coupeurs...) font un peu de meulage à l'occasion, les meuleurs professionnels qui demeurent sont de plus en plus soumis à des conditions de travail contraignantes;
- les types de meuleuses et de meules, les marques et les modèles employés sont aussi nombreux et extrêmement variables d'une usine à l'autre. De plus, aucun fabricant de meuleuse n'est installé au Québec;
- aucune des usines participantes n'est dotée d'une méthode systématique d'achat et de sélection des meuleuses et des meules;
- tout au long de ce projet, a émergé un besoin mal comblé chez les meuleurs, il s'agit du besoin d'une formation meilleure en quantité et en qualité;
- finalement, dans de nombreuses situations, il y a incompatibilité entre les équipements de protection individuelle (EPI) et le travail.

Dans ces conditions, il serait pertinent de fournir aux entreprises, un outil d'aide à la sélection des meuleuses et des meules, en rapport avec le procédé et l'ensemble de la situation du meulage. C'est d'ailleurs un besoin exprimé par plusieurs représentants des usines : coordinateurs en SST, contremaîtres, meuleurs. (Pour plus de détail au sujet de cet outil d'aide, se référer à l'annexe J).

L'élaboration d'un tel outil de sélection doit faire l'objet d'une étude approfondie au cours de laquelle, il faudra compléter les informations recueillies dans le cadre de ce projet-ci et construire un tel outil. Toutefois, les résultats du projet sur le procédé de meulage permettent de considérer quelques-uns des éléments que devrait contenir un tel outil d'aide. L'essentiel dans le choix d'un ensemble meuleuse-meule est de déterminer parmi les meuleuses et les meules existantes, quels types de meuleuses et de meules sont appropriés en fonction de plusieurs facteurs, dont :

- le travail à faire;
- les conditions de ce travail et de la situation d'un point de vue ergonomique;
- les heures d'utilisation et les autres caractéristiques de la situation.

L'outil d'aide pourrait être composé d'un noyau, lui-même constitué d'une marche à suivre, accompagnée d'un questionnaire de sélection de types de meuleuses et de meules tenant compte des facteurs énumérés plus haut. À ce noyau viendrait se greffer les cinq sections suivantes :

- une section informative sur la caractérisation des meuleuses, des meules et des procédés;
- une démarche simple d'analyse ergonomique du meulage;
- une démarche d'évaluation comparative pour les meuleuses et les meules;
- un questionnaire de sélection et un protocole d'évaluation des équipements de protection individuelle;
- un programme de formation sur l'opération sécuritaire du meulage à l'intention des meuleurs.

Parmi les conditions indispensables à la réalisation et à la diffusion d'un tel d'outil d'aide, il faut souligner la nécessité de l'implication concrète des usines intéressées ainsi que de l'ASP du secteur de l'industrie lourde (ASFETM).

7.0 CONCLUSION

L'objectif général de ce projet était double :

1. établir une base de connaissances par l'analyse de la situation existante en termes de risques à la santé et à la sécurité du travail;
2. déterminer l'ensemble des besoins des différents utilisateurs et l'ensemble des contraintes du procédé pour en arriver à proposer des priorités de recherche concernant les meules, les meuleuses et les procédés, ainsi qu'une avenue de solution.

Différentes analyses et études ont été réalisées pour établir la base de connaissances et déterminer l'ensemble des besoins :

- analyse de la littérature et de la documentation;
- analyse de rapports d'accidents;
- analyse ergonomique du travail;
- étude détaillée des sources de bruit et vibrations;
- échantillonnage des poussières;
- groupes de discussion (« focus groups »);
- évaluation comparative;
- analyse des besoins et attentes;
- analyse des risques.

L'encadrement général du projet s'est inspiré de l'ingénierie simultanée. Le projet a été réalisé par un groupe de recherche multidisciplinaire de spécialistes provenant de l'Université de Sherbrooke (GRIS, GAUS) et de l'IRSST (Sécurité-ingénierie, Sécurité-ergonomie et Hygiène et toxicologie). Même s'il n'a pas été possible d'utiliser tout le potentiel qu'offre l'ingénierie simultanée, cette approche a tout de même permis de développer une vision plus globale et plus large que sans l'approche de l'ingénierie simultanée.

De ces analyses et études sont ressorties des données spécifiques à certaines disciplines, comme pour le bruit ou les poussières, ou communes à l'ensemble, l'analyse des besoins, par exemple.

En étudiant la situation du meulage manuel dans l'industrie lourde, on croyait considérer une sujet suffisamment circonscrit et homogène, pour pouvoir orienter les solutions vers des critères de conception précis et utiles à l'ensemble de l'industrie. Si cela est en partie vrai pour les aspects bruit, vibrations et poussières, il en est autrement des autres éléments des situations de travail. En effet, les situations sont extrêmement variées et changeantes. Cette diversité concerne, entre autres, les environnements de travail, les procédés de meulage, les planifications du travail, les tâches, les méthodes de travail, les techniques et savoir-faire employés, de même que les types de meuleuses et de meules utilisés. Le contexte technique, économique et stratégique est également en mutation. Il se fait de moins en moins de meulage manuel. Cependant, toute proportion gardée, le meulage qui demeure manuel se fait dans des conditions de plus en plus contraignantes pour les meuleurs.

Dans ces conditions, il est illusoire de proposer des critères de conception du meulage ou des meuleuses qui tiendraient compte de l'ensemble des variables des situations de travail, ainsi que de l'ensemble des types de meuleuses utilisés dans l'industrie lourde et qui auraient un impact positif appréciable sur la SST. Ceci est d'autant plus vain, qu'il n'y a aucun fabricant de meuleuse au Québec avec qui s'associer pour reconcevoir une meuleuse.

Ainsi, trois types de recommandations ont émergé de ce projet :

- en ce qui concerne le bruit et les vibrations :
  - des données pour un cahier des charges vibro-acoustiques et
  - des pistes de solutions pour réduire les vibrations par augmentation de l'inertie des meuleuses et par des poignées lourdes (à mettre en relation avec l'utilisation relative des poignées et leur disposition actuelle);
- en ce qui a trait aux poussières :
  - la prévention doit se faire au niveau des fumées de soudage;
- pour ce qui est de la composante ergonomique :
  - l'élaboration d'un outil d'aide à la sélection des meuleuses et des meules, en rapport avec le procédé et l'ensemble de la situation du meulage, dont divers aspects de l'organisation du travail.

Cet outil constitue un besoin exprimé par l'ensemble du milieu de travail. Étant donné les conditions variées et changeantes du meulage dans l'industrie lourde, l'élaboration et l'utilisation d'un tel outil d'aide constitueraient certainement un pas important vers l'amélioration de la santé et de la sécurité

de l'opération de meulage. De plus, le simple usage systématique d'un tel outil accroîtrait la sensibilisation et l'importance de la prévention des risques. L'utilisation d'un tel outil permettrait une prise en charge importante du milieu.

BIBLIOGRAPHIE

1- NF EN 292-1. «Sécurité des machines - Principes fondamentaux, Principes généraux de conception», Norme européenne, Norme française, Association française de normalisation (AFNOR), Paris, (1991).

2- DINÉ, R. et JACQMIN, M. «Enquête sur les accidents provoqués par les machines à meuler», Cahiers de notes documentaires N° 104, p. 367 à 371, INRS, Paris, (3ème trimestre 1981).

3- PIETTE, A., GOMES FERREIRA, M.L., MALCHAIRE, J. «Vibrations engendrées par les meuleuses», PROMOSAFE , Vol. 4, p. 38-42, (1994).

4- PIETTE, A., MALCHAIRE, J., GOMES FERREIRA, M.L. «Meuleuses portatives. Bilan des sources de vibrations, moyens de prévention.» Cahiers de notes documentaires N° 159, p. 221 à 230, INRS, Paris, (2ième trimestre 1995).

5- KIHLBERG, S. «Biodynamic response of the hand-arm system to vibration from an impact hammer and a grinder». International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 16, p. 1-8, (1995).

6- PIETTE, A., GOMES-FERREIRA, L., MALCHAIRE, J. «Exposition aux vibrations main-bras des meuleuses. Influences de la posture et des efforts», Cahier de médecine du travail, Vol. XXXII, N° 1, p. 45-53, (1995).

7- ROCHER, O., LEY, F.X., DONATI, P. «Pathologie ostéo-articulaire du coude liée à l'exposition aux vibrations engendrées par les machines portatives», Documents pour le médecin du travail, N° 56, p. 375-386, (1993).

ANNEXE A

Résumé de l'approche méthodologique initiale

préparé par

Groupe de recherche en
ingénierie simultanée de
l'Université de Sherbrooke

Dans le cadre du projet d'étude sur la sécurité du procédé de meulage

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION **1**

2. MÉTHOLOGIE GÉNÉRALE DU PROJET **3**

3. COEUR DU PROJET **5**

3.1 Répertorier et analyser les rapports d'accidents de la CSST 5
3.2 Répertorier et analyser les rapports d'enquêtes d'entreprises 5
3.3 Répertorier et analyser les cas d'accidents graves (CSST) 6
3.4 Répertorier et analyser les mesures préventives proposées en entreprises 6
3.5 Décrire et classifier les types de meuleuses, de meules et de procédés de meulage 6
3.6 Entretien préliminaire avec les gens du milieu 6
3.7 Observations préliminaires sur le terrain 7
3.8 Définir qui sont les "clients" 7
3.9 Entretiens semi-dirigés avec "clients" (individuellement, sur le terrain) 7
3.10 Observation de différents types de procédés 7
3.11 Élaboration d'une liste de besoins SST et autres 8
3.12 Entretien semi-dirigé avec "clients" (en groupe de discussion) 8
3.13 Regrouper l'information sur les facteurs de risques caractérisés 8
3.14 Préparer les sondages comparatifs 9
3.15 Réaliser les sondages comparatifs 9
3.16 Appliquer l'échelle de priorité de la conception en SST 9
3.17 Appliquer les principes de conception en SST 10
3.18 Appliquer les méthodes et approches traditionnelles de conception en SST 10
3.19 Regrouper l'information sur les pistes de solutions préliminaires aux problèmes de SST 10
3.20 Traduire les besoins, les fonctions et les solutions aux problèmes de SST en spécifications fonctionnelles 11
3.21 Préparer les essais comparatifs 11
3.22 Réaliser les essais comparatifs 12
3.23 Déterminer les CRINIFLEX préliminaires des spécifications fonctionnelles 12
3.24 Finaliser les matrices DFQ I 12

4. ANALYSE FONCTIONNELLE **13**

4.1 Détailler les étapes du cycle de vie 13
4.2 Identifier les fonctions de service 13
4.3 Organiser les fonctions en arbre fonctionnel 13

5. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUES MÉCANIQUES, ÉLECTRIQUES, ET THERMIQUES **14**

5.1 Utiliser les techniques d'identification des dangers 14
5.2 Utiliser les méthodes d'identification des dangers 14

6. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUES ENGENDRÉS PAR LE NON-RESPECT DES PRINCIPES ERGONOMIQUES 15

6.1 ÉLABORATION D'UNE GRILLE D'OBSERVATION 15
6.2 VALIDATION DE LA GRILLE D'OBSERVATION 15
6.3 ÉVALUATION DES EFFORTS PHYSIQUES FOURNIS PAR LE MEULEUR 15

7. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUES ENGENDRÉS PAR DES MATÉRIAUX ET PRODUITS 16

7.1 DÉTERMINATION DE LA CONCENTRATION ET ANALYSE DES POUSSIÈRES DANS LA ZONE DE RESPIRATION DU TRAVAILLEUR 16

8. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUES ENGENDRÉS PAR LE BRUIT ET LES VIBRATIONS 17

8.1 CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE ET VIBRATOIRE DE LA MEULEUSE À VIDE 17
8.2 CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE DE LA MEULEUSE EN FONCTION SUR UNE PIÈCE 17
8.3 CARACTÉRISATION ACOUSTIQUE DE LA PIÈCE MEULÉE 17

1. INTRODUCTION

Ce document présente le résumé de l'approche méthodologique de réalisation du projet de recherche sur les meuleuses et les procédés de meulage. Il s'adresse aux chercheurs et aux autres intervenants de l'équipe du projet. La démarche qui y est proposée est inspirée de l'approche de l'ingénierie simultanée. La méthodologie du déploiement de la fonction qualité (DFQ) est proposée comme gestionnaire du processus et des informations générées au cours de cette recherche.

Le diagramme de cheminement des activités du projet (annexe B) présente l'agencement des principales activités de réalisation de ce projet de recherche. Les activités sont regroupées en six blocs: 1. le coeur du projet, 2. l'analyse fonctionnelle, 3. l'identification et la caractérisation des facteurs de risques mécaniques, électriques, et thermiques, 4. l'identification et la caractérisation des facteurs de risques engendrés par le non-respect des principes ergonomiques, 5. l'identification et la caractérisation des facteurs de risques engendrés par les matériaux et produits, 6. l'identification et la caractérisation des facteurs de risques engendrés le bruit et les vibrations. Comme l'illustre le diagramme de cheminement de l'annexe B, ces blocs d'activités sont réalisés parallèlement, conformément à l'approche d'ingénierie simultanée.

Le coeur du projet, comme son nom l'indique, est le centre d'information et de gestion du projet. C'est dans ce bloc d'activités que sont emmagasinées les informations générées par les autres blocs d'activités parallèles. C'est aussi dans ce bloc que seront réalisées les activités qui généreront les informations nécessaires aux activités des autres blocs d'activités. C'est par exemple dans le coeur du projet que sont regroupées les activités de rencontres avec les "clients" et les visites sur le terrain. Les représentants de tous les sous-groupes de recherche participent aux activités du coeur du projet. Afin d'en préciser les objectifs tout au long du projet, ce bloc d'activités est séparé en trois phases: la phase de recherche des besoins, des fonctions, et des facteurs de risques caractérisés, la phase de recherche des pistes de solutions, et enfin, la phase de formalisation des pistes de solutions.

Le bloc de l'analyse fonctionnelle est celui où sont définies les meuleuses, les meules et les procédés de meulage en termes de leurs fonctions de services respectives. Cette modélisation fonctionnelle devrait faciliter l'identification subséquente des facteurs de risques et l'élaboration des spécifications de conception du cahier des charges.

Les quatre derniers blocs d'activités concernent spécifiquement l'identification et la caractérisation des facteurs de risques, et l'identification des pistes de solutions aux divers problèmes de santé et de sécurité d'utilisation des meuleuses, des meules et des procédés de meulage. Leurs activités spécifiques se déroulent selon les directives établies dans le protocole du projet. Contrairement aux blocs précédents, ces blocs d'activités ne sont pas nécessairement réalisés par tous les membres de l'équipe de recherche, mais plutôt par des sous-groupes de recherche (GRIS, IRSST ergonomie, IRSST hygiène industrielle, GAUS). La nature même de ce projet de recherche exige toutefois que soit maintenue une étroite collaboration entre les sous-groupes de recherche, et un échange constant d'informations avec les activités du coeur du projet et des autres blocs.

Les pages suivantes présentent le résumé des différentes activités de chacun des blocs. Les objectifs ainsi que les entrées, les sorties, et le sous-groupe pilote de chacun des blocs d'activités sont aussi définis. Enfin, bien que l'agencement (et la description) des blocs d'activités et des activités dans les blocs donne un aperçu de l'échéancier du projet, celui-ci ne pourra être établi définitivement qu'après la consultation de tous les intervenants.

2. MÉTHOLOGIE GÉNÉRALE DU PROJET

La démarche proposée pour rencontrer les objectifs spécifiques de ce projet de recherche est inspirée de l'approche de l'ingénierie simultanée. La méthodologie du projet de recherche est donc basée sur le processus de réalisation de produits (PRP) de l'ingénierie simultanée. Ce processus est, par définition, une approche systématique et globale qui intègre toutes les activités nécessaires au développement ou à l'amélioration d'un produit dans un environnement. C'est une approche multidisciplinaire qui englobe toutes les activités reliées de près ou de loin au produit. Le PRP de l'ingénierie simultanée débute par l'identification d'un problème, d'une opportunité, d'un besoin ou d'un marché et se termine lorsque le produit est entre les mains du client ou consommateur, ou même lors de la destruction ou du recyclage du produit.

On peut décomposer le processus de réalisation de produits en cinq phases représentant les étapes du développement de produits. La Figure 2.1 illustre les différentes phases du PRP. Il est à remarquer que même si les éléments semblent être dans un ordre séquentiel, ce processus traite l'information de façon simultanée, ce qui est représenté par les flèches à double sens entre les éléments.

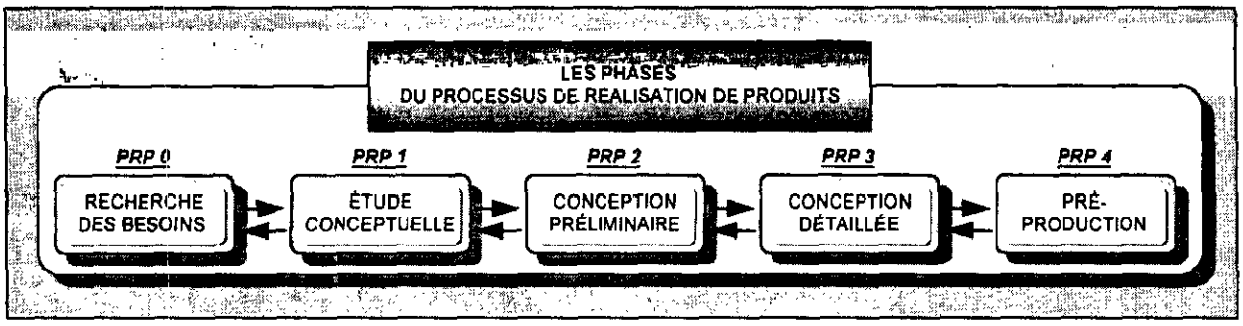


Figure 2.1: Les phases du processus de réalisation de produits

Dans le cadre de ce projet, les deux premières phases du PRP, c'est-à-dire la phase de recherche des besoins et celle de l'étude conceptuelle, ont été couvertes. Les différentes activités que comportent chacune des phases du processus de réalisation de produits de l'ingénierie simultanée font appel à plusieurs outils. Certains sont relativement nouveaux, alors que d'autres sont connus et utilisés depuis un bon nombre d'années. Parmi les plus importants qui seront utilisés dans les deux premières phases du processus de ce projet, on retrouve:

- les groupes de discussions
- les essais comparatifs
- les sondages comparatifs
- les outils d'identification et d'analyse de risques,
- les outils de créativité,
- les méthodes d'émergence de concepts.

La première phase du processus de réalisation de produits, la recherche des besoins du client, est d'une importance capitale puisqu'elle oriente l'évolution du projet lui-même. C'est au cours de cette phase que s'effectue, dans un premier temps, la planification du projet et que sont fixés les objectifs à atteindre en fonction de la problématique à l'origine du projet. Des activités de recherche et d'analyse des besoins du client complètent par la suite cette première phase du processus. Pour ce projet plus spécifiquement, ces activités se sont traduites par une analyse de la littérature et de la documentation suivies d'entretiens et d'observations préliminaires sur le terrain dans le cadre de visites en entreprises. Par la suite, des groupes de discussions (entretiens semi-dirigés) ont été organisés suivis, en dernier lieu, d'une étude comparative ayant pour objectif d'évaluer différents outillages par le biais de sondages et d'essais comparatifs. Ces différentes activités sont présentées dans le cheminement développé et proposé par le GRIS en annexe B et constitue les premières activités du coeur du projet.

En parallèle à ces dernières activités et aussi basé sur les informations recueillies lors des visites et entretien avec les clients, d'autres activités qui avaient pour but d'identifier et de caractériser les facteurs de risques ont été réalisées. Pour mener à terme ces analyses de risques, les différents groupes impliqués dans ce projet ont pu orienter leurs efforts en fonction de leur spécialité. Ainsi, le Groupe de recherche en acoustique de l'Université de Sherbrooke (GAUS) a oeuvré tout spécifiquement à la caractérisation acoustique et vibratoire des meules, des meuleuses et des pièces meulés. D'autre part le GRIS en collaboration avec le groupe "sécurité-ingénierie" de l'IRSST ont orienté leurs efforts sur l'identification et la caractérisation des facteurs de risques mécaniques, électriques et thermiques. L'analyse des risques engendrés par le non-respect des principes ergonomiques a été prise en charge par le groupe "ergonomie" de l'IRSST et enfin, les risques engendrés par la propagation de poussières ont été analysés par le groupe "d'hygiène industrielle" de l'IRSST.

La seconde phase du PRP, l'étude conceptuelle ou la phase de recherche de pistes de solutions, est celle qui force les membres de l'équipe de conception à élaborer de nouveaux concepts et de nouvelles façons de faire. Il est bien sûr essentiel de pouvoir répondre aux besoins du client, le but ultime de la réalisation du produit. Il faut noter que les décisions prises lors de cette phase auront un impact sans égal sur l'allure, la fonctionnalité, la qualité, la sécurité et le coût du produit.

Dans la cadre de ce projet, cette phase conceptuelle s'est limitée à une analyse des principales technologies et solutions répertoriées et à des propositions de solutions potentielles existantes dans la littérature pour la maîtrise à la source des risques identifiés.

3. COEUR DU PROJET

Phase de recherche des besoins, des fonctions, et des facteurs de risques caractérisés De septembre 1994 à février 1995 inclusivement	
OBJECTIFS:	Dresser la liste des besoins (SST et autres), des fonctions et des facteurs de risques caractérisés pour l'utilisation des meuleuses, des meules et des procédés de meulage.
ENTRÉES:	• Rapports d'accidents et d'enquêtes, CSST et entreprises • Mesures préventives proposées en entreprises • Informations sur les meuleuses, les meules et les procédés de meulage • Grille d'observations des procédés de meulage • Observations et entrevues sur le terrain • Arbres fonctionnels meuleuses, meules, procédés de meulage • Informations sur les facteurs de risques caractérisés
SORTIES:	• Listes pondérées des besoins SST et autres • Classification des facteurs de risques caractérisés • Les "quoi" des matrices DFQ I
PILOTE DES ACTIVITÉS:	IRSST

3.1 Répertorier et analyser les rapports d'accidents de la CSST

- Définir l'activité
- Définir l'accident
- Définir le type de blessure

3.2 Répertorier et analyser les rapports d'enquêtes d'entreprises

- Définir l'activité
- Définir l'accident
- Définir le type de blessure•

3.3 Répertorier et analyser les cas d'accidents graves et mortels (CSST)

- Rapports disponibles à la CSST

3.4 Répertorier et analyser les mesures préventives proposées en entreprises

- Revue de la littérature sur les mesures préventives existantes
- Utilisation du savoir et du savoir faire des "lead users" en entreprises
- Recherche de pistes de solutions préliminaires
- Recherche d'idées nouvelles sur la prévention des accidents

3.5 Décrire et classifier les types de meuleuses, de meules et de procédés de meulage

- Descripteurs pour les meules et les meuleuses:

  ⇨ type et nombre de chaque type;
  ⇨ poids, formes et dimensions;
  ⇨ composition des meules;
  ⇨ vitesse de rotation;
  ⇨ durée de vie et âge moyen;
  ⇨ types d'énergie;
  ⇨ manuel d'utilisation (des fabricants et des utilisateurs);
  ⇨ besoins en nouveaux produits.

- Descripteurs pour les procédés de meulage:

  ⇨ type de postes;
  ⇨ types de procédés;
  ⇨ méthode de travail;
  ⇨ type de pièce meulée;
  ⇨ type de procédé en amont du meulage.

3.6 Entretien préliminaire avec les gens du milieu

- Une rencontre informelle
- Une dizaine de personnes, une demi-journée
- Familiarisation avec les "clients"
- Détermination des procédés types à analyser
- Préparation des rencontres subséquentes et des visites sur le terrain

3.7 Observations préliminaires sur le terrain

- Deux sites différents (minimum)
- Une demie journée par visite
- Prises de photos
- Enregistrement de vidéo
- Brefs entretiens avec des meuleurs

3.8 Définir qui sont les "clients"

- Établir une liste
- Meuleurs, personnel d'entretien, contremaîtres, concepteurs de procédés, etc..
- Définition de la représentation de chacun lors des rencontres sur le terrain

3.9 Entretiens semi-dirigés avec "clients" (individuellement, sur le terrain)

- Plusieurs rencontres d'une journée (incluant observations sur le terrain)
- Rencontrer plusieurs "clients" à chacune des rencontres
- Selon représentation définie précédemment
- Cueillette des besoins SST et autres
- Définition préliminaire du groupe de discussion (pour la prochaine rencontre en groupe)
- Cueillette d'informations pour l'analyse ergonomique, entre autres:

  - ⇨ temps de travail, horaires;
  - ⇨ productivité en fonction des procédés;
  - ⇨ critères de qualité attendue, formels et informels;
  - ⇨ structures organisationnelles et hiérarchiques de l'entreprise;
  - ⇨ manuels d'utilisation ou de formation disponibles;
  - ⇨ formation reçu et besoin en formation;
  - ⇨ équipements de protection individuelle (ÉPI) recommandés, fournis par l'entreprise, obligatoires ou non;
  - ⇨ taux d'utilisation réels des ÉPI;
  - ⇨ raisons motivant l'utilisation partielle des ÉPI.

3.10 Observation de différents types de procédés

- Plusieurs visites d'une journée (incluant entretiens semi-dirigés)
- Selon la classification élaborée précédemment
- Observations selon la grille d'observation de l'analyse ergonomique
- Prise de mesures (dimensionnelles, bruit, vibration, hygiène, etc.)
- Prises de photos

- Enregistrement de vidéo

3.11 Élaboration d'une liste de besoins SST et autres

- Regroupement, adaptation et organisation des besoins recueillis
- Préparation d'une liste de besoins à pondérer
- Organiser les besoins et les fonctions en trois matrices DFQ I: meuleuses, meules, procédés de meulage
- Une trentaine de besoins par matrice DFQ I

3.12 Entretien semi-dirigé avec "clients" (en groupe de discussion)

- Un groupe de discussion formé d'une dizaine de "clients" issus de plusieurs entreprises
- Une demi-journée
- Validation des résultats obtenus lors des rencontres précédentes
- Préciser certaines questions sur les besoins
- Pondération des besoins SST et autres par les "clients" du groupe de discussion
- Ajouter ces informations aux matrices DFQ I

3.13 Regrouper l'information sur les facteurs de risques caractérisés

- Suite aux analyses menées par les différents sous-groupes de recherche
- Regrouper les facteurs de risques
- Classifier selon mécanique, électrique, thermique, bruit, vibration, ergonomie et hygiène
- Identifier les potentiels de danger dans les facteurs de risques
- Identifier les éléments déclencheurs dans les facteurs de risques

Phase de recherche des pistes de solutions De mars à août 1995 inclusivement	
OBJECTIFS:	Rechercher les pistes de solutions aux problèmes de santé et de sécurité d'utilisation des meuleuses, des meules et des procédés de meulage identifiés.
ENTRÉES:	• Listes pondérées des besoins SST et autres • Classification des facteurs de risques caractérisés • Résultats des sondages comparatifs • Informations sur les pistes de solutions
SORTIES:	• Pistes de solutions aux problèmes de SST
PILOTE DES ACTIVITÉS:	GRIS

3.14 Préparer les sondages comparatifs

- Identifier les besoins à comparer (une vingtaine au maximum)
- Identifier le ou les types meuleuses et les modèles à comparer (trois ou quatre)
- Se procurer les différents modèles à comparer
- Identifier les "clients" de la population du sondage
- Préparer les bancs d'essais (sur le terrain)

3.15 Réaliser les sondages comparatifs

- Sur le terrain
- Une dizaine de clients (minimum)
- Une demi-heure par "client" (maximum)

3.16 Appliquer l'échelle de priorité de la conception en SST

- L'échelle de priorité de solution des problèmes de SST:

  1. Éliminer les dangers à la source
  2. Prévoir des gardes et des protections contre les dangers qui n'ont pu être éliminés à la source
  3. Former et informer les utilisateurs contre les risques résiduels

3. Former et informer les utilisateurs contre les risques résiduels
4. Fournir une protection individuelle aux utilisateurs

3.17 Appliquer les principes de conception en SST

- Principe de prévention du mauvais usage
- Principe de la panne orientée
- Principe de tolérance aux erreurs
- Principe de sécurité par positionnement
- Principe de défaillance évidente
- Principe de niveau énergétique nul
- Principe DATAD
- Principe de l'anti-vandales

3.18 Appliquer les méthodes et approches traditionnelles de conception en SST

- Appliquer les principes d'ergonomie
- Appliquer le HAZOP aux procédés de meulage
- Appliquer l'AMDE et l'AMDEC

3.19 Regrouper l'information sur les pistes de solutions préliminaires aux problèmes de SST

- Rassembler l'information sur les pistes de solutions aux problèmes de SST proposées par les différents sous-groupes de recherche
- Associer les pistes de solutions aux facteurs de risques
- Vérifier que tous les facteurs de risques ont été considérés

Phase de formalisation des pistes de solutions De septembre à novembre 1995 inclusivement	
OBJECTIFS:	Intégrer les pistes de solutions aux problèmes de santé et de sécurité d'utilisation des meuleuses, des meules et des procédés de meulage dans les spécifications de conception.
ENTRÉES:	• Pistes de solutions aux problèmes de SST • Listes pondérées des besoins SST et autres • Résultats des essais comparatifs
SORTIES:	• Spécifications fonctionnelles de conception, incluant l'aspect SST • Critères, niveaux et flexibilité des spécifications fonctionnelles • Cahier des charges fonctionnelles (spécifications fonctionnelles des matrices DFQ I finalisées)
PILOTE DES ACTIVITÉS:	GRIS

3.20 Traduire les besoins, les fonctions et les solutions aux problèmes de SST en spécifications fonctionnelles

- Associer les solutions proposées aux besoins et aux fonctions
- Traduire les besoins et les fonctions en spécifications fonctionnelles, par le biais des solutions proposées (entre autres)
- Organiser les spécifications fonctionnelles
- Inclure les spécifications fonctionnelles aux matrices DFQ I meuleuses, meules et procédés de meulage
- Compléter les matrices des relations DFQ I

3.21 Préparer les essais comparatifs

- Identifier le ou les types de meuleuses et les modèles à comparer (trois ou quatre)
- Se procurer les différents modèles à comparer
- Identifier les spécifications fonctionnelles à comparer (une vingtaine au maximum)
- Identifier les moyens nécessaires aux essais
- Préparer les bancs d'essais (en laboratoire)

3.22 Réaliser les essais comparatifs

- En laboratoire
- Compléter les informations non fournies par le fabriquant
- Compléter les informations non obtenues lors des analyses précédentes

3.23 Déterminer les CRINIFLEX préliminaires des spécifications fonctionnelles

- CRINIFLEX: critère (ex. longueur en cm), niveau (ex. 12 cm), flexibilité (ex. 12 cm +/- 2 cm)
- À l'aide des données obtenues par les différents sous-groupes de recherche
- À l'aide des données obtenues lors des essais comparatifs
- Inclure ces informations aux matrices DFQ I

3.24 Finaliser les matrices DFQ I

- Pondérer les spécifications fonctionnelles selon les difficultés techniques, organisationnelles et économiques à obtenir le CRINIFLEX ciblé
- Établir les corrélations entre les spécifications fonctionnelles à l'intérieur des matrices
- Établir les corrélations entre les trois matrices
- Calculer le degré d'importance des spécifications fonctionnelles
- Prendre les décisions de compromis sur les CRINIFLEX en regard des corrélations (matrices de corrélations à l'intérieur des matrices et entre les matrices)
- Finaliser les CRINIFLEX des spécifications fonctionnelles

4. ANALYSE FONCTIONNELLE

De septembre à décembre 1994 inclusivement

OBJECTIFS:	Créer la représentation fonctionnelle des meuleuses, des meules et des procédés de meulage.
ENTRÉES:	• Informations sur les étapes du cycle de vie
SORTIES:	• Procédures détaillées de toutes les étapes du cycle de vie • Arbres fonctionnels meuleuses, meules et procédés de meulage • Décomposition des principaux sous-systèmes des meuleuses
PILOTE DES ACTIVITÉS:	GRIS

4.1 Détailler les étapes du cycle de vie

- S'inspirer des observations sur le terrain et des entretiens avec les "clients"
- Détailler les procédures d'entreposage, de transport, et de manutention
- Détailler les procédures de mise en service
- Détailler les procédures d'opération
- Détailler les procédures de maintenance

4.2 Identifier les fonctions de service

- Identifier les fonctions principales des meuleuses
- Identifier les fonctions principales des meules
- Identifier les fonctions principales des procédés de meulage
- Identifier les fonctions secondaires des meuleuses
- Identifier les fonctions secondaires des meules
- Identifier les fonctions secondaires des procédés de meulage
- Identifier les fonctions contraintes des meuleuses
- Identifier les fonctions contraintes des meules
- Identifier les fonctions contraintes des procédés de meulage

4.3 Organiser les fonctions en arbre fonctionnel

- Trois arbres: meuleuses, meules, procédés de meulage
- Détailler l'univers fonctionnel complet
- Identifier les principaux sous-systèmes des meuleuses

5. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUES MÉCANIQUES, ÉLECTRIQUES, ET THERMIQUES

De septembre 1994 à février 1995 inclusivement

OBJECTIFS:	Identifier et caractériser les facteurs de risques mécaniques, électriques, et thermiques. Identifier les pistes de solutions aux problèmes de santé et de sécurité d'utilisation des meuleuses, des meules et des procédés de meulage.
ENTRÉES:	• Informations sur les meuleuses, les meules et les procédés de meulage • Entrevues, observations et mesures sur le terrain
SORTIES:	• Liste des facteurs de risques caractérisés • Pistes de solutions
PILOTE DES ACTIVITÉS:	IRSST/GRIS

5.1 Utiliser les techniques d'identification des dangers

- Rechercher les erreurs d'interprétation ou d'exécution
- Rechercher les mauvais usages
- Utiliser l'approche énergétique
- Utiliser l'analyse des déviations
- Utiliser le brainstorming

5.2 Utiliser les méthodes d'identification des dangers

- Utiliser les arbres des fautes
- Utiliser les arbres des événements
- Utiliser les matrices des doubles fautes

6. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUES ENGENDRÉS PAR LE NON-RESPECT DES PRINCIPES ERGONOMIQUES

De septembre 1994 à février 1995 inclusivement

OBJECTIFS:	Identifier et caractériser les facteurs de risques engendrés par le non-respect des principes ergonomiques. Identifier les pistes de solutions aux problèmes de santé et de sécurité d'utilisation des meuleuses, des meules et des procédés de meulage.
ENTRÉES:	• Informations sur les meuleuses, les meules et les procédés de meulage • Entrevues, observations et mesures sur le terrain
SORTIES:	• Liste des facteurs de risques caractérisés • Pistes de solutions
PILOTE DES ACTIVITÉS:	IRSST

6.1 Élaboration d'une grille d'observation

- Suite aux entretiens et aux observations préliminaires sur le terrain
- Considérer le procédé
- Considérer les choix des meuleurs
- Considérer les manipulations
- Considérer les postures

6.2 Validation de la grille d'observation

- À l'aide d'un petit échantillon d'observation
- Vérification et modification au besoin

6.3 Évaluation des efforts physiques fournis par le meuleur

- En laboratoire, à l'aide d'un montage expérimental
- Quantifier les forces et les moments transférés par la meuleuse à la pièce meulé

7. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUES ENGENDRÉS PAR DES MATÉRIAUX ET PRODUITS

De septembre 1994 à février 1995 inclusivement

OBJECTIFS:	Identifier et caractériser les facteurs de risques engendrés par les matériaux et produits. Identifier les pistes de solutions aux problèmes de santé et de sécurité d'utilisation des meuleuses, des meules et des procédés de meulage.
ENTRÉES:	• Informations sur les meuleuses, les meules et les procédés de meulage • Entrevues, observations et mesures sur le terrain
SORTIES:	• Liste des facteurs de risques caractérisés • Pistes de solutions
PILOTE DES ACTIVITÉS:	IRSST

7.1 Détermination de la concentration et analyse des poussières dans la zone de respiration du travailleur

- Selon le protocole de recherche

8. IDENTIFICATION ET CARACTÉRISATION DES FACTEURS DE RISQUES ENGENDRÉS PAR LE BRUIT ET LES VIBRATIONS

De septembre 1994 à février 1995 inclusivement

OBJECTIFS:	Identifier et caractériser les facteurs de risques engendrés par le bruit et les vibrations. Identifier les pistes de solutions aux problèmes de santé et de sécurité d'utilisation des meuleuses, des meules et des procédés de meulage.
ENTRÉES:	• Informations sur les meuleuses, les meules et les procédés de meulage • Entrevues, observations et mesures sur le terrain
SORTIES:	• Liste des facteurs de risques caractérisés • Pistes de solutions
PILOTE DES ACTIVITÉS:	GAUS

8.1 Caractérisation acoustique et vibratoire de la meuleuse à vide

- Selon le protocole de recherche

8.2 Caractérisation acoustique de la meuleuse en fonction sur une pièce

- Selon le protocole de recherche

8.3 Caractérisation acoustique de la pièce meulée

- Selon le protocole de recherche

7. RÉSUMÉ DES RÉSULTATS ESCOMPTÉS

Suite à la réalisation de ce projet de recherche, les informations suivantes auront été obtenues et/ou précisées par les membres de l'équipe de recherche:

- La définition des divers scénarios d'accidents impliquant les procédés de meulage, ainsi que leurs conséquences;
- Une classification détaillée des différents types de meules, de meuleuses et de procédés de meulage;
- Les arbres fonctionnels des meules, meuleuses et procédés de meulage;
- La définition des divers "clients" ou intervenants dans le domaine des procédés de meulage;
- Une liste pondérée des besoins des "clients" relatifs à la santé et la sécurité d'utilisation des meuleuses et des meules dans les différents procédés de meulage;
- Une liste pondérée des autres besoins des "clients" pour l'utilisation des meuleuses et des meules dans les différents procédés de meulage;
- Une liste des facteurs de risques caractérisés de nature mécanique, électrique, thermique, ergonomique, acoustique, vibratoire et ainsi que ceux engendrés par les matériaux et produits;
- Les résultats d'un sondage comparatif mené auprès des "clients" sur différents modèles de meuleuses;
- Les pistes de solution préliminaires (incluant, dans certains cas, les résultats d'essais de confirmation) pour tous les problèmes de santé et de sécurité identifiés;
- Les résultats d'essais comparatifs menés par les chercheurs sur différents modèles de meuleuses;
- La liste des spécifications fonctionnelles (incluant critère, niveau et flexibilité) correspondant aux besoins, fonctions et pistes de solutions identifiés;
- Les matrices DFQ I complètes pour les meules, les meuleuses et les procédés de meulage.

ANNEXE B

Cheminement et échéancier des activités

préparé par

Groupe de recherche en
ingénierie simultanée de
l'Université de Sherbrooke

Dans le cadre du projet d'étude sur la sécurité du procédé de meulage

ANNEXE C

Caractérisation du procédé de meulage, des meuleuses et des meules.

préparé par

Groupe de recherche en
ingénierie simultanée de
l'Université de Sherbrooke

Dans le cadre du projet d'étude sur la sécurité du procédé de meulage

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION **1**

2. CARACTÉRISATION **2**

2.1 CARACTÉRISATION DES PROCÉDÉS DE MEULAGE 2

2.1.1 Définition et types de procédés 2

2.2 CARACTÉRISATION DES MEULES 3

2.2.1 Définition et catégories de meules 3

2.2.2 Les grains abrasifs 8

2.2.3 Le liant 9

2.2.4 Les pores 10

2.2.5 Le renforcement 10

2.2.6 Méthode de fabrication 11

2.2.7 Désignation des meules 12

2.2.8 Mesure de sécurité de base 12

2.2.9 Manufacturiers de meules 16

2.3 CARACTÉRISATION DES MEULEUSES PORTATIVES 17

2.3.1 Définition 17

2.3.2 Les différents types de meuleuses portatives 17

2.3.3 Constitution d'une meuleuse 19

2.3.4 Les manufacturiers 21

1. INTRODUCTION

Les différentes activités tels que les visites en usine, les entretiens avec les différents intervenants et la revue de la littérature utilisées pour la définition des besoins de même que pour l'analyse des risques ont permis de se familiariser avec la terminologie utilisée dans le domaine des activités reliées au procédé de meulage[1].

Dans le but de transmettre ces connaissances acquises et pour uniformiser la rédaction des documents issus de ce projet de recherche et éventuellement leur lecture, le groupe de recherche a rédigé le document suivant.

[1] Dans ce document, le terme "**meule**" signifie la pièce d'abrasifs agglomérés tournant lors du meulage, le terme "**meuleuse**" signifie la machine à meuler, alimentée par énergie (électrique ou pneumatique) servant à faire tourner la meule, le terme "**meulage**" signifie l'action de meuler ou le procédé lui-même et le terme "**meuleur**" représente le travailleur qui effectue le procédé de meulage. Tous les meuleurs rencontrés sont des hommes et nous utiliserons donc le masculin lorsque nous parlerons de ces travailleurs dans ce document. Toutefois, cela ne signifie pas que des femmes ne pourraient pas réaliser ce type de travail.

2. CARACTÉRISATION

2.1 Caractérisation des procédés de meulage

2.1.1 Définition et types de procédés

Le meulage consiste tout simplement à enlever des particules d'une pièce par abrasion à l'aide d'une meule. Cet enlèvement de matière peut avoir différents objectifs et de ce fait, il existe différents procédés de meulage.

Parmi ceux-ci, on retrouve d'abord le **tronçonnage** (ou sciage). C'est en fait un opération qui consiste à scier ou à couper une pièce à l'aide d'une meule conçue à cet effet.

On retrouve aussi parmi les procédés de meulage, celui de l'**ébarbage**. On défini l'ébarbage comme étant l'action d'ébarber, de débarasser des barbes, des aspérités et/ou des bavures la surface d'une pièce. Ce procédé est souvent utilisé pour donner un meilleur fini suite à une opération de soudage.

Le **rainurage** qui consiste à creuser ou faire une cannelure ou une entaille faite en long ou un sillon est aussi un des procédés de meulage fréquemment utilisé.

Les meuleuses sont aussi souvent utilisées pour faire des opérations de **surfaçage**, ou autrement dit, pour polir mécaniquement une surface en opérant par bandes successives.

Enfin, ces mêmes meuleuse peuvent aussi servir au procédé de décalaminage qui a pour objectif d'enlever la calamine (mélange de carbonates et d'autres composés) déposée sur les parois métalliques.

Parmi tout ces procédés répertoriés dans la littérature, les plus souvent rencontrés dans la pratique sont sans aucun doute l'ébarbage et le surfaçage. En fonction du type

d'entreprises et des produits fabriqués par celles-ci, les meuleurs sont appelés à évoluer dans différentes positions de travail souvent très inconfortables. De plus, les pièces à être meulées peuvent être constituées de différents matériaux. Parmi ceux-ci, en voici une liste non-exhaustive:

- acier;
- béton;
- béton armé;
- pierre;
- fibre-ciment;
- matériaux à base de terre cuite;
- marbre;
- granite;
- etc.

2.2 Caractérisation des meules

2.2.1 Définition et catégories de meules

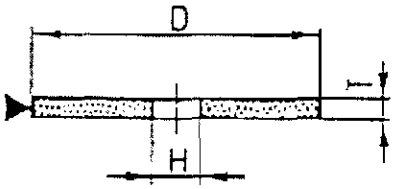
Une meule est un outil de coupe tournant et travaillant par abrasion. Elle est composée de centaines de particules abrasives (les grains) retenues ou agglomérées fortement entre elles par un liant. On trouve plusieurs catégories de meules sous différentes formes et tailles. Le choix d'une meule dépendra du type d'outil utilisé et du genre d'opération ou de tâche à accomplir. Les différentes catégories existantes peuvent être classées d'après leur constitution, leurs formes, leurs dimensions, c'est-à-dire en fonction de:

- la natures des grains abrasifs;
- la grosseur des grains;
- la dureté de la meule ou grade;
- la structure ou la répartition des grains;
- la nature de l'agglomérant:
- le type;
- l'utilisation à laquelle elle sont destinées.

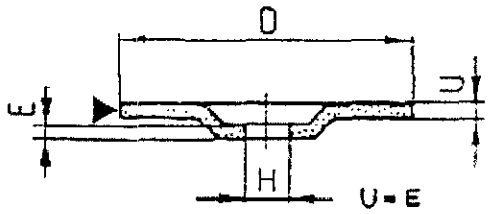
Les figures suivantes présentent une classification des différentes meules pour les meuleuses portatives:

Source: Fédération Européenne des fabricants de produits abrasifs (FEPA), «Code Européen de sécurité pour l'emploi des meules et produits abrasifs agglomérés», INRS, Paris, 76 p. (1987)

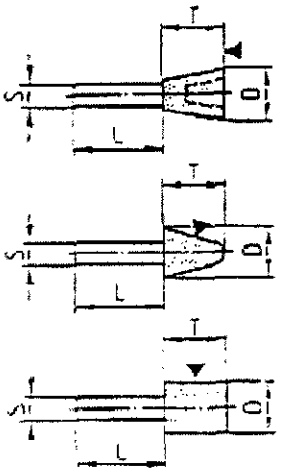
Meule à tronçonner plate

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Vs ≤ 100 m/s D ≤ 350 mm T ≤ 0.02 D H ≤ 0.25 D

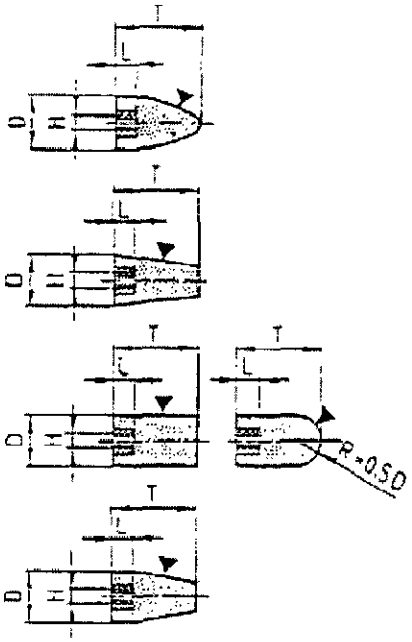
Meule à tronçonner à moyeu déporté

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Vs ≤ 80 m/s D ≤ 230 mm U ≤ 4 H ≤ 0.25 D

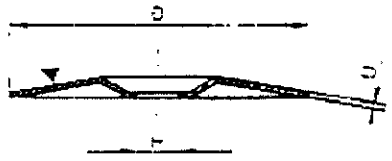
Meule sur tige

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Voir Code Européen de sécurité page 65 à 67. La vitesse maximale est fonction de la forme, des dimensions de la meule de même que du diamètre et de la longueur libre de la tige.

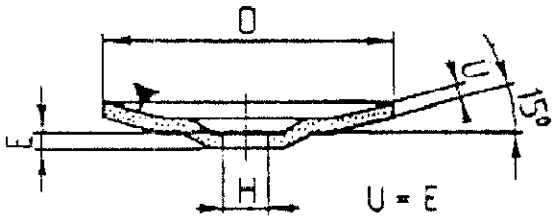
Meule sur écrou

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Vs ≤ 50 m/s D x T max = 80 mm x 100 mm

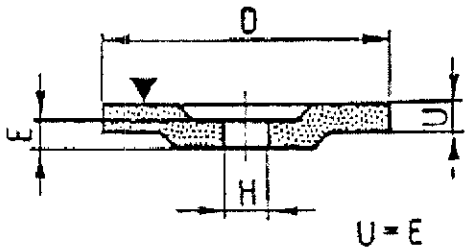
Meule semi-flexible à moyeu déporté

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Vs ≤ 80 m/s D ≤ 230 mm 4 ≤ U ≤ 10

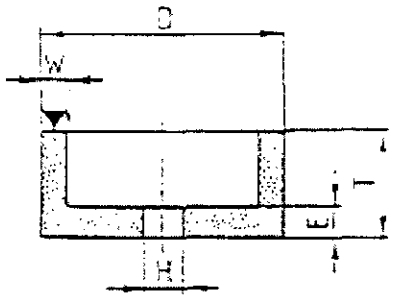
Meule soucoupe à moyeu déporté

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Vs ≤ 80 m/s D ≤ 320 mm 4 ≤ U ≤ 10

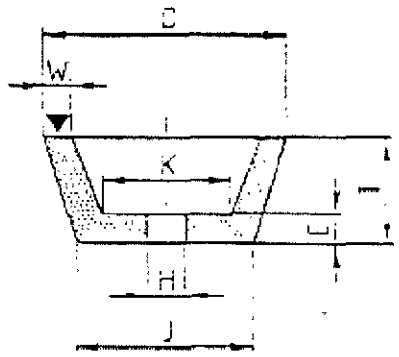
Meule à moyeu déporté

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Vs ≤ 80 m/s D ≤ 320 mm 4 ≤ U ≤ 10

Meule à boisseau droit

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Vs ≤ 50 m/s E ≤ 0.25 T

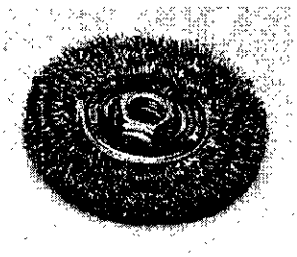
Meule à boisseau conique

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Vs ≤ 50 m/s E ≤ 0.25 T

Meule à boisseau métallique

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Iconnues

Meule métallique

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	LIMITES PHYSIQUES
	Inconnues

Malgré la très grande variété de meules existantes, on peut rapidement les classer en trois grandes catégories; les disques, les meules à boisseau et les meules sur tige ou écrou pour le meulage en bout. Lors des visites du groupe de recherche en usine, la majorité des disques de meulage retrouvés étaient des meule à moyeu déporté et des meules à boisseau (communément appelées les pierres) de type conique. Pour ce qui est des meules sur tige et sur écrou, elles ont en quelque sorte attirés un peu moins l'attention du groupe de recherche puisqu'elles étaient en majeur partie du temps utilisé que de façon sporadique par d'autres spécialistes tels que des soudeurs, par exemple, qui s'en servaient qu'un faible pourcentage de leur temps pour parfaire leur travail ou accéder à des endroits plus restreints.

Enfin, la nature de la tâche à effectuer par la meule détermine le type de meule, de grain d'abrasif et de liant utilisé. La prochaine section décrira donc les éléments de base constituant les meules.

2.2.2 Les grains abrasifs

Les grains d'abrasifs sont des particules abrasives de synthèse ou naturelles. Le matériau de l'abrasif détermine les propriétés physiques des grains ou des cristaux. La structure interne

du matériau détermine la forme et l'abrasivité du grain. La forme de la particule et sa friabilité (comment elle se casse en plus petits morceaux) détermine son application. Par analogie, une meule contient donc des milliers d'outils de coupe qui se fracturent continuellement pour faire apparaître de nouvelles faces coupantes et s'éjectent pour laisser la place à de nouveaux grains (régénération de la meule). Les composés suivants sont les types d'abrasifs les plus couramment rencontrés:

- Alumine (ou oxyde d'aluminium): utilisé pour la coupe de métaux ou d'autres matériaux durs.
- Carbure (Carbure de silicium): un grain très dur et très coupant utilisé pour la coupe de matériaux non ferreux comme le béton, la pierre,...
- Autres types: Nitrure de bore, Oxyde de chrome et alumine, ...

D'autres abrasifs utilisent du diamant naturel ou de synthèse et trouvent leur application dans la coupe de céramique, la rectification de matériaux durs, etc.

2.2.3 Le liant

Le liant est le composé qui retient ensemble les particules d'abrasif à l'intérieur de la meule. La quantité de liant détermine la résistance de la meule à la force de meulage. Une meule avec une grande quantité de liant est une meule "dure" et inversement une meule avec moins de liant est une meule "tendre".

Le liant "résinoïde" est le liant le plus utilisé dans le domaine d'application qui nous concerne. Le liant résinoïde est un composé organique de synthèse à la fois souple et résistant. Les liants résinoïdes peuvent être faits en une grande variété de dureté et de qualité. D'autres liant sont disponibles comme le caoutchouc (organique), les liants céramiques ou vitrifiés à base de magnésie, silicate, etc.

2.2.4 Les pores

Les pores sont les trous résiduels entre les grains et le liant. Le rôle des pores est double: ils permettent l'accumulation de copeaux à la surface de la meule et la circulation du lubrifiant dans le cas où celui-ci est nécessaire (rectification). La quantité de pores détermine la capacité de la meule à évacuer les copeaux. Si le volume de pore est faible, on dit que la meule est fermée (la meule s'encrasse vite, la surface meulée devient glacée et même brûlée), si le volume de pores est important la meule est ouverte, l'évacuation de copeaux se fait bien mais la meule s'use rapidement.

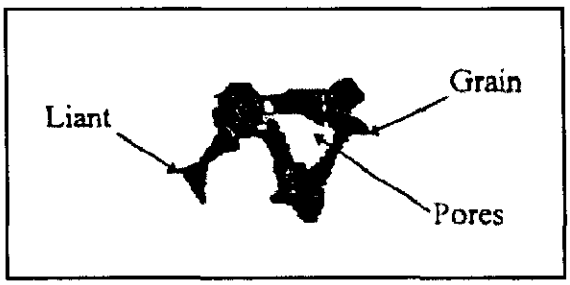


Figure 2-1 : Schéma illustrant la structure "grain - liant - pores"

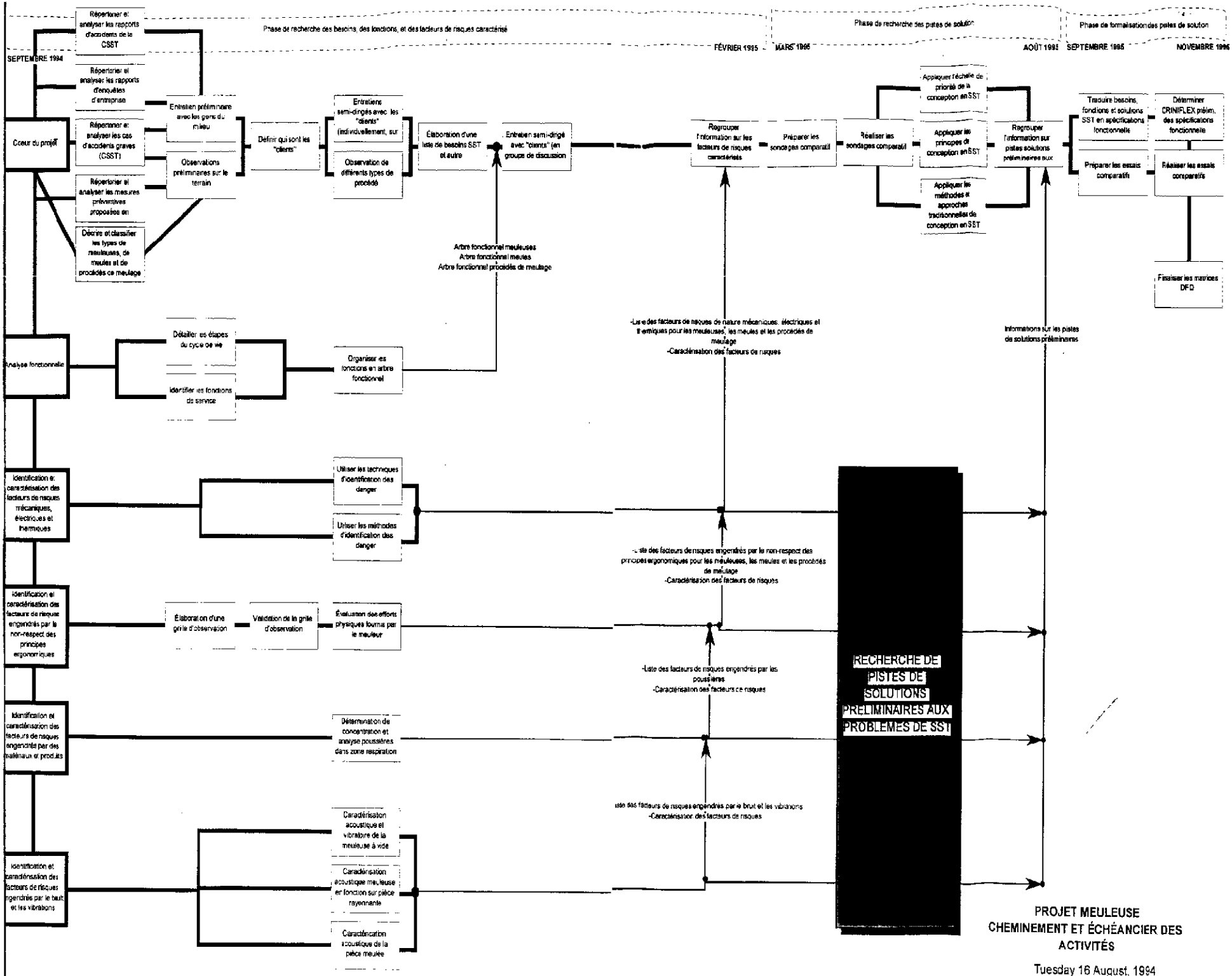
2.2.5 Le renforcement

La fibre de verre est utilisée dans la fabrication des meules pour permettre une plus grande résistance aux efforts dus aux vitesses de rotation élevées et aux efforts de flexion dus à la pression de meulage. Des filets de fibre entrelacées sont insérés dans la structure de la meule. La fibre de verre est imprégnée par le liant résinoïde, de ce fait elle fait partie intégrante de la structure de la meule.

2.2.6 Méthode de fabrication

La fabrication d'une meule comprend 6 phases principales:

1. Le pesage: on pèse une quantité déterminée de grains abrasifs et d'un agglomérant provisoire.
2. Le malaxage: on mélange de manière à enrober le grain du liant provisoire, puis on introduit le liant définitif (sous forme de poudre), puis on tamise le mélange de manière à trier les différentes tailles de grains.
3. Le pressage: le mélange est pressé dans un moule ayant approximativement la forme qu'on veut donner à la meule.
4. Le séchage: la meule obtenue est placée dans une étuve afin d'éliminer toutes traces d'eau.
5. Le profilage: la meule est taillée dans sa forme définitive.
6. La cuisson: la meule est mise au four (à 180 degrés pendant 6 heures pour les meules à liant résinoïde). Le liant fond et enrobe les grains d'abrasif et par le fait même, le liant provisoire est éliminé.



PROJET MEULEUSE
CHEMINEMENT ET ÉCHÉANCIER DES ACTIVITÉS

Tuesday 16 August, 1994

2.2.7 Désignation des meules

L'exemple suivant montre la manière de désigner une meule suivant la norme ANSI.

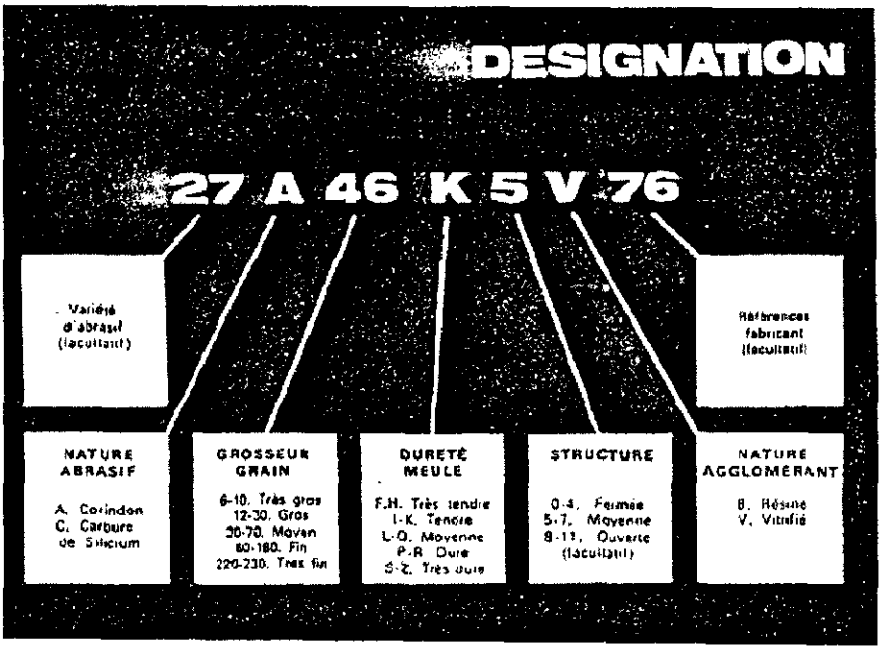


Figure 2-2 : Désignation des meules [Source: TOBELEM, W., (1988)]

La taille de grain la plus courante pour les meules est 24 à 36. La dureté courante est de Q à T (mi- dure).

2.2.8 Mesure de sécurité de base

Il existe dans la littérature une quantité impressionnante de recommandations des fabricants et de normes régissant l'emploi, l'entretien et la protection des meules et meuleuses qui peuvent, si elles sont connues et respectées, minimiser les risques d'accidents fâcheux reliés au procédé de meulage.

ANSI B7.1 Normes de sécurité régissant l'emploi, l'entretien et la protection des meules.

ANSI B186.1 Safety Code for Portable Air Tools

ANSI Z87.1 Occupational and Educational Eye and Face Protection

...

Pour plus de renseignements, voir la bibliographie détaillée du rapport synthèse.

Et voici un résumé des principales recommandations répertoriées.

Manipulation et entreposage

Les meules sont des outils relativement fragiles. La moindre petite fissures ou imperfections est susceptible de provoquer l'éclatement de la meule, entraînant ainsi des accidents souvent graves. Elles doivent donc être stockées sur des étagères, dans des casiers ou dans des tiroirs spécialement étudiés à cet effet, dans des locaux secs (l'humidité peut attaquer l'agglomérant et affecter la résistance de la meule) et à l'abri des variations excessives de température pour éviter les contraintes thermiques. Les meules trop minces ne doivent pas être stockées sur le côté mais horizontalement sur leur surface plane. Toutes les meules doivent être manipulées avec précaution, évitant les chutes ou les heurts. Elles doivent être "sonnées" pour vérifier leur bon état. Elles doivent rendre un son clair qui indique normalement un absence de fêlures. Le test de son ne peut toutefois servir que pour les meules ayant 10 cm (4 po) de diamètre ou plus, de plus, ce test n'est pas très significatif pour les meules organiques, car le résultat est difficile à interpréter.

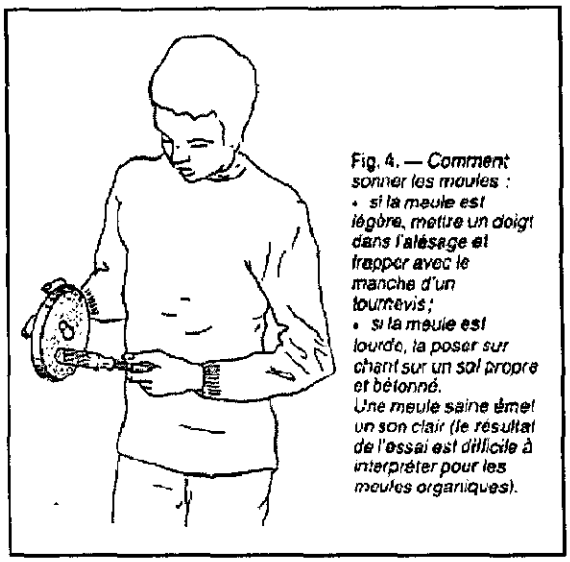


Figure 2-3 Comment sonner les meules [TOBELEM, W. (1988)]

Montage

- choisir la bonne meule; une meule trop dure pour le matériau chauffe à l'extrême et la meule se détériore rapidement par carbonisation (souvent les opérateurs inexpérimentés pense que la meule est trop molle dans une situation semblable)
- s'assurer que la vitesse maximale d'utilisation indiquée sur la meule est inférieure ou égale à celle de la machine.
- vérifier visuellement l'aspect des meules (absence d'éclats)
- ne pas oublier les buvards entre meule et flasques
- respecter les valeurs préconisées pour les couples de serrage des vis et des écrous
- vérifier attentivement la compatibilité des diamètres des arbres ou des moyeux et des alésages des meules (SI vs IMP)
- équilibrer les meules munies de leurs flasques au moyen d'une machine à équilibrer (voir figure ci-bas)
- respecter l'orientation des "meules orientées" pour assurer une meilleure utilisation

- le montage étant terminé, laisser tourner la meule à vide pendant une minute au moins. Personne ne doit se trouver devant l'ouverture du carter de protection pendant cette opération;

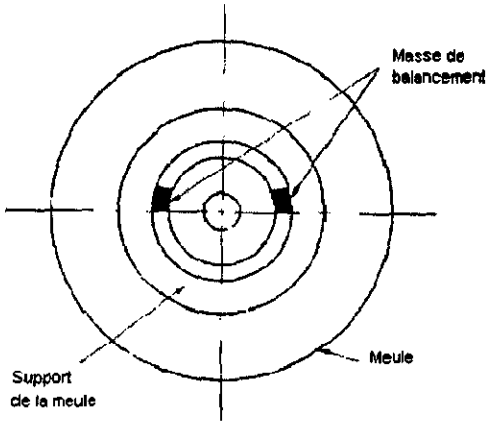


Figure 2-4 Balancement d'une meule

Opération

- balayer la surface avant de travailler pour empêcher la projection de particules.
- la vitesse maximale de rotation admissible, spécifiée par le fabricant, ne doit être dépassée en aucun cas.
- les meules doivent être logées dans des carters (gardes) assez résistants pour retenir les morceaux d'une meule qui éclate.
- contrôler la chaleur de l'opération; en commençant le travail avec une meule froide, appliquer une pression graduelle sur la surface jusqu'à ce que la meule se réchauffe. Éviter la surchauffe de la meule.
- mettre la bonne pression; quand les grains ne reçoivent pas une pression suffisante pour mordre dans le matériau, il y a de la friction qui crée de la chaleur et détériore la meule (on peut choisir une meule plus fine pour réduire la surface de contact).
- toujours diriger la meule du corps vers l'extérieur.
- garder le corps et les mains au chaud et au sec.

La vitesse maximale autorisée pour les meules de meuleuses portatives est de 80 m/s. Ainsi, les vitesses maximales en RPM sont les suivantes:

Diamètres standards	RPM maximum
4 ½ "	13300
5 "	12000
7 "	8600
9"	6700

2.2.9 Manufacturiers de meules

Il existe sur le marché beaucoup de fabricants de meules pour différents types d'applications. Les principaux sont les suivants:

- Tyrolit
- Flexovit
- Jet ltee
- Walter
- United Abrasives, inc.
- etc.

2.3 Caractérisation des meuleuses portatives

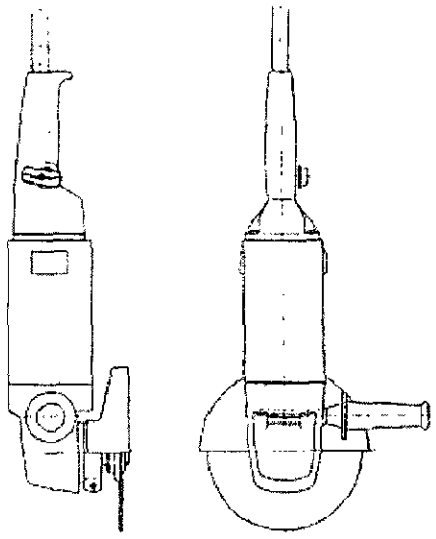
2.3.1 Définition

Une meuleuse portative est un outil tournant à haute vitesse sur lequel vient se fixer la meule. La meuleuse est constituée d'un moteur, d'un système de transmission et d'un arbre de sortie. Elle est généralement munie de deux poignées pour permettre l'opération manuelle de l'outil.

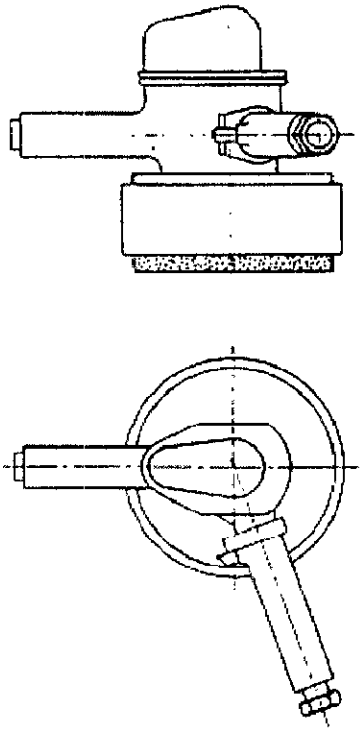
2.3.2 Les différents types de meuleuses portatives

On distingue trois familles de meuleuses portatives: les meuleuses à angle, les meuleuses verticales et les meuleuses droites.

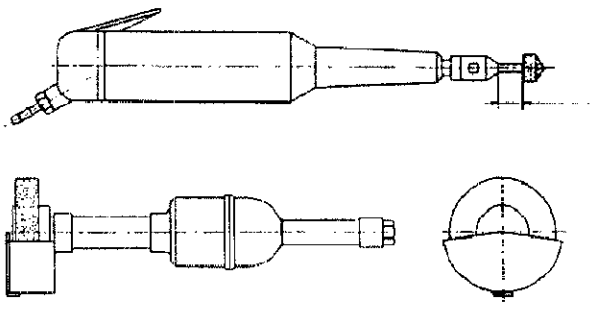
Meuleuse à angle:

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	CARACTÉRISTIQUES
	Utilisations: ébarbage, ébavurage, découpage Meules: meules à centre déporté, plate, soucoupe

Meuleuse verticale:

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	UTILISATIONS
	Utilisations: surfaçage, polissage Meules: meules coupe et à centre déporté

Meuleuse droite:

REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE	UTILISATIONS
	Utilisations: meulage dans les endroits contiguës, meulage de soudure dans les tuyaux Meules: meules cylindriques, coniques, petits disques

2.3.3 Constitution d'une meuleuse

Une meuleuse peut se décomposer en plusieurs systèmes. Ces systèmes sont illustrés sur la figure suivante et décrit dans les lignes qui suivent.

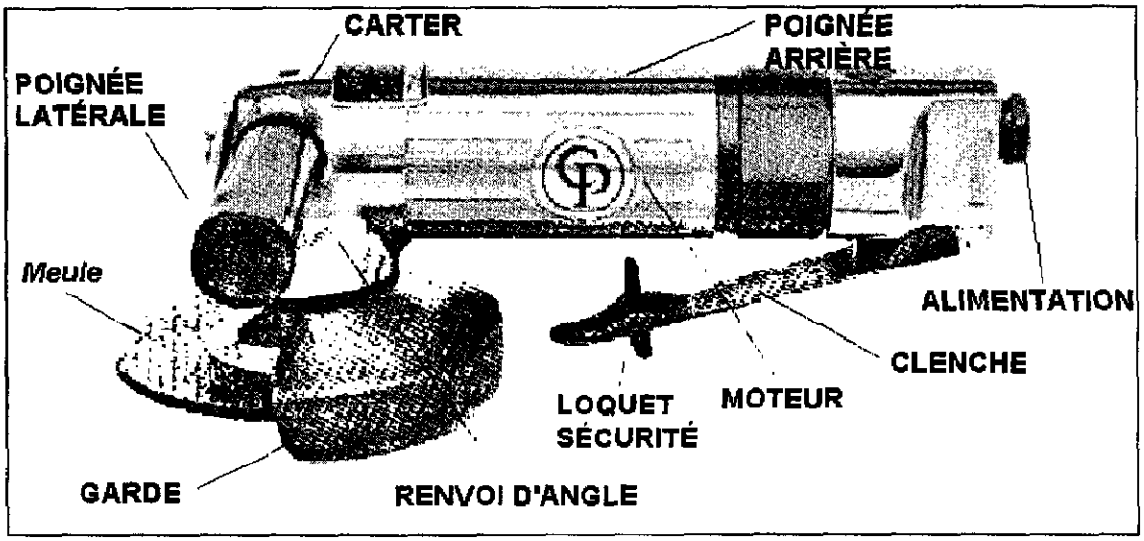


Figure 2-5 Description des principaux systèmes d'une meuleuse à angle.

1. Alimentation

   L'alimentation de la meuleuse peut se faire soit par un câble électrique, soit par un tuyau d'air comprimé. Pour les meuleuses électriques, un système électronique de régulation et de conditionnement du signal électrique est inséré dans la poignée arrière ou à l'arrière du carter. Pour les meuleuses pneumatiques, le conditionnement de l'air se fait en amont du tuyau d'alimentation et est constitué d'un régulateur de pression, d'un séparateur d'eau, d'un filtre et d'un système de lubrification si nécessaire.

2. Moteur

   Il existe trois types de motorisation: électrique, pneumatique ou dans certain cas à combustion interne. Les moteurs à explosion sont utilisés dans la construction pour la coupe du béton, de la pierre et de l'asphalte. Les moteurs électriques et

pneumatiques trouvent leurs applications dans le meulage et le polissage de l'acier, du plastique, du bois, etc.

Pour des raisons de sécurité aux chocs électriques (sectionnage de câbles), le pneumatique est utilisé sur des postes de travail fixes où les meuleuses sont utilisées de manière continuelle (atelier de réparation automobile, forge, atelier de soudage, chaudronnerie,...). L'énergie électrique est utilisée dans les petits ateliers où les meuleuses servent de manière irrégulière.

Les moteurs à combustion interne sont généralement des deux temps de petite cylindrée. Les moteurs électriques sont quasi-invariablement des moteurs universels pour obtenir des vitesses de rotation élevées et un couple important. Les moteurs pneumatiques sont très souvent des pistons tournant à palettes.

3. Renvoi d'angle

Le système de renvoi d'angle à 90 degrés est constitué de deux engrenages et n'existe que sur les meuleuses à angle. Pour les meuleuses droites et verticales, la meule est directement montée en bout d'arbre.

4. Carter

Le carter de la meuleuse est en plastique pour les moteurs électriques toujours à cause des problèmes de sécurité électrique. Dans le cas des meuleuses pneumatiques, il est tout en métal. La tête de meuleuse (partie comprenant le renvoi d'angle) est toujours en acier de façon à pouvoir résister aux efforts imposés sur les roulements à billes par la force exercée pendant le meulage et à résister aux chocs.

5. Poignées de maintien (latérale et arrière)

   Les poignées de maintien sont à angle droit pour les meuleuses verticales et les meuleuses à angle. Elle sont dans l'axe de rotation dans le cas des meuleuses droites.

   Pour les meuleuses à angle, la poignée latérale est vissée à droite ou à gauche de la tête de meuleuse suivant l'opérateur. Pour les petites meuleuses de faible puissance (meuleuses électriques), il n'y a pas de poignée arrière, la meuleuse est maintenue directement par le carter. Les meuleuses verticales ont toujours deux poignées de maintien. Les meuleuses droites ont une ou deux poignées suivant leur taille.

6. Garde

   Toutes les meuleuses sont livrées avec un garde semi-circulaire couvrant au moins la moitié de la meule. Le garde empêche les étincelles (copeaux incandescents) d'être projetés dans toutes les directions et protège l'opérateur des brûlures. Les dimensions de ces gardes sont régit par des normes et/ou des recommandations.

7. Meule

   Voir description de la section 2.2

2.3.4 Les manufacturiers

Tout comme pour les meules, il existe de nombreux manufacturiers de meuleuses. L'équipe du GAUS a envoyé environ 150 demandes d'informations et de renseignements auprès des manufacturiers. À ce jour, 12 réponses leur sont parvenues, dont 4 plus ou moins positives:

- **Air Turbine** (US): fabricant de mini-meuleuses portatives pneumatiques utilisant des turbines comme motorisation. Ces moteurs permettent des vitesses de rotations de 30000 RPM et plus, générant des niveaux de bruit inférieurs à 78 dB(A).

Il est un peu dommage qu'Air Turbine soit spécialisé dans les mini-meuleuses, car le domaine d'activité qui nous concerne est celui des «grosses» meuleuses portatives de type industriel. Néanmoins, la solution «turbine» est aussi utilisée par la société George Renault (France) pour fabriquer des meuleuses à angle et des meuleuses droites équipées de turbines pour des raisons de bruit principalement.

- **Walter** (Allemagne): «la Cadillac de la meuleuse électrique». C'est ainsi que sont surnommées les meuleuses Walter (qui fabrique aussi des meules). La lettre reçue montre un intérêt pour notre étude et trois éléments concernant le bruit et les vibrations sont mentionnés:

- grâce aux tolérances sévères, les meuleuses vibrent moins;
- Walter fabrique des meules flexibles moins bruyantes;
- leur fabrique de meules subventionne une étude dans une université Européenne concernant le bruit.

- **Carborundum Abrasives North America** (US): Cette compagnie n'a pas fait d'étude sur le bruit des meules et nous réfère à leur compagnie mère: **Norton.** Mais il semble que le «Grinding Wheel Institute» ait démarrer une étude sur le sujet.

- **Atlas Copco** (Suède): La compagnie à mis en place une ligne d'outils portatifs pneumatiques ergonomiques «Ergoline», avec le problème de bruit et surtout de vibrations en tête de liste (vidéo et abondante documentation à l'appui). Atlas Copco vient de développer une toute nouvelle meuleuse «Turbo grinder» (commercialisation au printemps 95) spécialement développée pour réduire le bruit et les vibrations. Atlas Copco est tellement sure de son produit, qu'il en a donner un modèle gratuitement à l'équipe du GAUS. La machine comprend:

- un nouveau type de motorisation pneumatique (une turbine) pour la légèreté, la performance et les niveaux de bruit peu élevés.
- un système d'auto-équilibrage du débalancement de la meule pour la réduction des vibrations.
- La meuleuse résultante est beaucoup plus petite, plus légère et plus compacte avec des niveaux de bruit et de vibrations en dessous des normes européennes et des performances d'une meuleuse plus grande (selon la documentation technique).

Lors de notre revue de la littérature, différents catalogues de manufacturiers ont été étudiés attentivement et voici la liste de ceux que nous avons répertorié:

- Walter
- Makita
- Atlas Copco
- Hitachi Power Tools
- Black & Decker
- Milwaukee
- Chicago Pneumatic
- Universal Power Canada
- DEPRAG Pneumatic Tools
- Ingersoll-Rand
- CIA
- Air Turbine Tools
- Georges Renault

Projet de recherche sur le procédé de meulage

ANNEXE D

BRUIT ET VIBRATIONS

GAUS, Université de Sherbrooke

Sommaire

Cette présente annexe est le compte rendu des recherches effectuées par le GAUS dans le cadre du projet intitulé « analyse des risques et étude des besoins relatifs au procédé dans le cadre d'une étude de la conception du procédé de meulage dans l'industrie lourde en regard de la SST ».

L'étude présente l'identification des principales sources de bruit et de vibration du procédé de meulage, la méthode qui a permis de les hiérarchiser et l'analyse des sources principales, ainsi que la caractérisation de la force dynamique entrant en jeu.

On trouve aussi des pistes de solutions très prometteuses notamment pour la réduction des vibrations transmises aux membres supérieurs.

Enfin, l'étude se termine par un cahier des charges précis à l'usage de manufacturiers de meules et de meuleuses indiquant les contraintes à remplir pour limiter la génération et de vibration, ainsi que les réductions associées possibles.

Table des matières

SOMMAIRE I

TABLE DES MATIÈRES II

CHAPITRE 1: LES SOURCES DE BRUIT SUR LES MEULES ET LES MEULEUSES 1

1- NIVEAUX DE BRUIT TYPIQUES 1
2- ORGANIGRAMME DE GÉNÉRATION DU BRUIT ET DES VIBRATIONS 1

CHAPITRE 2: ÉTUDE DES SOURCES DE BRUIT DU PROCÉDÉ DE MEULAGE 3

1- LA MEULEUSE 3
1-2 L'ÉQUILIBRAGE 4
1-3 L'ÉCHAPPEMENT (MOTEUR PNEUMATIQUE À PALETTES) 4
1-4 LA MOTORISATION PNEUMATIQUE 5
1-5 LA MOTORISATION ÉLECTRIQUE 6
1-6 RÉCAPITULATIF 7
2- CARACTÉRISATION DE LA FORCE DE MEULAGE 8
2-1 FORCE DE COUPE, GRANULOMÉTRIE ET LIANT 8
2-2 SPECTRE DE BRUIT D'UNE MEULE EN COUPE 8
2-3 IMPACTS DES GRAINS ABRASIFS SUR LA PIÈCE 9
2-4 ORIGINE DU SPECTRE DE RAIES 10
2-5 FORCE DE COUPE ET TAUX D'ENGAGEMENT 12
2-6 USURE DE LA MEULE ET FORCE DYNAMIQUE DE COUPE 13
2-7 MESURE DE LA FORCE DE COUPE 14
2-8 RÉCAPITULATIF 21
3- LES MEULES 22
3-1 MEULES POUR MEULEUSES DROITES 22
3-2 MEULES À BOISSEAU POUR MEULEUSES VERTICALES 22
3-3 LES MEULES PLATES POUR MEULEUSES À ANGLE 23
3-4 RÉCAPITULATIF 30

CHAPITRE 3 : ÉTUDE DES SOURCES DE VIBRATIONS DU PROCÉDÉ DE MEULAGE 31

I. GÉNÉRALITÉS 31

I.1 CALCUL DU NIVEAU D'EXPOSITION 31

I.2 ÉQUILIBRAGE DES MACHINES TOURNANTES 33
I.3 MASSE DYNAMIQUE DU SYSTÈME MAIN/BRAS 35
II. VIBRATIONS À VIDE DES MEULEUSES À DISQUE 36
II.1 MONTAGE EXPÉRIMENTAL 36
II.2 NIVEAUX DE VIBRATION ET ÉQUILIBRAGE 37
II.3 INFLUENCE DE LA PRISE EN MAIN 40
II.4 CLASSE D'ÉQUILIBRAGE REQUISE 41
II.5 AJUSTEMENT DE MONTAGE REQUIS 41
III. VIBRATIONS EN CHARGE DES MEULEUSES PORTATIVES 43
III.1 MONTAGE EXPÉRIMENTAL 43
III.2 RAPPEL SUR LA FORCE DE COUPE 44
III.3 NIVEAUX DE VIBRATION ET TOLÉRANCES GÉOMÉTRIQUES 44
III.4 TOLÉRANCES MAXIMALES REQUISES 46
III.5 USURE DE LA MEULE - CONCLUSION 47
IV AUTRES MOYENS DE RÉDUCTION DES VIBRATIONS À VIDE ET EN CHARGE 47
IV.1 MOMENT D'INERTIE DE LA MEULEUSE 48
IV.2 POIGNÉE ANTI-VIBRATILE 52

CHAPITRE 4 : CAHIER DES CHARGES POUR LA RÉDUCTION DU BRUIT ET DES VIBRATIONS DU PROCÉDÉ DE MEULAGE 56

I- RECOMMANDATIONS POUR LA RÉDUCTION DU BRUIT ET DES VIBRATIONS - CAHIER DES CHARGES 56
II- RÉDUCTION GLOBALE RÉALISABLE 57
III- RENCONTRE DES OBJECTIFS 58

CHAPITRE 5 : CONCLUSION GÉNÉRALE 59

BIBLIOGRAPHIE 61

CHAPITRE 1: LES SOURCES DE BRUIT SUR LES MEULES ET LES MEULEUSES

1- Niveaux de bruit typiques

Il existe trois sources de bruit principales possibles en charge :

- le meule,
- la meuleuse
- la pièce meulée.

À vide, la meuleuse est la seule source de bruit possible.

Suivant les conditions de mesure, c'est une de ces trois sources qui est prépondérante. Il est donc difficile de donner des niveaux de bruit typiques du procédé de meulage. Si la pièce rayonne, les niveaux peuvent être très importants, notamment dans le cas de pièce légères ou de petite taille. Dans le cas de pièces lourdes, le rayonnement devient négligeable (coque de bateau).

Pour les chiffres ci-dessous, on considère que la pièce est non-rayonnante :

Niveaux de pression acoustique en charge à l'oreille :	de 95 à 110 dB(A)
Niveaux de pression acoustique à vide à l'oreille :	de 80 à 95 dB(A)

2- Organigramme de génération du bruit et des vibrations

Les quatre organigrammes suivants décrivent les sources et les modes de génération du bruit et des vibrations du procédé de meulage. Ces diagrammes sont assez exhaustifs et montrent l'interaction entre les différents paramètres

En résumé, les principales sources de bruit sont :

<u>La meuleuse :</u>

- la motorisation :	-électrique :	*type de moteur*
		ventilation
	- pneumatique :	*type de moteur*
		échappement
	- équilibrage de l'ensemble mobile	
- la transmission :	- type de paliers	
	- type d'engrenages	
	- ajustements	

La meule :

- le disque (dimension, composition, ...) excité par la force de coupe

La pièce :

_ la pièce meulée (dimensions, composition, ...) excitée par la force de coupe

Les principales sources de vibrations sont :

La meuleuse :

- la motorisation : -équilibrage
  - inertie
  - équilibrage de l'ensemble mobile
- la transmission :
  - type de paliers
  - type d'engrenages
  - ajustements

La meule :

- le disque excité par la force de coupe
- équilibrage de la meule

La pièce :

- impédance d'entrée de la pièce meulée au point de meulage

Il y a donc treize sources de bruit possibles dans le procédé de meulage.

CHAPITRE 2: ÉTUDE DES SOURCES DE BRUIT DU PROCÉDÉ DE MEULAGE

1- La meuleuse

les sources de bruit possibles dénombrées au Chapitre 1 sont:

1. la motorisation
2. la ventilation (pour les moteurs électriques)
3. l'échappement (pour les moteurs à air comprimé)
4. l'équilibrage
5. le type de paliers
6. le type d'engrenages
7. les ajustements

À partir de meuleuses existantes et disponibles au laboratoire da GAUS, il est possible d'identifier clairement les sources de bruit dominantes.

1-1 Les pièces mobiles (5,6,7)

Pour étudier l'influence de ces paramètres, comparons le bruit à vide de meuleuses neuves (faible usure, ajustements d'usine) par rapport à des meuleuses usagées (provenant du chantier naval MIL Davie dans un état d'usure très avancé).

Meuleuses	Niveau de pression acoustique moyen à 1 mètre
pneumatique à angle neuve	85 - 87 dB(A)
pneumatique à angle usagée	87 - 90 dB(A)
pneumatique verticale neuve	92 dB(A)
pneumatique verticale usagée	93 - 95 dB(A)

L'état d'usure ne modifie pas de manière significative le niveau de bruit à vide, ceci malgré une usure très avancée des meuleuses MIL Davie. Lorsqu'on observe ces meuleuses, on constate que les jeux fonctionnels sont devenus excessifs (jeux dans les roulements, roulements à bille détériorés, jeux axiaux des arbres, jeux angulaires dans les engrenages de renvois d'angle, ...). Ces jeux dus à l'usure ne se retrouvent pas évidemment sur les meuleuses neuves. Comme les niveaux de bruit sont similaires quelque soit le niveau d'usure, les désajustements ne constituent pas une source de bruit à vide dominante.

D'autre part on constate que les meuleuses à angle sont globalement plus silencieuses que les meuleuses verticales, alors que celles-ci comportent deux engrenages à 45° qui sont une source de

bruit possible. Les engrenages de renvoi d'angle ne constituent pas non plus une source de bruit à vide.

Le tableau de mesure ci-dessus et les constatations faites sur les meuleuses existants prouvent que *l'ensemble des pièces mobiles d'une meuleuse n'est pas une source de bruit du procédé de meulage.*

1-2 L'équilibrage

L'équilibrage de l'ensemble mobile dépend du balourd total, de l'alignement, ... des pièces tournantes. On peut raisonnablement faire l'hypothèse que la meule constitue la source la plus importante de déséquilibrage d'une meuleuse (à cause de sa masse, du rayon de giration et de ses tolérances de fabrication). Le tableau suivant compare le bruit de différentes meuleuses avec et sans meules.

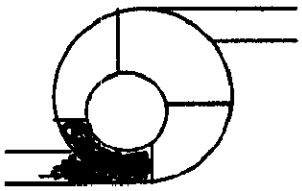
Meuleuses	**Niveau de pression acoustique moyen à 1 mètre**
pneumatique à angle neuve **sans** meule	86 dB(A)
pneumatique à angle neuve **avec** meule	86 dB(A)
pneumatique verticale usagée **sans** meule	92 dB(A)
pneumatique verticale usagée **avec** meule	93 dB(A)

Les mesures avec et sans meules ne font pas apparaître de différences significatives sur les niveaux de bruit à vide.

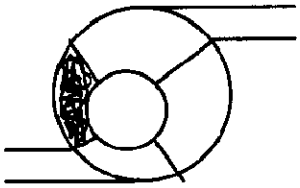
L'équilibrage ne constitue pas une source de bruit significative sur le bruit rayonnée par les meuleuses.

1-3 L'échappement (moteur pneumatique à palettes)

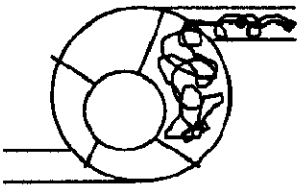
Dans le cas des moteurs pneumatiques à palettes (la technologie la plus utilisée pour les meuleuses pneumatiques), le bruit à vide possède une raie fréquentielle très marquée correspondant au nombre de tours par seconde multiplié par le nombre de palettes du moteur.
Cette raie provient du mécanisme d'entraînement du moteur. Le volume entre chaque palette constitue une chambre de décompression qui augmente de volume lors de la rotation. Quand le volume est maximum, la chambre arrive en face du trou d'échappement et l'air est éjecté.



Admission



Décompression



Échappement

Le cycle est répété quatre fois par tour (pour des moteurs à palettes), c'est l'origine de la raie à vide des moteurs à palettes. De plus, comme l'échappement est un phénomène non linéaire, des harmoniques de cette raie apparaissent. Ce bruit à vide est le bruit dominant dans le cas des moteurs pneumatiques à palettes.

Les mesures suivantes montrent l'effet d'un silencieux d'échappement sur le bruit des moteurs pneumatiques à palettes.

Meuleuses	**Niveau de pression acoustique moyen à 1 mètre**
pneumatique verticale neuve **sans** silencieux	92 dB(A)
pneumatique verticale neuve **avec** silencieux	79 dB(A)

Il est clair que la source de bruit dominante se situe à l'échappement. La décompression subite de l'air comprimé quand la palette limitant le volume de la chambre passe en face de l'orifice plusieurs fois par tour, est la source directe qui génère ce bruit. L'échappement est le lieu « géographique » où est émis le bruit, mais ce n'est pas la source de bruit directe.

1-4 La motorisation pneumatique

Comme il est expliqué ci-dessus, le bruit à vide des meuleuses pneumatiques dépend très fortement du principe de fonctionnement du moteur pneumatique à palettes. Les récents développements en matière de motorisation pneumatique ont fait apparaître une nouvelle technologie, il s'agit des turbines. Si cette technologie est connue depuis longtemps, notamment en hydraulique, elle n'a pas encore été employée en pneumatique. Le principe de la turbine diffère du moteur à palettes par le fait que la décompression se fait de manière continue autour du rotor. Des pales disposées autour du rotor assurent la rotation, mais il n'y a pas de cycle Admission/Décompression/Échappement.

Le tableau suivant illustre l'efficacité d'une telle technologie au niveau du bruit

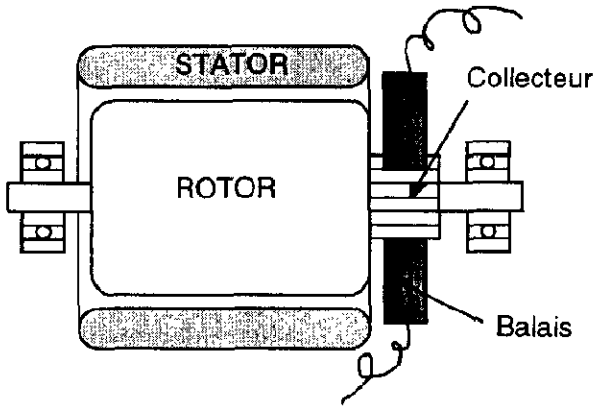
Meuleuses	**Niveau de pression acoustique moyen à 1 mètre**
pneumatique droite neuve **à turbine sans** silencieux	65 dB(A)
pneumatique verticale neuve **à palettes avec** silencieux	79 dB(A)

On constate que la meuleuse équipée d'une turbine est beaucoup plus silencieuse (-14 dB) qu'une meuleuse équipée d'un moteur à palettes et d'un silencieux (à puissance équivalente même si les meuleuses sont différentes).

Cette dernière expérimentation permet de prouver hors de tout doute que la source de bruit largement dominante d'une meuleuse traditionnelle est la motorisation.

1-5 La motorisation électrique

Les meuleuses équipées de moteurs électriques utilisent, dans la majorité des cas, des moteurs universels ventilés. Tout comme les moteurs pneumatiques à palettes, ces moteurs électriques asynchrones sont bruyants par nature. Le bruit des moteurs universels provient du frottement des balais de graphites sur le collecteur du rotor.



Ces moteurs sont utilisés à cause du couple important qu'ils sont capables de fournir ainsi que la capacité d'obtenir une vitesse de rotation facilement contrôlable.

Il existe une technologie de remplacement pour les moteurs électriques pour meuleuses. Les moteurs électriques triphasés synchrones n'ont pas la caractéristique d'avoir un point de contact entre de rotor et le stator, tous les bruit de frottement sont alors éliminés. Ces moteurs sont utilisés depuis longtemps pour certaines meuleuses électriques dites « hautes fréquences » (car le courant qui les alimente est cadencé à 300 Hz au lieu du 60 Hz pour des raisons de couple maximum).

Mais les mesures que nous avons pu faire à ce jour ne nous permettent pas de conclure quand à la réduction de bruit qu'il est possible d'obtenir grâce à cette technologie. Les mesures de bruit que nous avons effectuées chez l'unique fournisseur de ces outils au Québec (FEIN) ont montrées que le bruit de la ventilation de ces meuleuses est suffisamment élevés pour obtenir des niveaux de bruit du même ordre que les meuleuses électrique à moteurs universels. Néanmoins, les essais réalisés au laboratoire du GAUS sur le bruit des meuleuses seules ont montrés que l'utilisation d'un moteur asynchrone alimenté par le contrôleur de vitesse triphasé permet de faire tourner des meules avec un niveau de bruit d'environ 70 dB(A) quand on supprime le ventilateur.

1-6 Récapitulatif

Hiérarchisation des sources:

MEULEUSES PNEUMATIQUES:

1. Sources principales: motorisation
2. Sources secondaires: ∅
3. Sources mineures: toutes les autres

MEULEUSES ÉLECTRIQUES:

1. Sources principales: motorisation
2. Sources secondaires: ventilation
3. Sources mineures: toutes les autres

Solutions potentielles:

MEULEUSES PNEUMATIQUES:

1. Utiliser des turbines pneumatiques
2. Utiliser des silencieux d'échappement adapté pour les moteurs à palettes

MEULEUSES ÉLECTRIQUES:

1. Utiliser des moteurs synchrones triphasés
2. Utiliser des ventilateurs de refroidissement plus silencieux (cage d'écureuil,...)

Niveau de bruit à vide obtenable

Dans l'état actuel des connaissances, il est possible d'obtenir des outils de meulage pneumatiques ou électriques dont le niveau de bruit à vide à un mètre est inférieur ou égal à 70 dB(A).
Notons que ces recommandations auront une incidence sur l'exposition des travailleurs seulement dans le cas où la meule et la pièce meulée ne sont pas des sources de bruit principales comme c'est le cas chez MIL Davie par exemple.

2- Caractérisation de la force de meulage

Avant d'aborder le bruit des meules et des pièces meulées, il faut caractériser la force de coupe du procédé de meulage. Cette force de coupe est importante pour des raisons pratiques de rendement du procédé, mais aussi pour la compréhension mécanisme de génération du bruit en coupe de la meule et de la pièce meulée, car c'est cette force de coupe qui excite directement à la fois la meule et la pièce meulée.

2-1 Force de coupe, granulométrie et liant

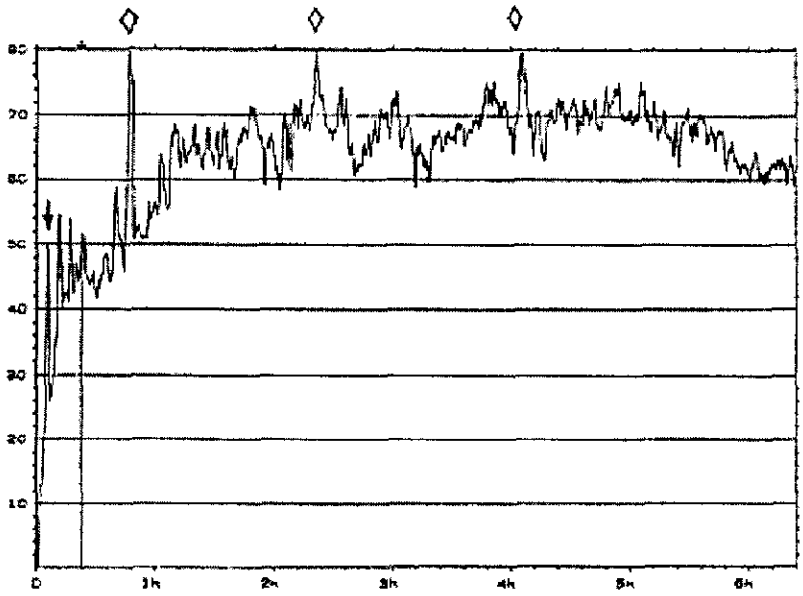
Des tendances ont pu être mises en évidence en étudiant le niveau de bruit en coupe du meulage en fonction de la granulométrie des meules et de la dureté du liant [1]. Ces tendances sont:

Bruit en coupe ↑	Dureté du liant ↑
Bruit en coupe ↑	Granulométrie ↑

Il semble que la force de coupe soit d'autant plus importante que la granulométrie est grossière et que la dureté du liant est grande.

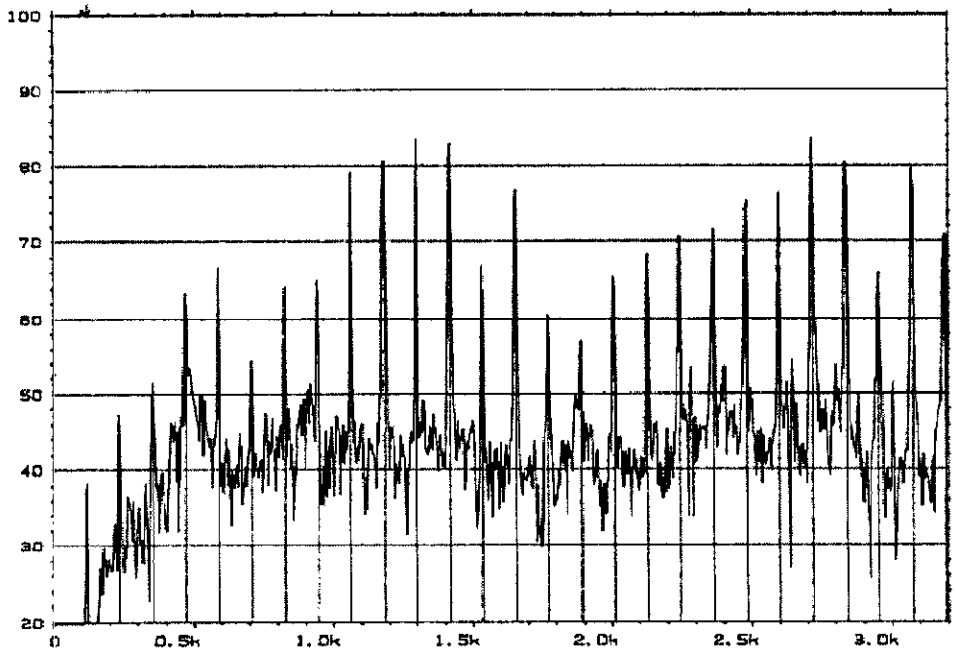
2-2 Spectre de bruit d'une meule en coupe

Le spectre de bruit suivant illustre un bruit typique de meulage (meuleuse pneumatique + meule plate de 7 pouces):



Les trois premières raies (↓) correspondent à la vitesse de rotation et à ses deux premiers harmoniques. Les trois raies (◊)correspondent au bruit de l'échappement. Quand on utilise les outils pneumatiques, la vitesse de rotation peut très difficilement être maintenue constante à cause des variations de la charge appliquée sur la meule. Si la fréquence de rotation est de 133 Hz (soit 800 RPM) avec un glissement de ± 5 Hz (soit 4 %), un harmonique d'ordre n varie de $\pm n \times 5$ *Hz* (soit 50 Hz pour $n=10$). Cette variation fréquentielle fait qu'il est quasiment impossible de voir apparaître les harmoniques de la vitesse de rotation, l'allure du spectre change en fonction de la résolution choisie pour l'analyse spectrale.

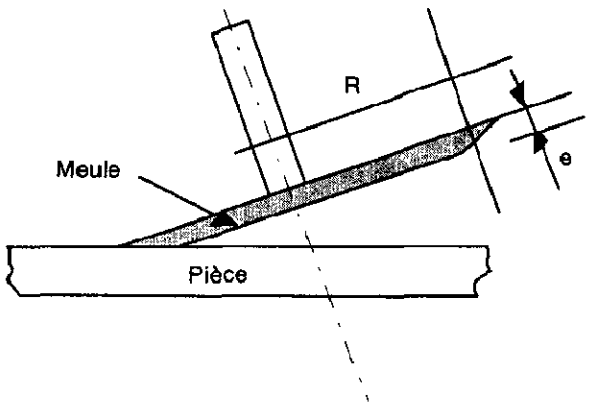
Le spectre de bruit ci-dessous représente le bruit typique de meulage **quand la vitesse de rotation est maintenue constante** pendant la coupe.



Dans ce cas, on voit nettement que le spectre de bruit en coupe change de forme. Il s'agit maintenant d'un spectre de raies très marquées sur toute la plage de fréquence d'intérêt. Chacune des raies est un harmoniques de la fréquences de rotation de la meule.
Cette constatation est fondamentale, car l'origine de ces pics est directement liés à l'excitation de la meule. En fait, la présence de ce spectre acoustique de raies est directement due à une excitation de même nature. Comme la fréquence fondamentale est la fréquence de rotation, la force dynamique de coupe est liée à un phénomène dépendant de la rotation.

2-3 Impacts des grains abrasifs sur la pièce

La première idée est de regarder les impacts générés par les grains d'abrasifs sur la pièce. Comme chaque grain agit comme la dent d'une fraise, on peut imaginer que ce sont ces impacts qui génèrent la force de coupe. La figure ci-dessous représente le procédé de meulage:



Le nombre d'impacts par seconde *Ni* des grains d'abrasifs sur la pièce peut se calcule de la manière suivante:

$$Ni = d \,.\, RPM \,/\, 60 \,.\, (2\pi R) \,.\, e \,/\, \sin(\theta)$$

avec:

d: densité de grain (grain/mm^2)
RPM: vitesse de rotation (tour/min)
R: Rayon moyen de la meule (mm)
e: épaisseur de la meule (mm)
θ: angle de meulage

Pour des valeurs typiques d'une meule de dégrossissage de 7 pouces, on a:

$d = 20{,}25 \,.\, 10^{-2}$
RPM =:8000 tr/s
$R = 89$ mm
$e = 6$ mm
$\theta = 15°$

On obtient:

$Ni = 350\,016$ impacts/seconde

En pratique, seul 10 à 20 % des grains entrent dans le processus de coupe. Dans ce cas, la fréquence d'impact est d'environ 35 kHz pour un meulage de dégrossissage.
Il est donc clairement prouvé la force générée par la grosseur du grain n'intervient pas sur le spectre de bruit généré par le procédé de meulage.

2-4 Origine du spectre de raies

Le seul paramètre non constant lié à la rotation que nous avons pu extraire, est la forme géométrique des meules. Comme il est expliqué au chapitre 1, les meules sont des outils moulés,

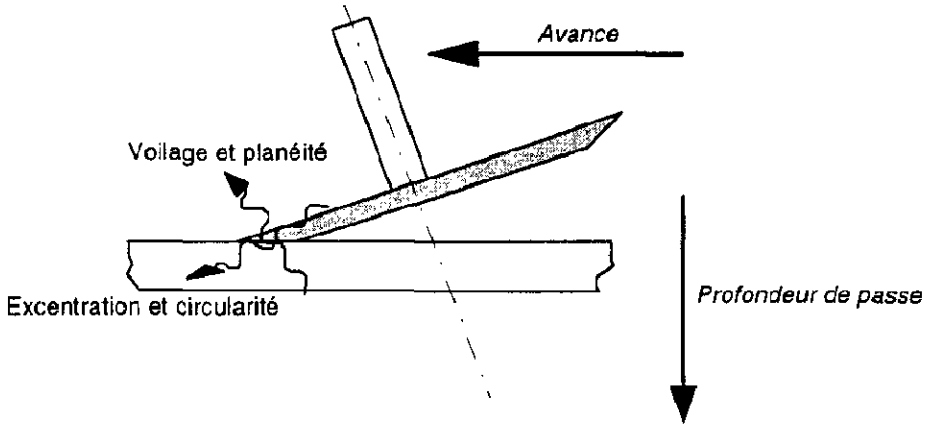
les tolérances dimensionnelles associées au moulage sont en général, assez « larges ». Les défauts de fabrication sont:

- l'excentration théorique: le centre de rotation ne coïncide pas avec le centre géométrique
- la circularité théorique: le rayon extérieur de la meule n'est pas constant
- le voilage théorique: l'axe de rotation ne coïncide pas avec l'axe de révolution géométrique de la meule
- la planéité théorique: la surface de la meule n'est pas parfaitement plane

Les défauts d'excentricité et de circularité vont entraîner un contact meule / pièce non constant sur la tranche de la meule, et les défauts de voilage et de planéité vont entraîner un contact meule / pièce non constant sur la surface de la meule.

Dans la pratique, l'excentration et la circularité théorique constitue l'excentration totale et le voilage et la planéité théorique constitue le voilage totale.

Pour évaluer l'importance de ces irrégularités sur le fonctionnement de la meule, nous allons comparer ces défauts par rapport à *l'avance par tour et la profondeur de passe.*



Si on définit les paramètres de coupe suivants:

At: avance par tour (mm)
Av: vitesse d'avance (mm/s)
Pp: profondeur de passe (mm)
Ex: excentricité totale (mm)
V: voilage total de la meule (mm)

On a: $At = Av / (RPM/60)$

Pour des valeurs typiques d'une meule de dégrossissage de 7 pouces, on a:

$Av = 50$ mm/s (vitesse très rapide)

Pp = 0.1 mm
Ex = 1.2 mm(excentricité totale mesurée)
V = 0.5 mm(voilage total mesuré)
At = 0.375 mm

On constate que:

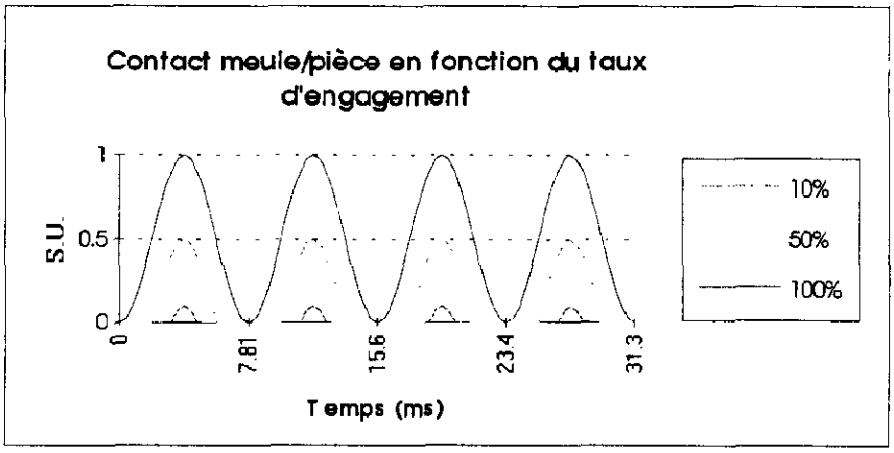
- l'avance par tour est inférieure à l'excentricité totale
- la profondeur de passe est inférieure au voilage total

Ce qui signifie que la meule n'est pas en contact permanent avec la pièce meulée. Pratiquement, il a été déterminé dans les conditions citées ci-dessus que la meule est en contact seulement 50% du temps. Dans le procédé de meulage, la meule « saute » en permanence sur la pièce.

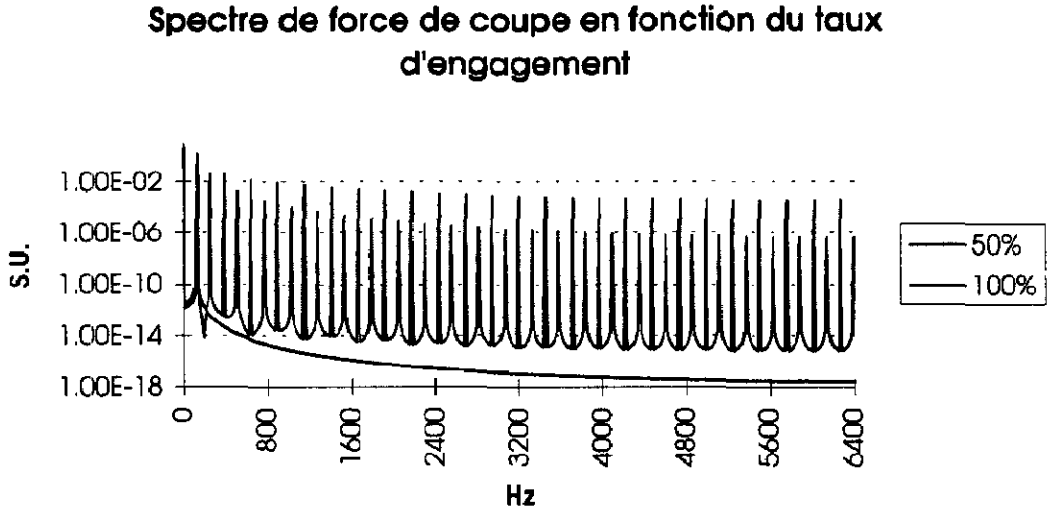
L'origine de la force dynamique de coupe provient donc fort probablement des défauts géométriques des meules.

2-5 Force de coupe et taux d'engagement

On appelle taux d'engagement le rapport entre la passe ou l'épaisseur de copeau et les défauts géométrique de la meule.
Un taux d'engagement de 100% signifie que la meule est en contact permanent avec la pièce. Un taux d'engagement de 50% correspond à une passe deux fois plus petite que le défaut de la meule. Un taux d'engagement de 10% représente un effleurement de la meule sur la pièce. (passe à reculons ou passe de finition). Le graphiques ci-dessous représentent les traces temporelle pour les trois cas de taux d'engagement cités (10%, 50% et 100%)



La force de coupe résultante dépend fortement de ces impacts sur la pièce. On peut évaluer l'influence du taux d'engagement en faisant la transformée de Fourier de ces traces temporelles. Le graphe ci-dessous montre l'effet du taux d'engagement sur le contenu fréquentiel de la force dynamique de coupe.



Le taux d'engagement joue un rôle direct sur le spectre de bruit. Si il est égal à 100%, il ne subsiste qu'un seul pic à la fréquence de rotation; le bruit est virtuellement supprimé sur tout le reste du spectre.
Ce dernier graphe prouve définitivement que les défauts de voilage et d'excentricité sont à l'origine de la force dynamique de coupe.

2-6 Usure de la meule et force dynamique de coupe

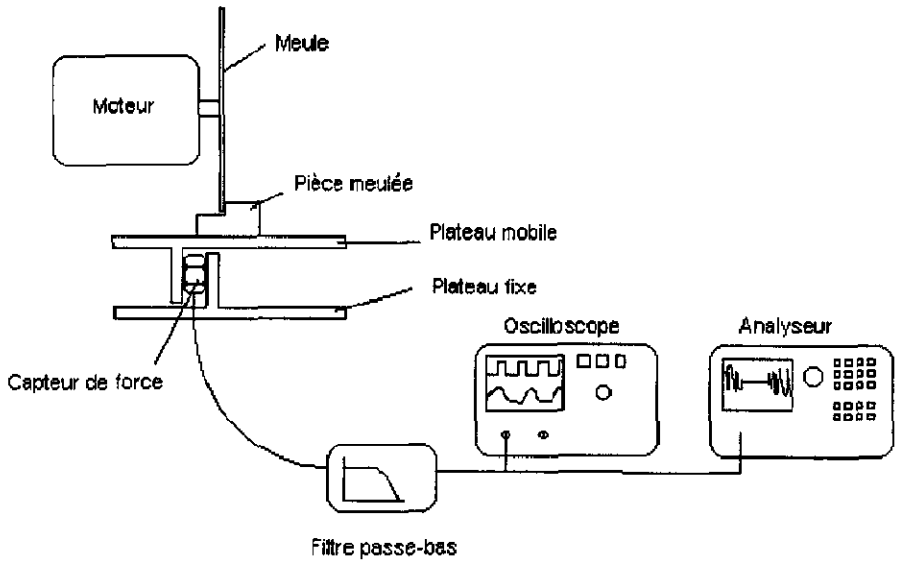
Au fur et à mesure de l'utilisation de la meule, les défauts de voilage et d'excentricité ont tendance à diminuer, car la meule se rectifie d'elle même en s'usant. Si l'opération de meulage était faite de manière parfaitement constante, l'usure de la meule tend vers un contact permanent avec la pièce. Pratiquement, on constate effectivement que le bruit de la meule diminue au bout d'un certain temps d'utilisation. Néanmoins, on a pu constater que le rattrapage de jeu ne tend pas vers zéro. Il reste toujours un voilage et une excentration résiduels dus à une utilisation non constante de la meule (pression sur l'outil, angle d'attaque, etc.) et à l'effet conjugué de l'usure en surface et en périphérie de la meule. De plus, les utilisateurs avertis confirment que certaines meules ne se rattrapent jamais et génèrent de forts niveaux de bruit et vibration du début à l'usure complète.

Par contre, si les défauts de voilage et d'excentration de la meule sont minimum dès le départ, l'usure se fera de manière plus uniforme et la meule conservera de bonne qualité de rondeur et de planéité.

2-7 Mesure de la force de coupe

Montage expérimental

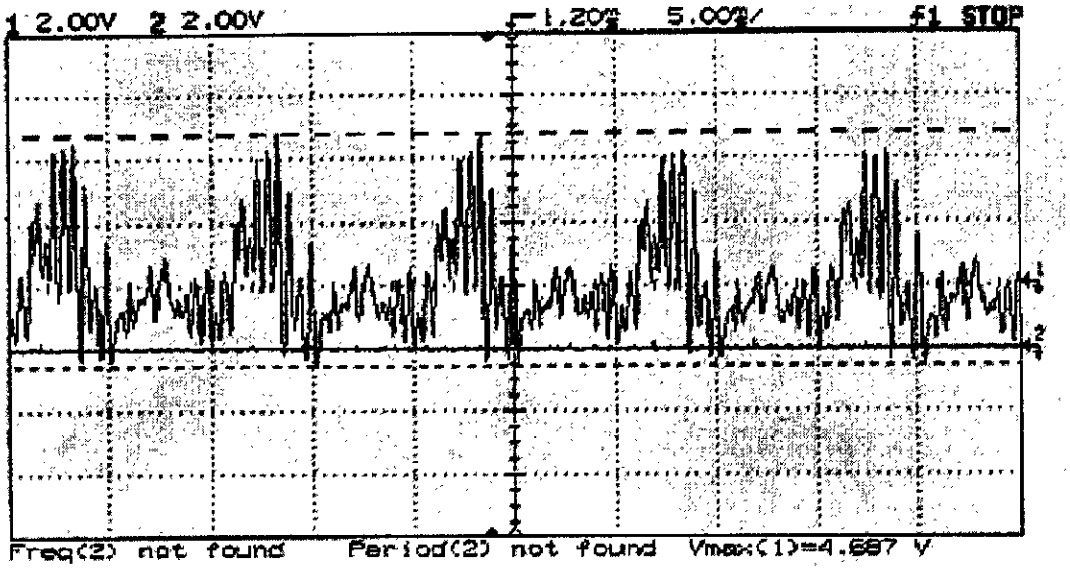
Le montage est constitué d'un moteur électrique sur lequel est monté la meule, la vitesse du moteur est paramétrable. Le dispositif de mesure de force comprend un système de deux plateaux mobiles l'un par rapport à l'autre. Le plateau supérieur supporte la pièce à meuler et guidé dans une seule direction de translation, le plateau inférieur est solidement maintenu, la force de coupe est mesurée entre ces deux plateaux par un capteur de force.



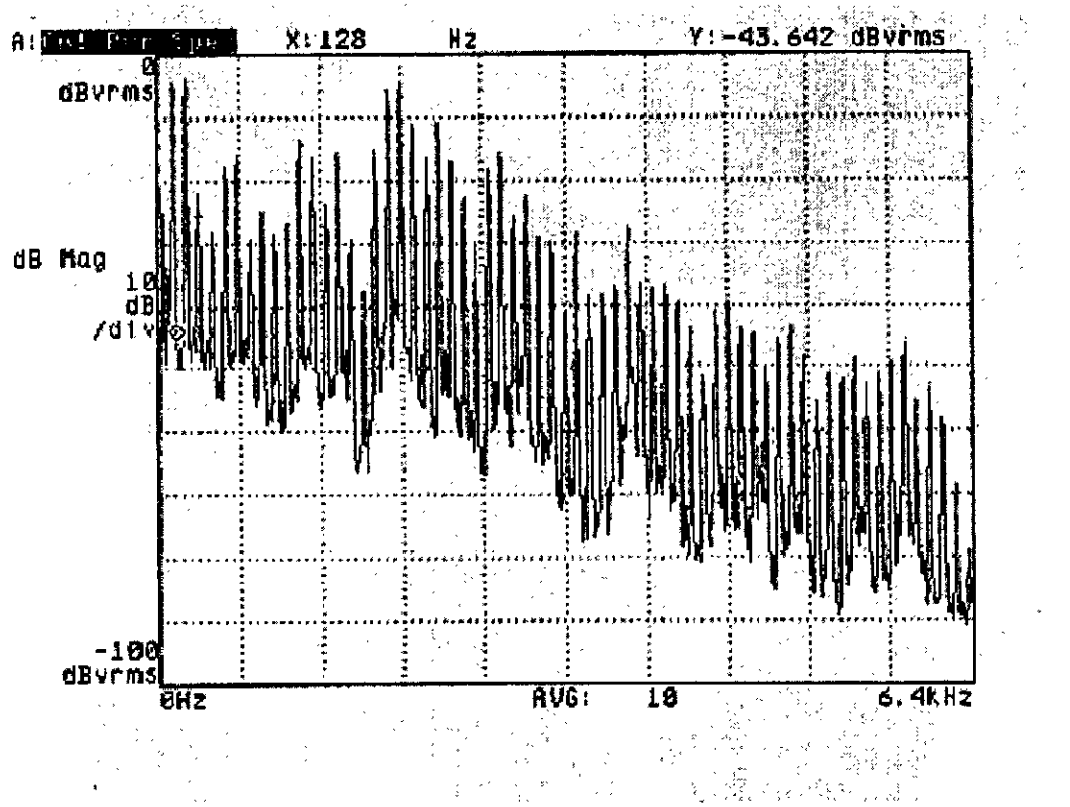
Le filtre passe-bas est utilisé pour éliminer les composantes hautes fréquences provenant à la fois de la réponse modale de la meule, des résonances du système de plateaux mobiles, des support du moteur, ...
Les mesures sont effectuées sur un oscilloscope à très haute vitesse d'échantillonnage et un analyseur de fréquence.

Résultats préliminaires

Le graphe suivant correspond à la force de coupe axiale en fonction du temps (parallèle à l'axe de la meule) pour une meule de 7 pouces tournant à 100 tr/s (6000 RPM).

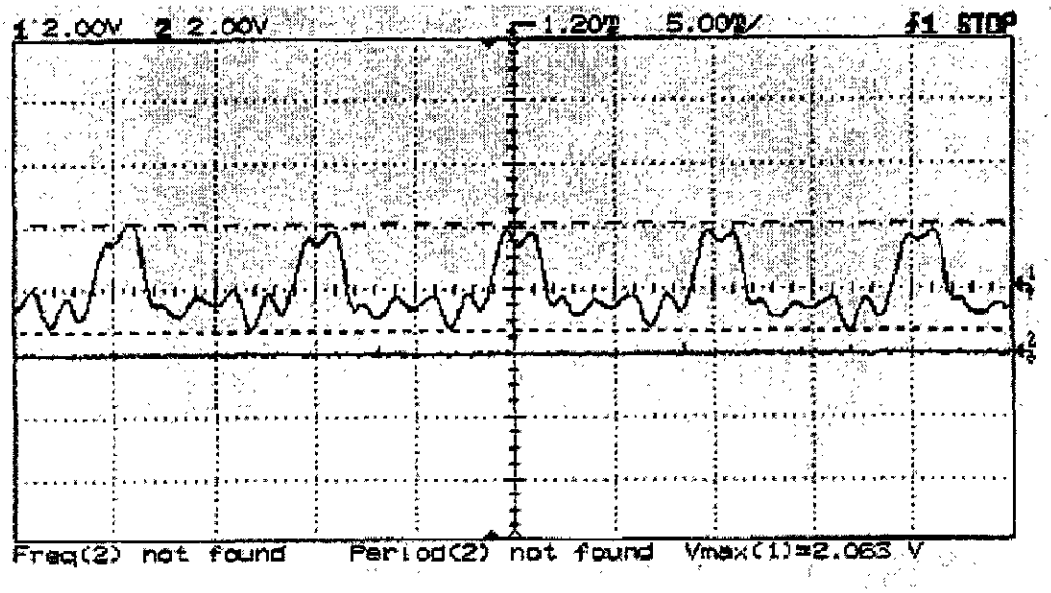


Le spectre en fréquence correspondant est le suivant :



Tel que prévu, on obtient un spectre de raie dont la fondamentale est la fréquence de rotation de la meule.
La trace temporelle fait apparaître l'aspect des sinus tronqués avec une composantes en plus haute fréquence qui se superpose.

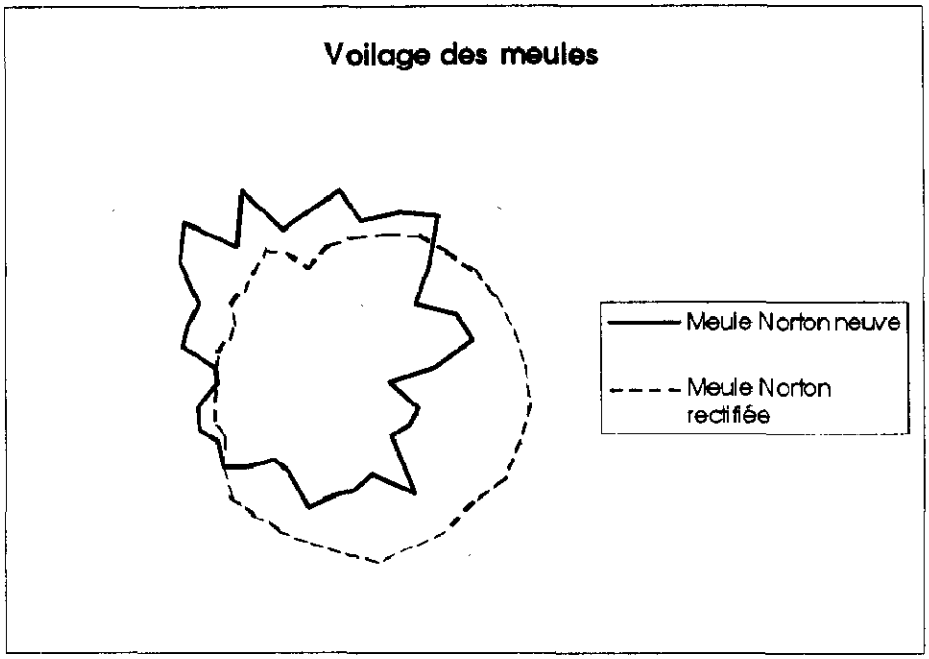
Afin de mieux observer le phénomène qui se produit à la fréquence de rotation, on a filtré le signal de force avec un filtre passe-bas dont la fréquence de coupure est 800 Hz, on obtient la trace suivante :



On voit parfaitement apparaître la forme du signal attendue. Dans le cas de meule « réelle », il y a plusieurs sinus « tronqués » car le voilage n'est pas uniformément réparti comme on fait l'hypothèse théoriquement.

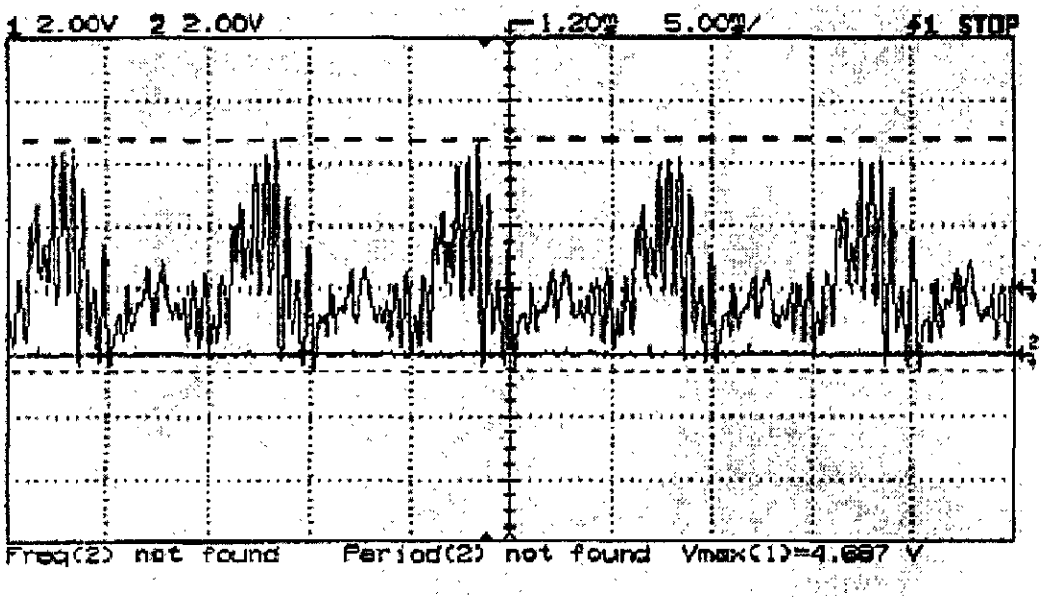
Effet du voilage sur la force de coupe axiale

La force de coupe a été mesurée pour deux meules identiques, la première n'a subit aucune modification, la deuxième a été rectifiée, c'est à dire que le voilage et l'excentration ont été rattrapés sur une machine outil. Le profil de voilage de ces deux meules sont les suivants :

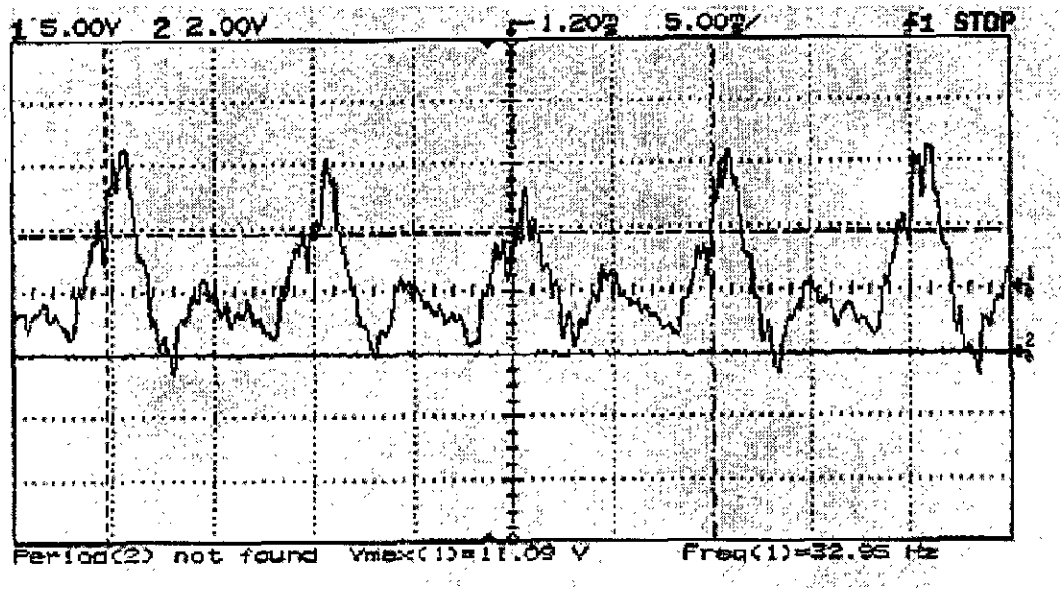


On remarque que le voilage n'est pas une quantité uniformément répartie à la périphérie de la meule non rectifiée, il s'agit plutôt d'une répartition aléatoire. La meule rectifiée ne présente pas cet aspect chaotique, par contre, on constate que la meule possède un voilage uniformément réparti. Ce voilage provient de l'excentration de montage de la meule rectifiée sur l'arbre du moteur, car lors de l'usinage le voilage global (sur l'arbre de la machine outil) était quasiment nul (de l'ordre de 0.05 mm).

Les forces de coupe correspondants à ces deux meules sont les suivants :

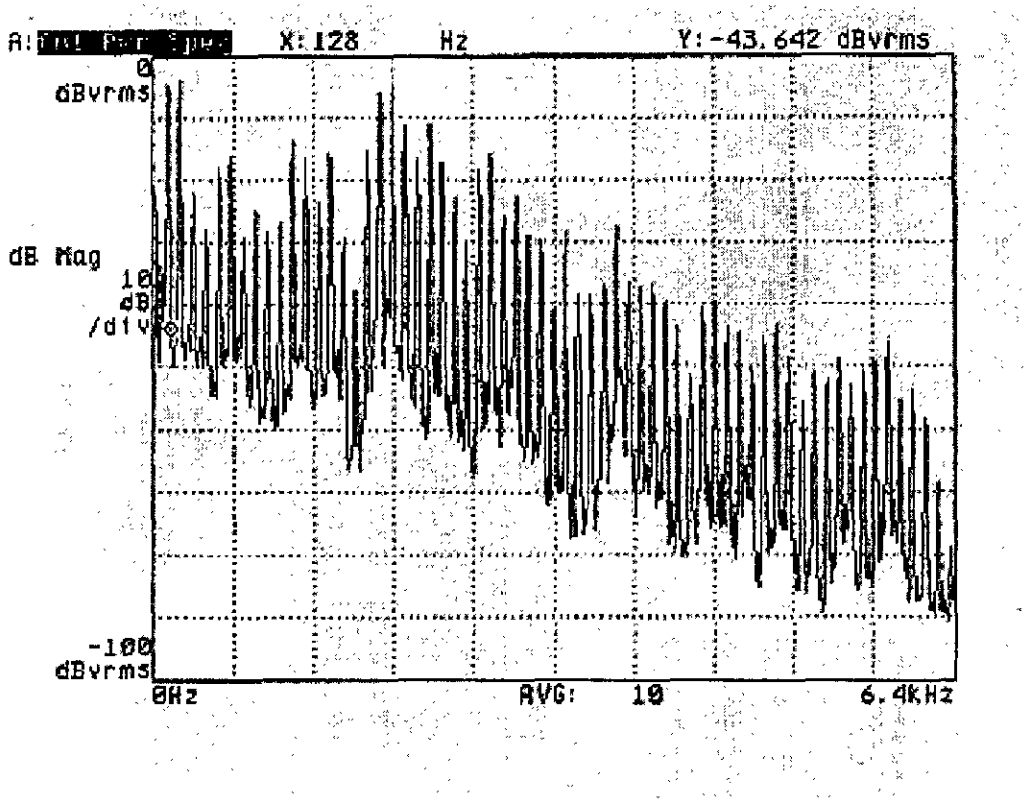


Meule non rectifiée

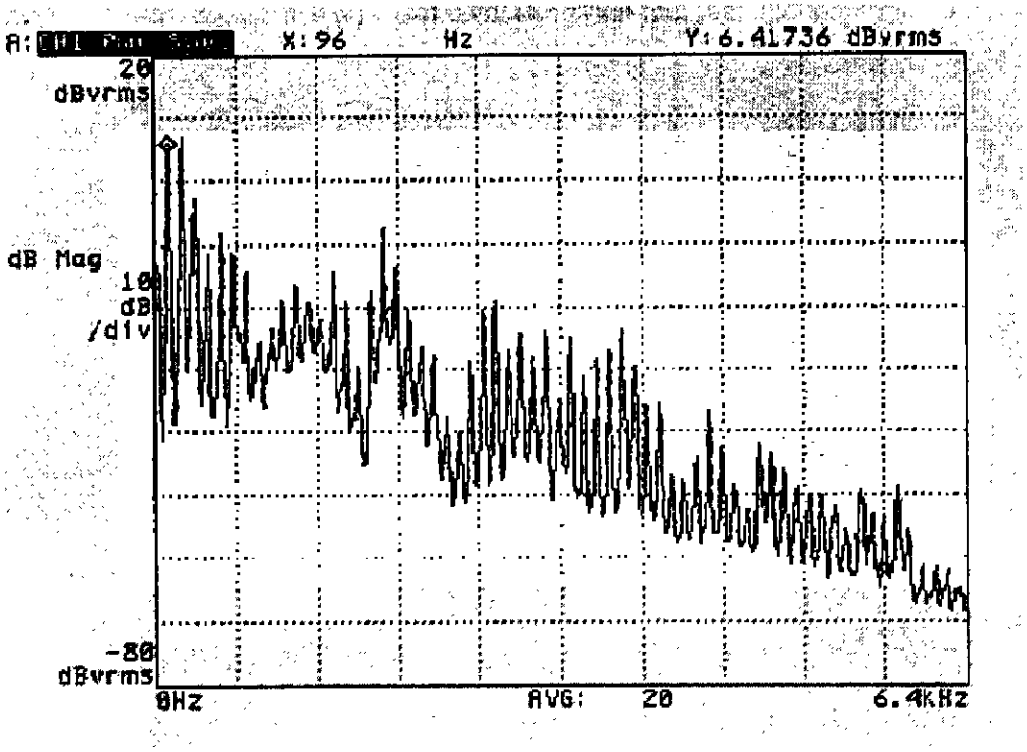


Meule rectifiée

Il apparaît très nettement que les oscillations en hautes fréquences sont directement liées à la répartition du voilage autour de la meule. Le spectres correspondants à ces deux mesures prouvent que les harmoniques de hautes fréquences ont été réduites de manière drastique par la rectification de la meule.



Meule non rectifiée



Meule rectifiée

On peut aussi remarquer que le niveau global de la force de coupe est supérieur dans le cas de la meule rectifiée, car le niveau le plus important est situé sur le pic fondamental. Ce fait surprenant vient du fait que la meule rectifiée possède un voilage de montage supérieur à celui de la meule non rectifiée. Pratiquement, la voilage dû au défaut de montage (alignement de l'axe de la meule par rapport à celui du moteur) a une influence prépondérante sur le niveau global de force de coupe.

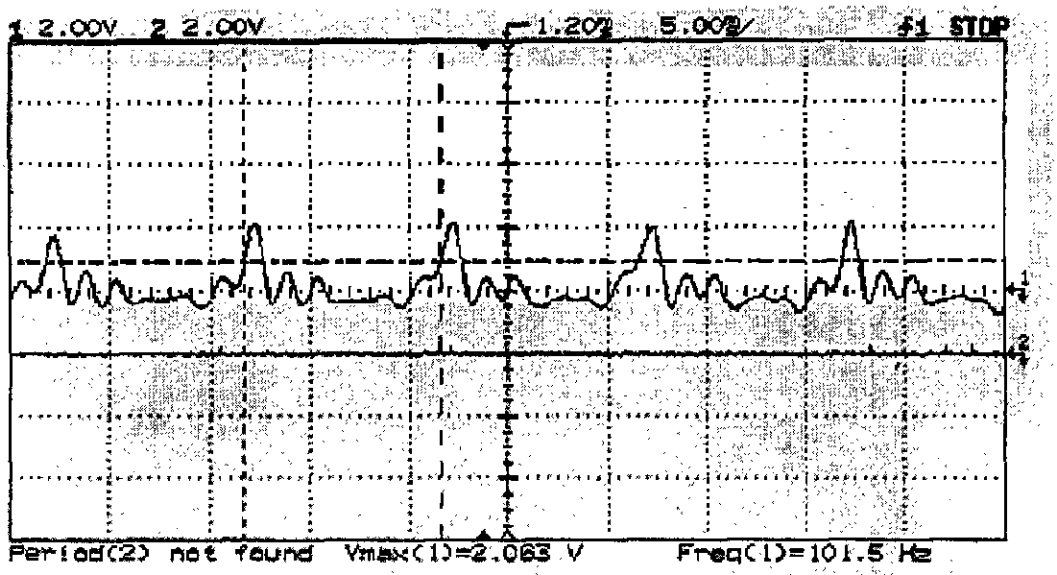
	Voilage moyen (mm)	Voilage max (mm)	Force de coupe global (N)
Meule non rectifiée	**0.178**	**0.355**	**470**
Meule rectifiée	**0.203**	**0.432**	**1100**

Force de coupe et vitesse d'avance : influence du taux d'engagement

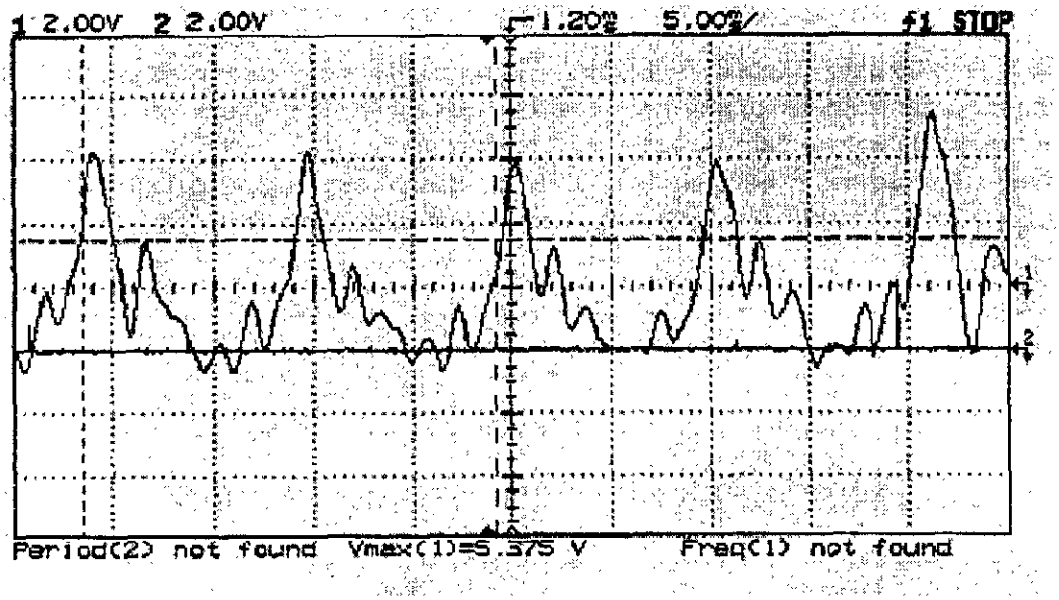
Si on utilise la meule non rectifiée pour différentes vitesses d'avance, on peut évaluer la relation entre le taux d'engagement et la force de coupe générée. Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus :

Vitesse d'avance (mm/s)	Voilage moyen (mm)	Taux d'engagement (%)	Force de coupe globale (N)
5	**0.18**	**27**	**200**
16	**0.18**	**88**	**530**

Les deux graphes suivants représentent les spectres de force pour les deux taux d'engagement, les signaux ont été filtrés (Passe-bas à 800 Hz) pour une meilleure visualisation.



Force de coupe pour un taux d'engagement de 27 %



Force de coupe pour un taux d'engagement de 88 %

Plus le taux d'engagement est élevé, plus la meule a tendance à être en contact avec la pièce et plus la force globale de coupe est élevée, en contre partie moins le spectre est riche en harmoniques.

2-8 Récapitulatif

- **Le grain et le liant n'ont d'influence sur la force dynamique de coupe**
- **La force de coupe qui excite à la fois la meule et la pièce meulée est directement liée au voilage et à l'excentration de la meule**
- **Le voilage dû au montage et le voilage moyen des meules sont directement responsables de l'amplitude de la force de coupe à la fréquence de rotation**
- **La distribution aléatoire autour de la meule et le taux d'engagement pendant la coupe sont responsables de la richesse harmonique du spectre de force**
- **Vu les influences sur le spectre associées à chacune des sources citées ci dessus :**

1. **la réduction à la source des vibrations en charge des meuleuses portatives requiert le contrôle des tolérances de voilage moyen des meules et des tolérances d'ajustement des arbres moteurs et des alésages des trous des meules**
2. **la réduction à la source du bruit des meuleuses portatives requiert le contrôle de la fabrication des meules afin de diminuer la répartition aléatoire du voilage**

3- Les meules

Le but de cette partie est d'étudier le bruit rayonné par les meules lorsqu'elles sont excitées par la force de coupe définie ci-dessus. Les trois types de meules rencontrées sur les chantiers sont:

1. les meules pour meuleuses droites
2. les meules plates pour meuleuses à angle
3. les meules à boisseaux pour les meuleuses verticales

3-1 Meules pour meuleuses droites

Les meules pour meuleuses droites sont des petits outils tournant à haute vitesse (25 000 à plus de 40 000 RPM), dont le bruit rayonné est la plupart du temps négligeable ou faible par rapport au bruit à vide des meuleuses.
Dans l'exemple ci-dessous, on compare le bruit d'une meuleuses droite électrique à vide et en charge (le rayonnement de la pièce meulée est négligeable)

Meuleuses	**Niveau de pression acoustique moyen à 1 mètre**
meuleuse droite électrique à vide	85 dB(A)
meuleuse droite électrique avec meule céramique en charge	88 dB(A)

On constate que le niveau augmente faiblement, on ne peut raisonnablement pas attribuer cette augmentation à la meule plutôt qu'à la pièce meulée ou encore à l'extraction des copeaux.

3-2 Meules à boisseau pour meuleuses verticales

Lors de nos visites préliminaires, il nous est apparu que le bruit rayonné par les meules à boisseau est négligeable par rapport au bruit rayonné par la meuleuse, et que dans le cas de ces meules, c'est la meuleuse qui reste la source principale de bruit (dans le cas de pièces non rayonnante telle que les sonars chez MIL Davie).

Afin de comprendre ce phénomène, les fréquences propres approximatives associées aux déformés de ces meules ont été calculées à partir d'un modèle mathématique de coque développé au GAUS.

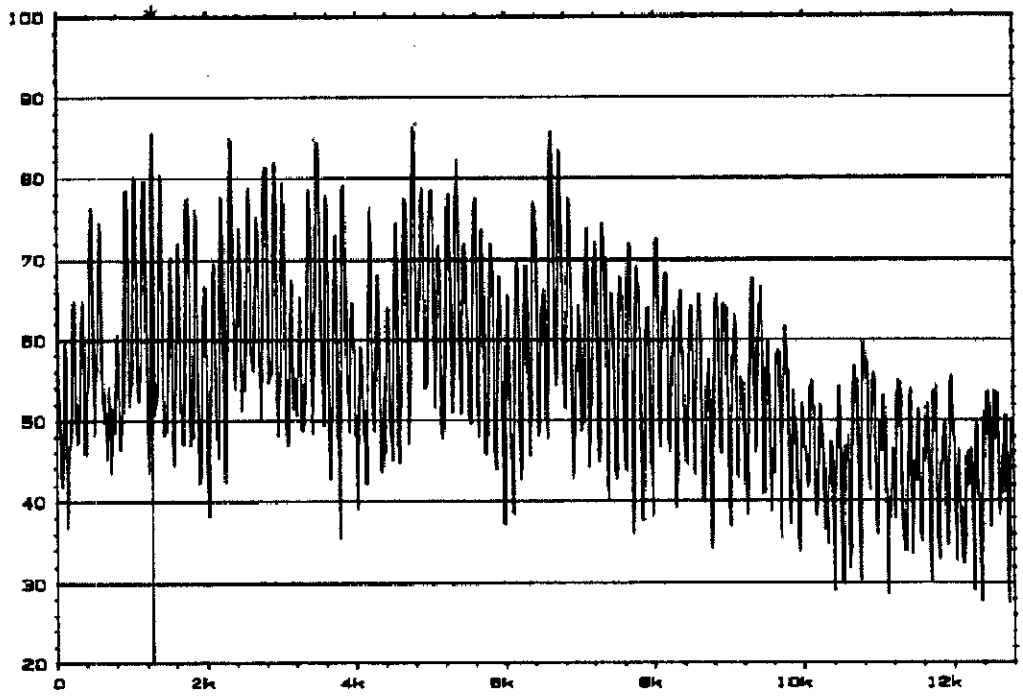
Il est apparu que **le premier mode d'une meule à boisseau standard se situe approximativement à 36 kHz**. En incluant les effets de rotation et de force tournante, il n'a pas été possible de faire ressortir un mode résonnant et rayonnant même dans un domaine de fréquence supérieur au spectre audible.

Les meules à boisseau ne constituent donc pas une source de bruit principales du procédé de meulage.

3-3 Les meules plates pour meuleuses à angle

- *Bruit des meules plates*

Dans le cas des meules plates, on ne peut plus négliger le bruit en coupe rayonné par ce type de meule. L'exemple ci-dessous illustre le bruit d'une meule plate standard de 7 pouces de diamètre montée sur un moteur électrique triphasé synchrone (bas niveau de bruit) et meulant une pièce massive dont le rayonnement est négligeable.



Total = 97.4 dB(A)

On constate que le niveau de bruit de la meule seule est du même ordre que ceux générés par des meuleuses équipées de moteurs à palettes. Les meules plates sont donc une source principale de bruit dans le procédé de meulage.

- *meules plates standards*

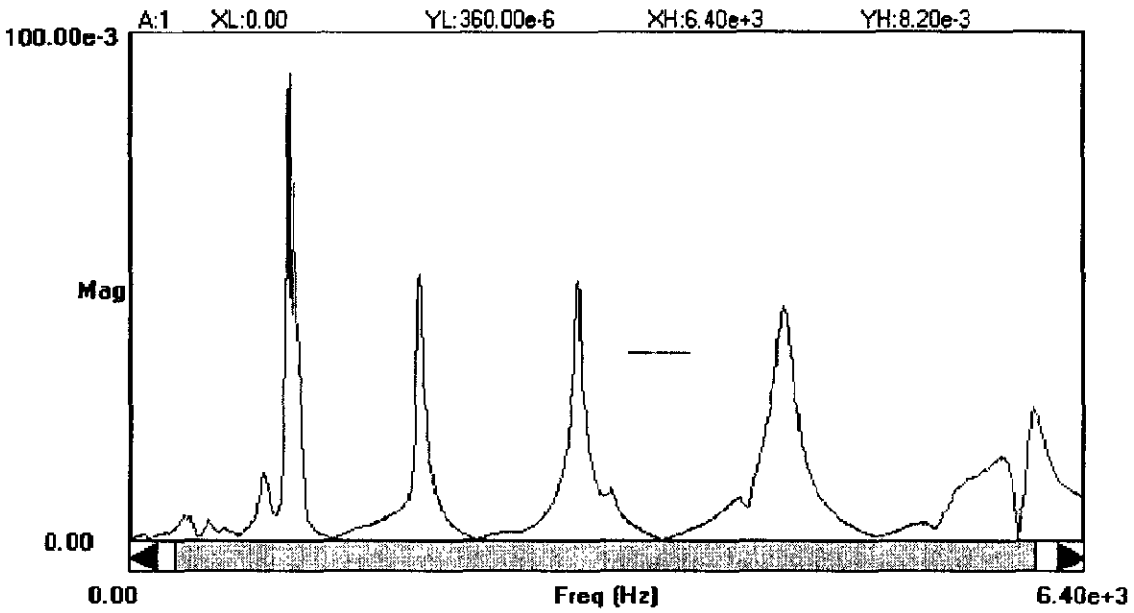
Les meules plates suivantes sont les meules de dimensions standards les plus utilisées sur les chantiers.

Diamètres	Épaisseurs	RPM nominaux
3 '' (76 mm)	1/8 '' (3 mm)	20 000
5 '' (127 mm)	1/8 '' (3 mm)	12 000
7 '' (178 mm)	1/4 '' (6 mm)	8 000
9 '' (230 mm)	1/4 '' (6 mm)	6 800

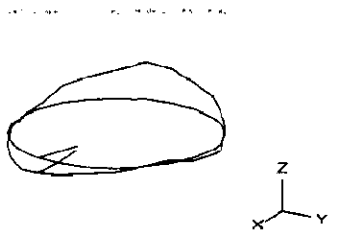
Pour simplifier les écritures, les meules plates seront désignées par leur diamètre dans la suite de cette partie

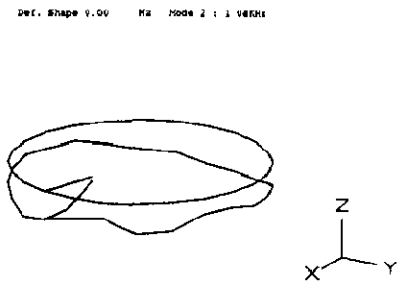
- *Comportement vibratoire des meules plates*

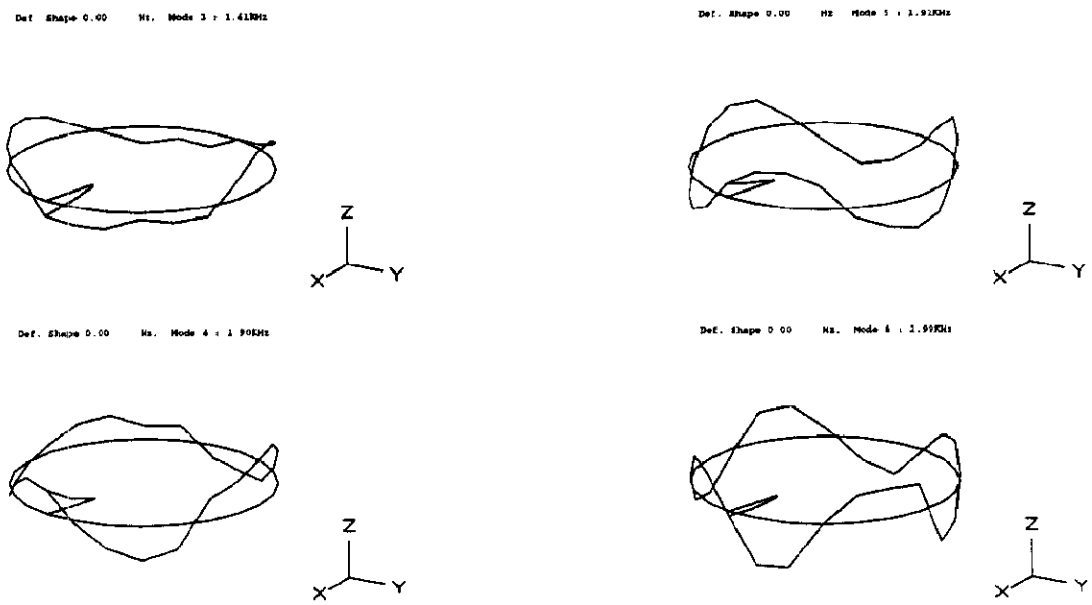
Contrairement aux meules à boisseau, les meules plates ont un comportement modal dont les fréquences propres se situent dans le spectre audible. L'exemple ci-dessous représente une fonction de transfert d'inertance pour une meule de 7 ''.



L'analyse modale des meules plates montre que celle-ci ont le comportement modal des disques encastrés au centre et libre à la périphérie. L'expérimentation montre aussi que seul les modes d'ordre peu élevés sont présents (mode 0 et mode 1 suivant r le rayon).
Les figures ci-dessous représentent les modes et les fréquences d'une meule plate de 7 ''.



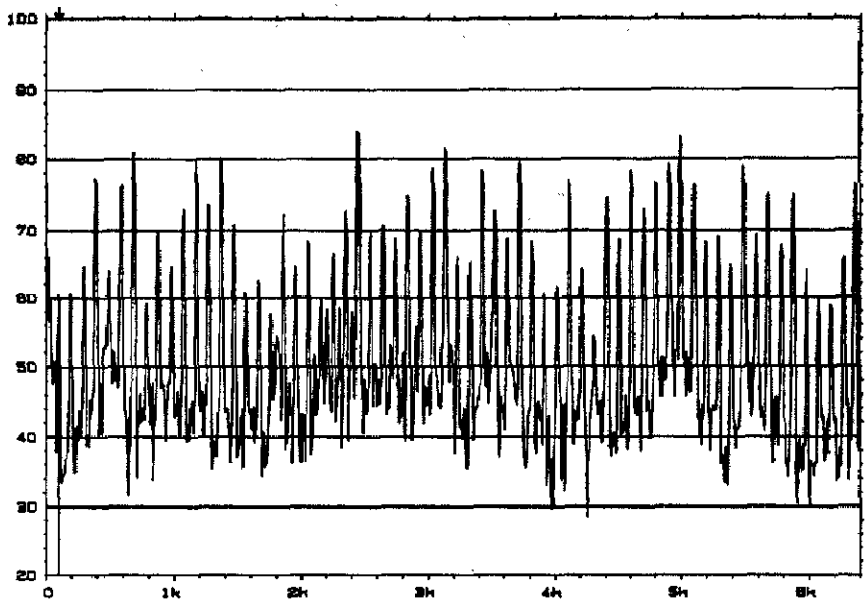




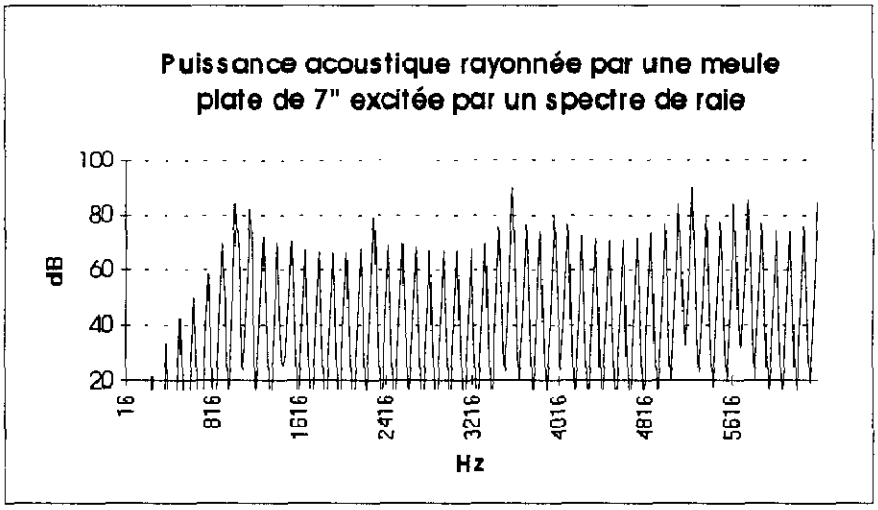
Malgré la structure par nature très hétérogène de la meule, il est possible d'obtenir des déformés modales connues quoique assez « chahutées ». La meule plate peut donc être modélisée de manière très satisfaisante par les modèles de disque développés au GAUS pour des structures homogènes.

- *Simulation du bruit rayonné par les meules plates*

Le rayonnement acoustique des meules plates peut donc être simulé à partir des modèles mathématiques de disques en injectant un spectre de force semblable à celui obtenu expérimentalement. Les deux graphes ci-dessous compare un résultat expérimental et un résultat de calcul pour le bruit rayonné par une meule plate de 7''.



Spectre typique de bruit mesuré



Spectre de puissance acoustique calculé

On constate une bonne similitude entre les deux spectres. Sans chercher à comparer les pics un à un, les résultats globaux donnent une très bonne estimation du niveau de bruit en coupe des meules plates.

Les résultats ci-dessous correspondent aux niveaux de bruit simulés pour les différents diamètres de meules plates avec des spectres de force de coupe correspondant aux RPM nominaux associés à chaque diamètre.

Diamètres	Niveaux de puissance simulés
3''	103 dB(A)
5''	97 dB(A)
7''	98 dB(A)
9''	101 dB(A)

On constate qu'il n'y a pas de relation directe entre le diamètre de la meule plate et le bruit rayonné. Quelque soit la taille de la meule, le bruit rayonné est toujours important et reste supérieur à 90 dB(A).

- *Amortissement des meules plates*

Dans le cas des structures vibrantes, le moyen de réduction le plus « à la source » possible est d'ajouter de l'amortissement. Pour ce faire, il existe peu de solutions envisageables. Notre expérience dans le domaine montre que se sont les structures « multicouches » qui offrent le plus de possibilités d'ajouter de l'amortissement.

– *Les meules « multicouches »*

La solution de structures « multicouches » ou « sandwich » a été utilisée avec succès pour la réduction du bruit des scies circulaires au GAUS. Les lames de scies circulaires sont en acier, ce matériau a un amortissement interne faible (0.05% environ), le traitement apportés sur les scies circulaires a permis d'obtenir des amortissements supérieurs à 2% et plus, d'où une diminution drastique des niveaux vibratoires et du bruit émis.

Dans le cas des meules plates, l'amortissement interne est à l'origine très élevé (de l'ordre de 1 à 2%). Pour obtenir une réduction significative du bruit, il faut pouvoir obtenir des amortissements extrêmes.

La solution « multicouche » a été essayée par des fabricants de meules (PFERD: Allemagne et TYROLIT: Autriche). Les résultats sont les suivants:

Meules	Niveaux de pression à 1 mètre
7'' standard	98 dB(A)
7'' PFERD	89 dB(A)
7'' TYROLIT	91 dB(A)

On constate une diminution sensible du bruit des meules plates multicouches. Les mesures expérimentales ont permis de déterminer l'amortissement de ces meules. L'amortissement des meules multicouches PFERD et TYROLIT est d'environ 5%.

Les simulations ont permis de déterminer de manière plus contrôlée la réduction du bruit obtenable avec un tel amortissement:

Meules	Niveaux de puissance simulées
7'' amortissement 1%	97 dB(A)
7'' amortissement 5%	92 dB(A)

La réduction du bruit à l'aide d'une meule multicouche est de l'ordre de 5 dB. Cette réduction est importante, il est difficile d'essayer d'obtenir mieux car un amortissement de 5% est très élevé. Cependant, le niveau de bruit résiduel reste élevé, 92 dB(A) à un mètre correspond à peu près à des niveaux de l'ordre de 95 dB(A) à l'oreille de l'opérateur.
Pratiquement, l'amortissement qu'il faudrait avoir pour obtenir des niveaux de bruit en coupe acceptables est de 15%.

Meules	Niveaux de puissance simulées
7'' amortissement 5%	92 dB(A)
7'' amortissement 15%	86 dB(A)

La solution multicouche de PFERD et TYROLIT est prometteuse, mais limitée semble-t-il à des valeurs maximales d'amortissement.

– *Amortissement et liant*

Le liant fait la cohésion de la meule, la rigidité, l'amortissement, le module d'Young, ... dépendent principalement du liant et non des grains.
Le liant est la composante de la meule sur lequel il serait peut être possible d'agir pour obtenir l'amortissement de 15% recherché. Le liant est à la base un composé résinoïde thermo durcissable auquel pourrait être ajouté d'autres composé visqueux compatibles avec le liant et générant de l'amortissement.

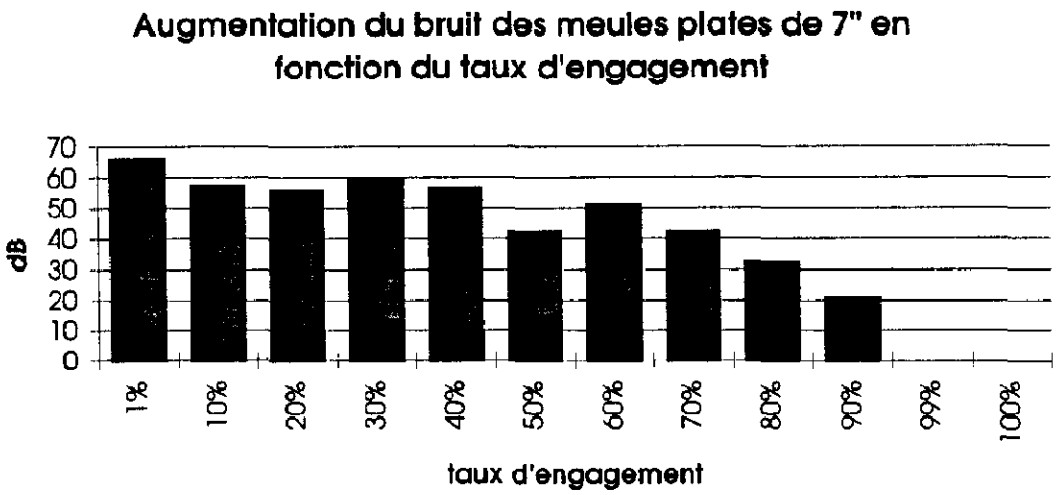
- *Tolérances de fabrication des meules plates*

Dans le paragraphe 2-4 de ce chapitre, on apprend que la force dépend fortement des caractéristiques de voilage et d'excentration des meules. Même si il n'est pas possible de le chiffrer précisément, la diminution des tolérances de voilage et d'excentration provoque de manière obligatoire la diminution de la force dynamique de coupe, de l'excitation de la meule, donc du bruit rayonné.

Si on fait l'hypothèse que les tolérances de fabrication peuvent être divisés par deux sur l'ensemble de la fabrication des meules, on peut raisonnablement s'attendre à une réduction « statistique » de 3 dB du procédé de meulage.

Si il n'est pas possible d'obtenir des tolérances de fabrication (au moulage des meules plates) plus précises, il faut envisager de procéder à la rectification et à l'équilibrage individuels de chaque meule.
Les réductions du bruit obtenables par un meilleur contrôle des tolérances ont été estimés en simulant les puissances acoustiques rayonnées lorsque la meule est excitée par des forces de

coupe correspondant à différentes valeurs du taux d'engagement. Les résultats sont donnés dans le graphique ci-dessous, la puissance acoustique rayonnée pour un taux d'engagement de 100% est prise en référence:



On constate que la réduction possible en réduisant le voilage et l'excentration est très importante, soit plus de 65 dB entre 1% à 100%. Cette constatation est très importante car on s'aperçoit qu'il est plus facile d'essayer de réduire le bruit en travaillant sur les tolérances de fabrication que d'essayer d'augmenter l'amortissement interne des meules.
Pratiquement, on a pu déterminer que le taux d'engagement varie entre 5% et 25%. Or le graphe montre que les réductions deviennent significatives au delà de 70%. Pour atteindre des niveaux de bruit acceptable la réduction recherchée serait d'environ 15 dB, cette réduction est atteinte quand le taux d'engagement est aussi d'environ 70%.

Le tableau suivant compare les résultats expérimentaux de niveaux de bruit de meulage avec une même meule avant et après rectification.

Meules	Voilage (mm)	Excentricité (mm)	Taux d'engagement estimé (%)	Niveaux de bruit à 1m (dB(A))
7'' standard	0.79	1.1	20	97 à 99
7'' rectifiée	0.075	0.075	100	94

On constate une réduction sensible du bruit émis (environ 3 à 5 dB(A)), mais pas une réduction drastique à laquelle on s'attendait théoriquement pour un taux d'engagement de 100 %. On peut expliquer ce phénomène de deux manières :

- le bruit à vide de la meuleuse est de 87 dB(A)
- même si le taux d'engagement est de 100% théoriquement, on peut faire l'hypothèse que la meule n'est pas en contact permanent avec la pièce car le support qui la retient (main et bras) a une impédance mécanique faible (voir chapitre sur les vibrations), or le calcul du temps d'engagement considère que la meule ne bouge pas (support rigide).

3-4 Récapitulatif

- **Les meules pour meuleuses droites et les meules à boisseau pour meuleuses verticales ne constituent pas des sources de bruit du procédé de meulage**
- **Les meules plates sont des meules bruyantes. Quelque soit le diamètre, le niveau de bruit dépasse 100 dB(A) et plus à l'oreille de l'opérateur.**
- **Pour réduire le bruit des meules plates en dessous de 90 dB(A) à l'oreille de l'opérateur, il faut que les meules plates aient un amortissement interne de 15% obtenu:**
  1. **par une structure multicouche (du type PFERD ou TYROLIT)**
  2. **par une addition de composé visqueux au liant résinoïde**
  3. **par une combinaison de ces deux solutions**
- **Pour réduire le bruit des meules plates en dessous de 90 dB(A) à l'oreille de l'opérateur, il faut que le voilage et l'excentration soient inférieurs aux valeurs approximatives suivantes:**

Voilage max.:	**0.11 mm**
Excentration max.:	**0.11 mm pour des meules de 3"**
	0.18 mm pour des meules de 5"
	0.27 mm pour des meules de 7"
	0.32 mm pour des meules de 9"

- **La réduction du voilage et de l'excentration peut se faire:**
  1. **par un meilleur contrôle des tolérances de moulage des meules**
  2. **par rectification des meules après moulage**
  3. **par une combinaison de ces deux solutions**

CHAPITRE 3 : ÉTUDE DES SOURCES DE VIBRATIONS DU PROCÉDÉ DE MEULAGE

I. Généralités

I.1 Calcul du niveau d'exposition

Temps d'exposition:

D'après des études réalisées par les comités de normalisation, le temps maximal d'exposition ne dépasse pas 4 h. Le niveau d'exposition L_{eq} revient à ramener les vibrations mesurées pendant un temps T à 4 h d'exposition.

$$L_{eq,4} = L_{eq,T} + 10 \log \frac{T}{4}$$

Référence pour le calcul des dB

Les niveaux de vibrations à mesurer sont des niveaux d'accélérations en m/s^2. La référence est 1 $\mu m/s^2$ ou 10^{-6} m/s^2. L'expression du niveau de vibration est:

$$L_{eq,T} = 20 \log \frac{a_{eq,T}}{a_o}$$

$$ao = 1\ \mu m/s^2$$

Calcul de l'accélération équivalente

L'accélération équivalente mesurée pendant un temps T est la moyenne quadratique des accélérations suivant les 3 axes principaux ou les axes principaux de vibration mesurés aux points de prises des mains sur la machine étudiée:

$$a_{eq} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_2^2}$$

Filtre de pondération

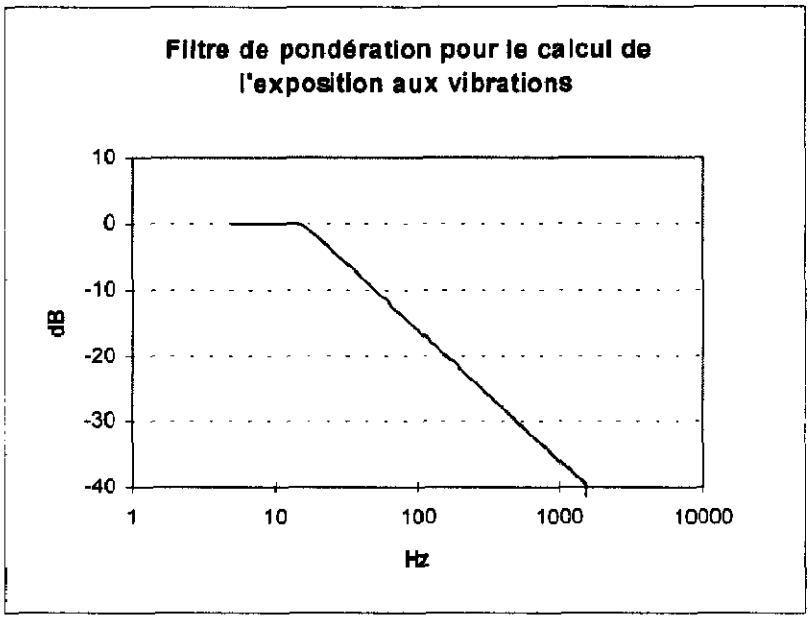
Tout comme pour l'exposition au bruit, le niveau équivalent d'exposition aux vibrations doit être pondéré en fréquence par un filtre. Les vibrations entraînent des troubles de natures différentes:

- en basses et moyennes fréquences: affections vaso-motrices et ostéo-articulaires

- en hautes fréquences: troubles angioneurologiques (crampes, doigts blancs...) ces troubles sont généralement irréversibles.

Dans le domaine de l'exposition aux vibrations, les notions de basses et hautes fréquences diffèrent de l'acoustique. Les basses fréquences sont situées de 0 à 16 Hz, les hautes fréquences sont celles supérieures à environ 200 Hz..

Le filtre de pondération a l'allure suivante:



Notons qu'au-delà de 1500 Hz, le corps humain est peu affecté par les vibrations.

Niveau d'exposition maximum

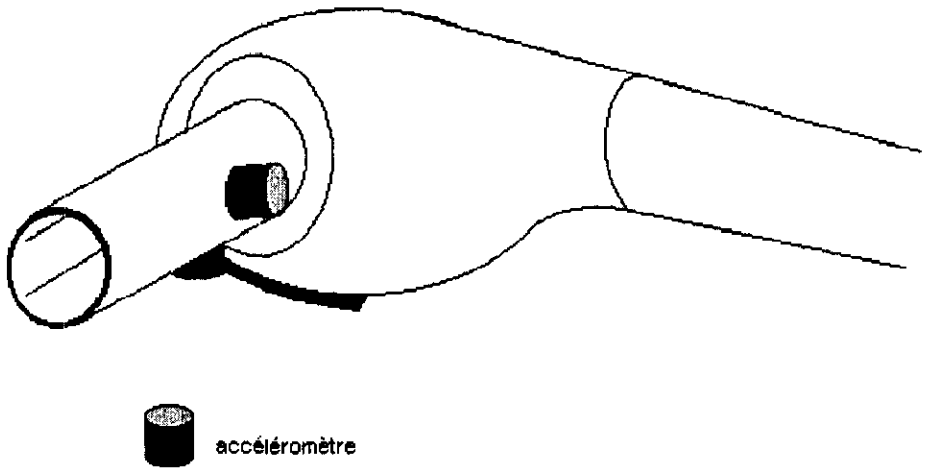
On définit trois zones correspondant à des risques différents suivant la dose de vibrations reçues:

- zone A: zone de sécurité, la dose $L_{eq,4} < 137$ dB ou moins de 7 m/s^2
-zone B: zone d'alerte, 137 dB $< L_{eq,4} <$ 143 dB ou entre 7 m/s^2 et 14 m/s^2
-zone C: zone de danger, $L_{eq,4} > 143$ dB ou plus de 14 m/s^2

Application à la meuleuse

Dans l'étude qui suit, les vibrations ont été mesurées sur la poignée avant d'une meuleuse à angle et des meules plates de 7". Les phénomènes vibratoires observés peuvent être étendus à la poignée arrière, ou à d'autres types de meuleuses.

Le montage des accéléromètres a été réalisé comme indiqué sur la figure ci-dessous.



Installation des accéléromètres sur la poignée avant

I.2 Équilibrage des machines tournantes

Notions théoriques

Le modèle classique de balourd prend pour hypothèses un disque parfait, homogène et isotrope. Chaque petite masse non compensée située dans le plan du disque et hors de l'axe de rotation constitue un balourd.

En pratique, le balourd admissible est fonction de la masse du disque, c'est pourquoi on parle de balourd spécifique:

$$\bar{e} = \frac{m\,\bar{r}}{M} \qquad \text{g } mm \,/\, kg$$

m: masse de balourd (g)
$\bar{r}$: rayon de giration de la masse de balourd (mm)
M: masse du disque (kg)

La force de déséquilibrage $\bar{F}$ est générée par la rotation de la masse de déséquilibre et la rotation du déséquilibre.

$$\bar{F} = m\,\bar{r}\,\omega^2 \qquad \text{g mm/s}^2$$

ou

$$\bar{F} = M\,\bar{e}\,\omega^2 \qquad\qquad g\ mm/s^2$$

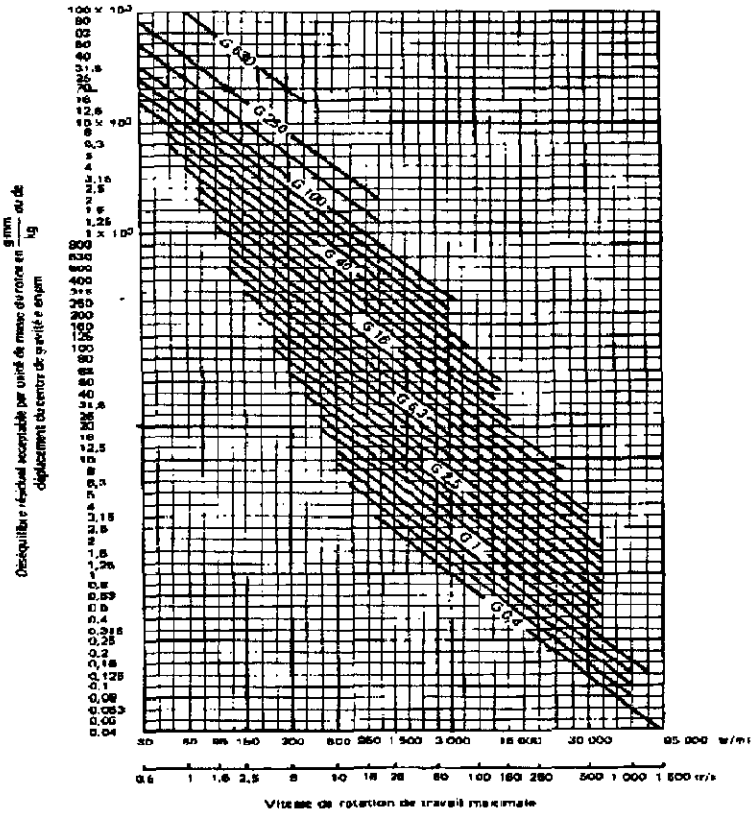
Dans le cas des meules plates, il semble que le modèle de balourd statique soit suffisant à cause de la longueur du rotor (3 mm) et du montage des roulements à bille qui supporte son arbre (montage dit "à roulements rapprochés").

Qualité d'équilibrage (Norme ISO 1990)

La qualité d'équilibrage correspond au balourd résiduel maximum admissible. Les classes GXY (classe d'équilibrage) correspondent à un produit $\bar{e}\,\omega$ constant. Le tableau suivant illustre la relation entre la qualité de l'équilibrage et les machines tournantes associées.

Qualité d'équillibrage	Exemples de machines tournantes et RPM
G0.4	gyroscope 24 000
G1	moteur électrique de précision 6 000
G2.5	petit moteur électrique 3000
G6.3	gros moteur électrique 3000
G40	vilebrequin de moteur à explosion rapide 6000

La figure ci-dessous montre la relation entre la qualité d'équilibrage et le balourd.

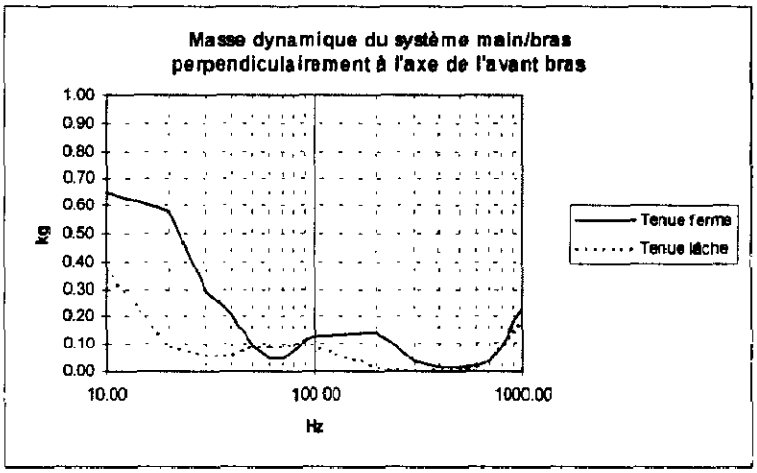


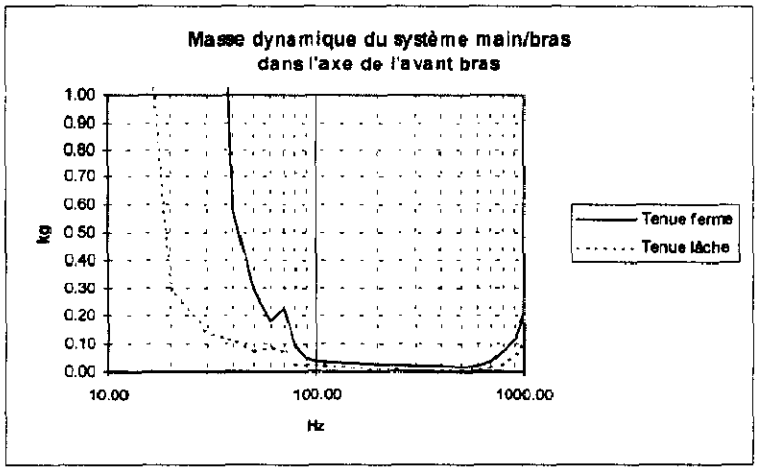
I.3 Masse dynamique du système main/bras

La réponse vibratoire de la main n'est pas constante en fréquence. Si on fait l'hypothèse de corps rigide pour la meuleuse, on ne peut pas en faire de même avec le système main/bras.

On prend en compte généralement "l'impédance d'entrée" de la main. La littérature est très pauvre en donnée concernant la réponse vibratoire du corps humain.

Le graphique suivant donne une bonne idée des caractéristiques de masse dynamique du système main/bras.





On constate ici que le système main/bras a une masse dynamique très faible dès les premières basses fréquences. En d'autres termes, la masse dynamique de la main est très faible (voire négligeable) face à la masse (rigide) de l'outil qu'elle supporte.

Par exemple si le balourd de la meule tourne à $\omega = 100$ tr/s, la fréquence d'excitation est de 100 Hz. A cette fréquence, le système main/bras "pèse" 0,073 kg ou 73 g, la meuleuse pesant plus de

deux kilogrammes, la masse ajoutée par la main reste négligeable même quand on exerce une forte pression.

II. Vibrations à vide des meuleuses à disque

Lorsqu'on utilise des meuleuses portatives, on s'aperçoit immédiatement que la vibration ressentie dans les poignées est directement dépendante de la rotation de la meule. En effet, suivant la meule que l'on fixe à la meuleuse, les vibrations ressenties peuvent changer du tout au tout d'une meule à l'autre.

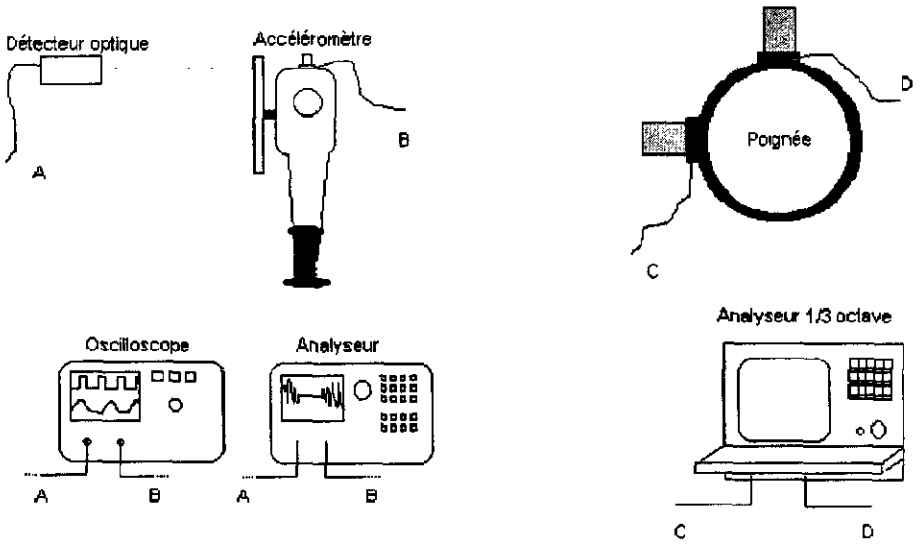
Pratiquement, il y a trois sources de vibrations à vide possible.

1- déséquilibre de la motorisation
2- déséquilibre de la meule
3- déséquilibre de montage

II.1 Montage expérimental

Afin de mesurer le balourd des meules plates et les vibrations induites dans les poignées, un montage expérimental a été mis en place tel que décrit ci-dessous. Ce montage est destiné au tests en laboratoire pour les besoins de nos essais et n'est pas transférable pour des tests in-situ.

L'analyseur 1/3 d'octave mesure les vibrations induites dans les poignées. L'oscilloscope donne la valeur RMS de l'amplitude de vibration due au balourd et l'analyseur en bandes fines détermine la phase entre le signal de l'accéléromètre et le capteur optique.



Mesure du déséquilibre du balourd

Un accéléromètre fixé au point le plus haut de la meuleuse mesure l'accélération horizontale de l'outil. Connaissant la masse de la meule et la masse de la meuleuse, il est facile d'obtenir le balourd

$$\bar{e} = \frac{\ddot{z}_{RMS}}{\omega^2} \times \frac{M_T}{M_m}$$

$\ddot{z}_{RMS}$: accélération verticale à la fréquence de rotation
ω: $2\pi f$; f = fréquence de rotation
M_T: masse totale = masse meule + masse meuleuse
Mm: masse du rotor = masse de la meule

Le déphasage entre la cellule optique et la vibration donne la position de la masse non compensée. Si la cellule optique et le capteur de vibration sont alignés, un déphasage de 0° signifie que le balourd se situe sur le même rayon que le papier réfléchissant.

Si le signal de la cellule est relié à la voie A de l'analyseur et le signal d'accélération est relié à la voie B, un déphasage de k° signifie que le balourd est k° dans le sens de rotation à partir du papier réfléchissant.

Mesure de la vibration dans la poignée avant

Deux capteurs de vibrations sont vissés dans des supports fixés à angle droit à la poignée avant de la meuleuse.

La dose de vibration est calculée à partir de la formule donnée au paragraphe 7.1.1.

II.2 Niveaux de vibration et équilibrage

Niveaux de vibration de la meuleuse seule

Dans un premier temps, les vibrations induites dans la poignée avant ont été mesurées sans monter de meule sur l'arbre d'entraînement. Le but de ce premier essai est de déterminer la limite basse qu'il est possible d'obtenir sur notre meuleuse d'essai.

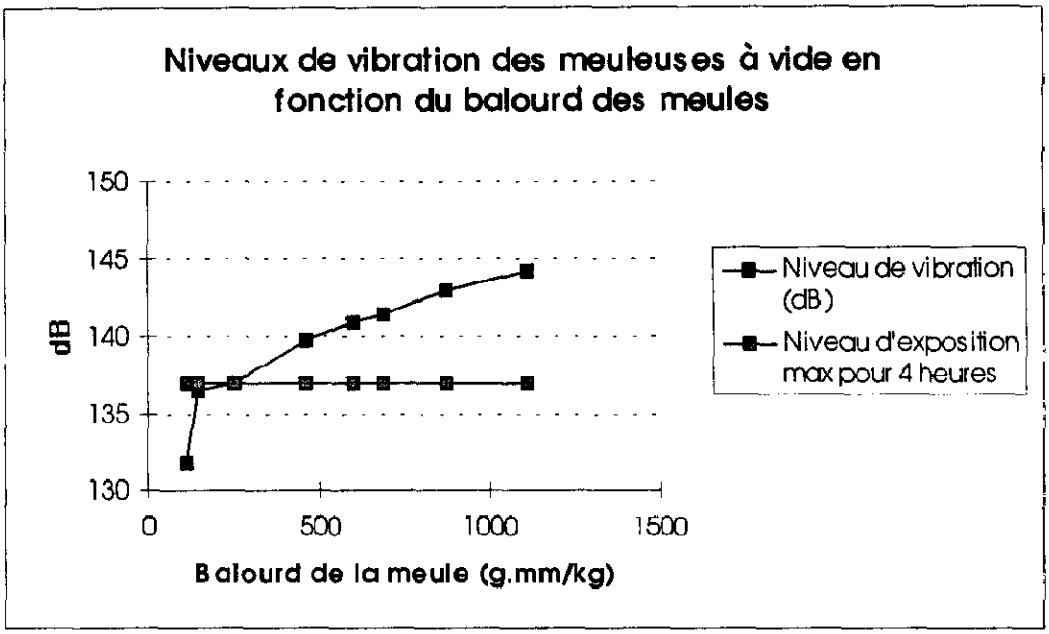
Le niveau relevé est de 132 dB, soit 5 dB en dessous de la limite maximale ce qui est peu.

Niveaux de vibration et équilibrage

Comme il est difficilement possible de contrôler l'équilibrage des meules, on a procédé à la mesure d'une grande quantité de meules ayant des caractéristiques de fabrication différentes. On

a pu ainsi couvrir une gamme assez importante de balourd allant de 100 g.mm/kg à 1100 g.mm/kg.

Le graphique ci-dessous représente le niveau de vibration en fonction de l'équilibrage.



On constate que le niveau de vibration est supérieur à 137 dB pour des balourds supérieurs à 250 g.mm/kg environ.

Or moins de 11% des meules ont un balourd inférieur à 250 g.mm/kg parmi celles qui ont été testées.

Niveau de vibration et montage

Dans le rapport préliminaire IRSST [1], on apprend que le balourd peut dépendre fortement du montage de la meule. En effet, à cause des jeux fonctionnels, il est très possible de cumuler ou d'annihiler l'effet des excentricités de la meule et de montage. Dépendamment des valeurs relatives de ces deux excentrations, les variations du balourd résultant peuvent être importantes.

Le but des expérimentations suivantes a été de chercher à quantifier l'erreur sur le balourd et les vibrations dans les poignées dues au montage.

Chacune des meules qui ont été mesurées ont été montées et démontées deux ou trois fois. Le tableau ci-dessous donne les valeurs de vibrations à vide en fonction du balourd pour plusieurs montages de meules.

	Balourd g.mm/kg	Niveau de vibration dB
Meule 1 montage 1	506	140
montage 2	598	141
montage 3	686	141
Meule 2 montage 1	1264	145
montage 2	1109	144
Meule 3 montage 1	335	139
montage 2	145	136
etc ...		

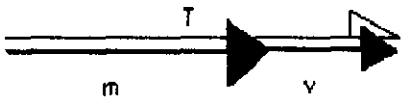
On constate que le montage influe de manière sensible sur le balourd, les niveaux de vibrations associés varient entre 1 et 3 dB.

Pratiquement, le montage influe d'autant plus que le balourd initial de la meule est faible.

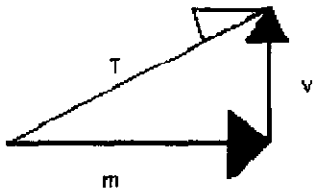
Le balourd est une quantité vectorielle, la somme du balourd de la meule et d'excentricité de montage s'additionne ou se retranche:

Exemple:

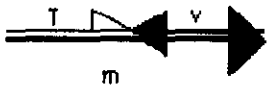
meule n montage 1



n montage 2



n montage 3



$\vec{m}$: vecteur excentration de la meule
$\vec{v}$: vecteur excentration de montage
$\vec{T}$: vecteur excentration totale

Il devient clair que si $\vec{m}$ est grand devant $\vec{v}$, l'influence de l'excentration de montage est faible sur l'excentration totale et donc sur le balourd total.

II.3 Influence de la prise en main

Les essais d'équilibrage ont été effectués en suspendant simplement la meuleuse, les vibrations dans la poignée ont été mesurés en simultané et sans prise en main de la meuleuse.

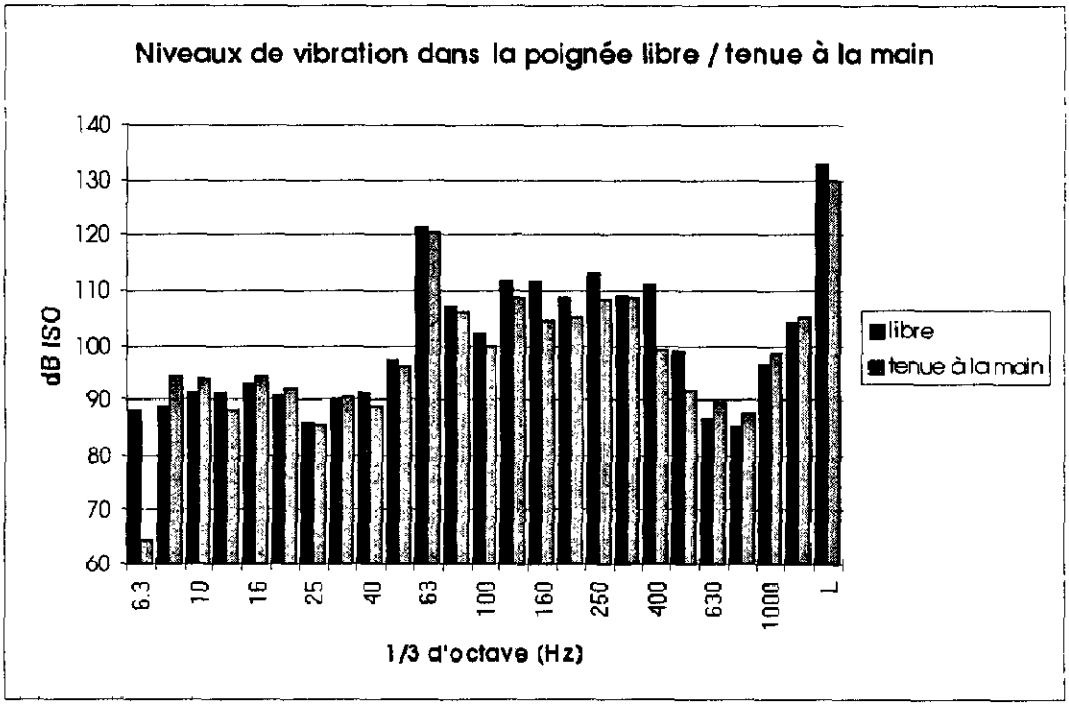
A priori, on peut penser que les résultats obtenus précédemment sur les niveaux de vide dans les poignées sont incorrects à cause de la suspension libre. En se référant au paragraphe I.3 du chapitre 2, on peut relever la masse dynamique de la main à la fréquence de rotation et la comparer à la masse totale de la meuleuse et de sa meule (supposée rigide) et celle du système main/bras à cette fréquence.

masse dynamique main/bras à 63 Hz: 0,26 kg

masse rigide, meule et meuleuse: 4 kg

La masse dynamique du système main/bras même sous pression forte est négligeable face à la masse de la meuleuse.

Le graphe ci-dessous compare typiquement le spectre de vibrations dans les poignées du système décrit en II.1, quand la meuleuse est suspendue ou tenue fermement par ses poignées.



La prise en main de la meuleuse ne contribue en rien à la réduction des vibrations de la meuleuse à vide. Les résultats obtenus aux paragraphes précédents sont directement applicables sans effectuer de correction due à la prise en main des meuleuses portatives.

II.4 Classe d'équilibrage requise

Pour que les vibrations à vide soient inférieures à 137 dB, il faut que le balourd ne dépasse pas la valeur de 250 g.mm/kg.

Si on se réfère à la norme ISO 1940, on peut repérer que la classe d'équilibrage pour des rotors tournant entre 60 et 100 Hz avec un balourd de 250 g.mm/kg est environ G400.

Cette valeur de classe d'équilibrage est obtenue en prolongeant le segment qui définit la classe G400. D'après la norme ISO 1990 les balourds de 250 g.mm/kg, les vitesses de rotations ne doivent pas dépasser 50 à 60 tr/s (valeur limite pour la classe G100). Pour la gamme de vitesse d'utilisation des meules, la classe d'équilibrage recommandée par la norme serait située entre G16 à G40 (soit un balourd maximum de 63 g.mm/kg).

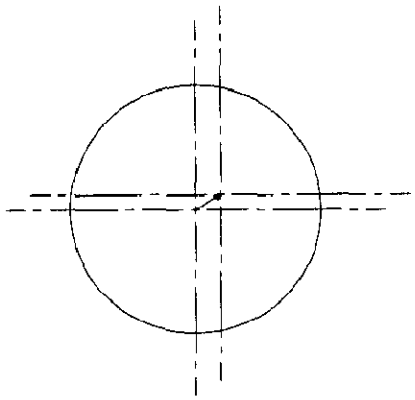
Si on fait la moyenne des balourds mesurés, on obtient une valeur moyenne de 631 g.mm/kg. En se référant toujours à la norme, des pièces déséquilibrées avec des balourds de 630 g.mm/kg ne devraient pas dépasser des vitesses de rotation de 25 tr/s pour la classe d'équilibrage. Ce qui signifie que la plupart des meules sur le marché ne respecte pas la norme ISO sur les objets tournants avec un facteur de dépassement de 10 environ. Ce phénomène pourrait expliquer en partie les risques d'éclatement des meules en rotation.

Le tableau ci-dessous résume les classes d'équilibrage:

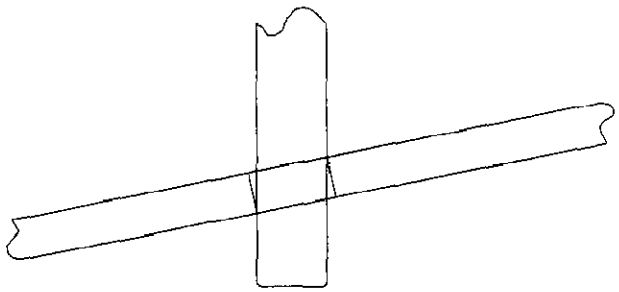
État	Classe d'équilibrage	Balourd
actuel	**G400**	**630 g.mm/kg**
requis pour la réduction des vibrations à vide	**G100**	**250 g.mm/kg**
requis par la norme ISO1940	**G16 à G40**	**63 g.mm/kg**

II.5 Ajustement de montage requis

Le contrôle de la tolérance de montage est primordial quant à la réduction des vibrations à vide et de la force de coupe. De cette tolérance dépend le balourd de la meule (vibration à vide) et surtout le voilage de la meule (force de coupe). Le graphique suivant montre l'effet de la tolérance de montage sur le balourd et le voilage de montage.



Balourd



Voilage

D'après la norme ANSI B4.2-1978, les tolérances d'ajustement arbre/alésage sont cotées de la manière suivante:

20 H7 g6

20 : Tolérance d'arbre
H7 : Tolérance d'alésage
g6 : Diamètre nominal

Pour un diamètre normalisé de 25 mm (la dimension la plus proche) de celle des meules, les tolérances sont:

Mécanique générale	H11/C11	0.37 à 0.110 mm	libre
	H9/d9	0.169 à 0,065 mm	tournant
Bonne mécanique	H8/f7	0,074 à 0,02 m	tournant
	H7/g6	0,041 à 0,004 mm	glissant
Mécanique de précision			

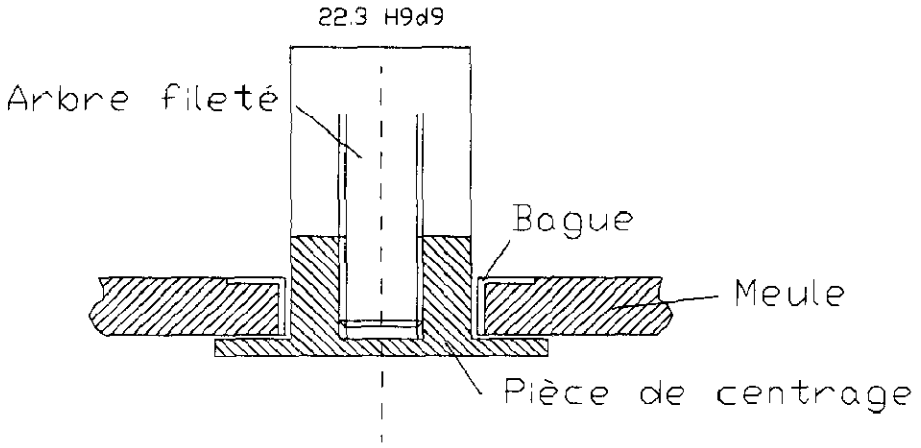
On constate que l'excentricité relevée sur les meules actuelles correspond à la classe d'ajustement H11/C11 (et plus), soit à la classe de tolérance la moins restrictive permise.

Or ces ajustements correspondent en général à des pièces fixes à déplacements lents et ne transmettant pas d'efforts. Dans le cas des meules, on a un écrou de serrage qui empêche la meule de bouger, mais on risque de bloquer l'ensemble arbre/meule dans une position d'excentration maximale.

Afin d'assurer un bon montage des meules qui ne dégrade pas la qualité d'équilibrage une tolérance de montage H9/d9 est nécessaire pour limiter les risques dus aux vibrations tout en

restant dans la limite de la mécanique "ordinaire" ou "générale". Cette tolérance autorise des jeux fonctionnels de 0,169 mm maximum, soit environ la moitié du jeu actuel.

Cette tolérance peut être facilement atteinte pratiquement à la fabrication des meules. Certains fabricants insèrent une bague en acier dans le trou d'alésage de la meule, cette bague peut supporter les tolérances d'alésage H9. L'arbre de la meuleuse est constituée d'une pièce tournée qui peut aisément supporter la tolérance d9.

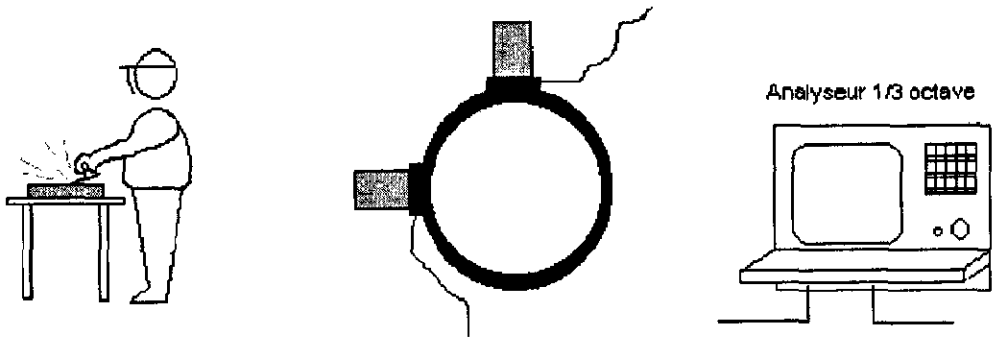


III. Vibrations en charge des meuleuses portatives

Dans le paragraphe précédent, l'influence de la main sur les vibrations a été démontré négligeable sur le niveau d'exposition des vibrations. Dans ce présent chapitre, on étudiera donc les vibrations en charge avec la meuleuse tenue manuellement.

III.1 Montage expérimental

Le montage est similaire à celui des vibrations à vide dont on a conservé la poignée équipée de capteurs de vibration et la chaîne de mesure. La meuleuse est tenue à la main, la pièce meulée est un profilé en acier en U d'épaisseur 6 mm. L'opérateur est debout sur une balance qui permet d'évaluer la pression exercée sur la meuleuse.



III.2 Rappel sur la force de coupe

La force de coupe est liée au voilage de la meule, pour les vibrations, c'est la composante à la vitesse de rotation qui est prépondérante.

Or on sait que le spectre de force dépend:

- du voilage moyen de la meule en ce qui concerne l'amplitude du pic fondamental
- de la profondeur de passe en ce qui concerne "la richesse" harmonique du spectre.

Donc dans le cas des vibrations, c'est le voilage moyen qui est le plus problématique.

III.3 Niveaux de vibration et tolérances géométriques

Le but de l'expérience suivante est d'étudier l'influence de la réduction du voilage de la meule sur les vibrations dans la poignée.

Pour ce faire, on a utilisé un ensemble meuleuse + meule (neuve) qui a été testé avant et après rectification de la meule dans les quatre cas suivants:

- A vide

- Meulage léger: la meuleuse est maintenue en contact sur la pièce sous pression

- Meulage moyen: la meuleuse travaille dans des conditions normales d'utilisation

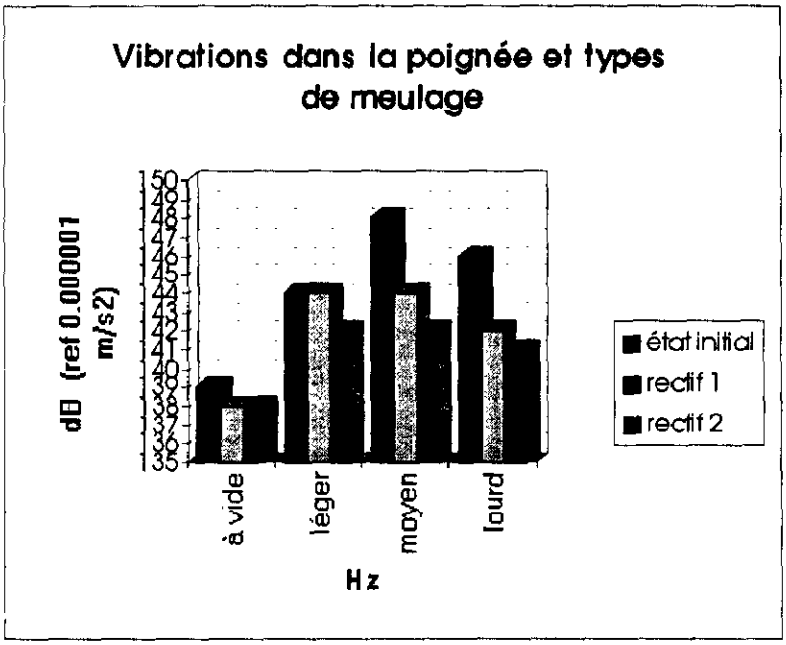
- Meulage lourd: la meuleuse est fortement sollicitée, la vitesse de rotation chute jusqu'à l'arrêt presque total de la meuleuse

Afin d'éviter le voilage résiduel dû au montage/démontage de la meule et à la tolérance de montage, les rectifications ont été faites sans démontage. L'ensemble meuleuse + meule a été installé sur la machine de rectification.

La meule a été rectifiée deux fois consécutives, le tableau suivant donne les valeurs de voilage correspondant à chacun des essais.

Essai	Rectification	Voilage max (mm)
1	Pas de rectification	0,86
2	grossière	0,30
3	fine	0,075

Le graphe suivant représente les niveaux de vibration correspondant à ces essais.



Les niveaux de vibration ont diminués de manière significative. On note une réduction de 2 dB pour le meulage "léger" entre l'état initial et la rectification fine, de 6 dB pour le meulage "moyen" et de 5 dB pour le meulage "lourd".

On remarque aussi que la réduction est moins significative quand on compare la rectification grossière et la rectification fine. La rectification grossière apporte la réduction des vibrations la plus significative. Le fait d'amener le voilage résiduel à la valeur la plus petite possible ne permet pas d'éliminer la vibration.

L'explication est que la vibration à vide détermine la limite maximale qu'il est possible d'atteindre. Dans le cas de notre meule d'essai, la différence entre les niveaux de vibration à vide et les niveaux de vibration en coupe après rectification sont du même ordre.

En pratique, l'effet conjugué de l'équilibrage à vide et de la rectification de la meule amènerait les niveaux de vibrations dans la poignée proche de la limite tolérée de 137 dB.

III.4 Tolérances maximales requises

L'origine du voilage des meules est double. Comme on a pu le constater, il existe un voilage de fabrication qui correspond à une répartition plus ou moins bonne de la matière constituant la meule. Cette mauvaise répartition provient principalement du fait que ce sont des pièces moulées, le contrôle des dimensions est rendu difficile à cause du retrait au séchage. La deuxième source de voilage est le système de montage de la meule sur la meuleuse et correspond à un mauvais alignement de l'axe de la meule avec celui du système de fixation.

Le voilage total de la meule correspond à l'addition de ces deux effets qui peuvent être constructifs (augmentation du voilage) ou destructif (diminution du voilage). L'expérience nous a permis de déterminer que le voilage des meules doit être inférieure à 0,10 mm.

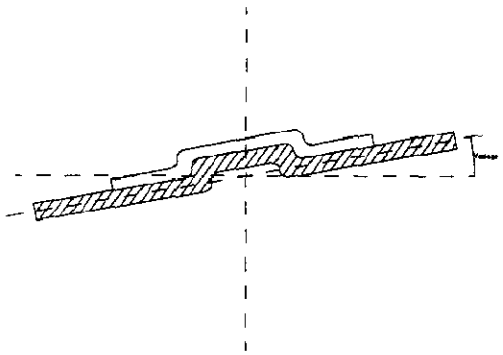
Contrôle du voilage de la meule:

Pour nos essais, nous avons rectifié la meule sur une machine-outil. On a pu obtenir un voilage résiduel de l'ordre de 0,07 mm sur le diamètre extérieur. Avec ce type de procédé, il semble difficile d'obtenir un meilleur résultat. De plus, l'expérience montre que cette valeur de voilage permet d'obtenir des résultats juste suffisants sur les niveaux de vibration en coupe.

Pratiquement, il semble assez difficile de pouvoir atteindre une tolérance de voilage inférieure à 0,1 mm par un procédé de moulage puisque le voilage moyen des meules actuelles est de l'ordre de 0,4 mm.

Contrôle du voilage de montage:

C'est le (ou les) flasque(s) de serrage de la meule qui détermine(nt) le voilage de montage. Le schéma ci-dessous explique comment le voilage du flasque influe sur le voilage total dans le cas d'une meule à centre déportée.



Le flasque de montage est une pièce en acier usinée (soucoupe emboutie soudée sur un écrou). Dans la pratique, cette pièce ne subit aucune rectification et les voilages de montage associé peuvent être importants (de 0,25 à 0,5 mm).

Or cette pièce est destinée à suivre la meuleuse pendant toute sa durée de vie. Étant donné la longévité de ce type d'outil, on court le risque de supporter un outil dangereux juste à cause de ce flasque de serrage, alors qu'une simple opération de tournage permettrait d'éliminer ce voilage de montage à virtuellement zéro.

III.5 Usure de la meule - Conclusion

Une meule est une pièce d'usure, le voilage initial d'une meule neuve est très rapidement retiré avec l'enlèvement des premiers grains abrasifs. En d'autres termes, une meule se rectifie d'elle-même à l'usage. Le problème du voilage des meules n'est donc présent qu'aux premières minutes d'utilisation.

Même si les niveaux de vibrations générés par le voilage de la meule neuve sont importants, le problème est temporaire, il n'est donc pas nécessaire de donner des tolérances de fabrication aux manufacturiers de meules qu'ils ne seront jamais capables d'obtenir.

Par contre, le voilage de montage est un problème qu'il faut résoudre à la fabrication de la meuleuse de manière à éviter de "traîner" un flasque de serrage générant un voilage important (donc des vibrations élevées) pendant toute la durée de vie de l'outil.

IV AUTRES MOYENS DE RÉDUCTION DES VIBRATIONS À VIDE ET EN CHARGE

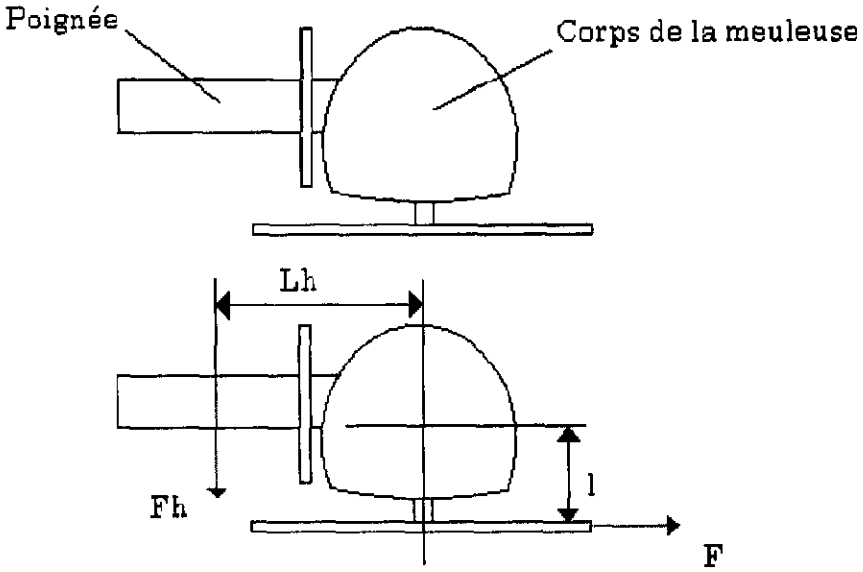
Les moyens de réduction à la source des vibrations requièrent un contrôle des tolérances de fabrication des meules et des meuleuses. Ces moyens précédemment étudiés n'interviennent pas à priori sur les contraintes ergonomiques (et autres) de conception d'une meuleuse sécuritaire.

Il existe d'autres moyens de réduction des vibrations transmises, ce sont l'augmentation des moments d'inertie de la meuleuse et l'utilisation de poignées anti-vibratiles. Ces moyens ne sont pas des moyens de contrôle à la source et risquent de venir à l'encontre des contraintes ergonomiques de conception, notamment au niveau du poids de l'outil. Cependant, il faut en prendre compte pour évaluer l'impact de ces solutions par rapport à la dépréciation ergonomique associée.

IV.1 Moment d'inertie de la meuleuse

IV.1.1 Modèle théorique

D'après Moyen [1], on peut modéliser assez simplement les vibrations transmises à la poignée d'une manière simple et satisfaisante de la manière suivante:



F: force de balourd (N)
ω: vitesse de rotation (rail/s)
J_o: moment d'inertie de la meuleuse
Zh: impédance mécanique de la main
a_{rms}: accélération dans la poignée
Lh: distance du point d'appui de la main par rapport à l'axe de rotation

Le développement du calcul donne:

$$a_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{F \cdot L_h}{\sqrt{J_o^2 + \left(Z_h \frac{L_h^2}{\omega}\right)}}$$

Le terme du dénominateur correspond à la somme quadratique du moment d'inertie de la meule et d'un terme qui correspond rigoureusement au moment d'inertie de la main.

$$J_{main} = Z_h \frac{L_h^2}{\omega}$$

Or, on a vu que pour les vitesses de rotation d'utilisation des meuleuses, la masse dynamique de la main est très faible comparativement à la masse de la meuleuse, on peut donc faire l'hypothèse que le moment d'inertie de la main est négligeable par rapport à celui de la meuleuse.

$J_{main} << J_O$

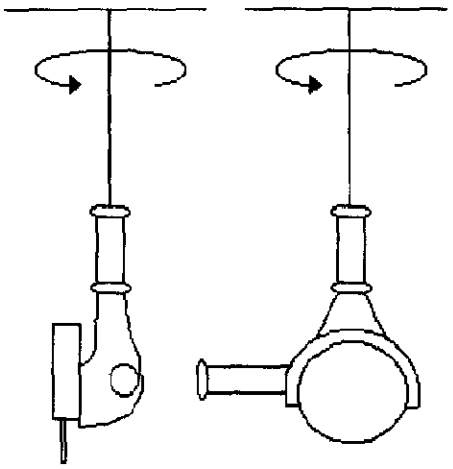
D'où

$$a_{rms} = \frac{F.Lh}{\sqrt{2} \times J_0}$$

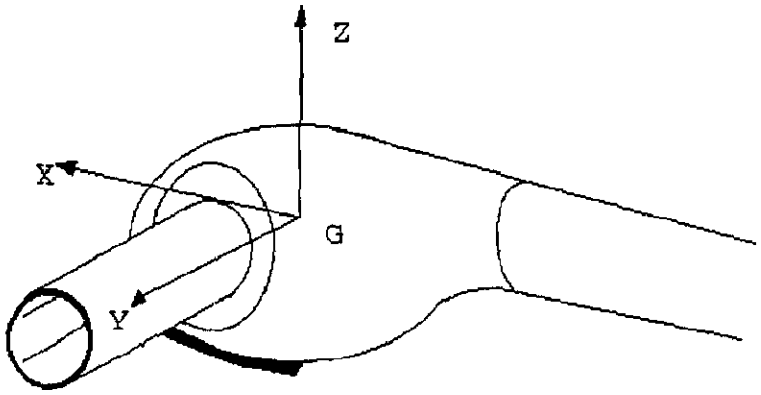
Il est évident que la vibration transmise dans la poignée est directement inversement proportionnelle au moment d'inertie. En terme de niveau de vibration, un doublement du moment d'inertie entraîne une réduction de 6 dB.

IV.1.2 Détermination expérimentale du moment d'inertie

Le moment d'inertie a été obtenu expérimentalement par la méthode de pendaison en mesurant la réponse vibratoire (accélération) lors d'un impact en ce même point.



C'est la méthode qui est employée en analyse modale pour calibrer les réponses en fréquences d'inertance avec un pendule. Les moments d'inertie expérimentaux sont

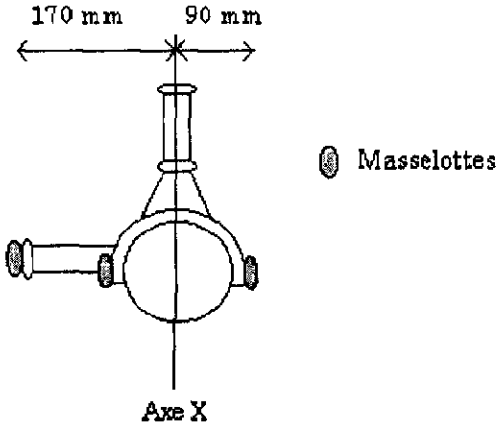


$J_{xy} = 1.38.10^{-2}$ kg m^2 $J_{xz} = 4.36.10^{-3}$ kg.m^2
$J_{x2} = 1.44.10^{-2}$ kg.m^2

IV.1.3 Augmentation du moment d'inertie

Rotation autour de l'axe X

L'augmentation du moment d'inertie de rotation autour de l'axe X (vibration verticale de la poignée) peut se faire facilement en ajoutant des masselottes d'inertie au garde ou à l'extrémité de la poignée.



Les dimensions des bras de levier correspondent à la meuleuse d'essai, mais sont du même ordre de grandeur pour l'ensemble des meuleuses.

Dans les calculs suivants, on considère la masse qu'il faudrait ajouter pour doubler l'inertie de la meuleuse (soit pour obtenir une réduction de 6 dB des vibrations transmises).

Cas 1 - deux masselottes de masse M_1 sur le garde

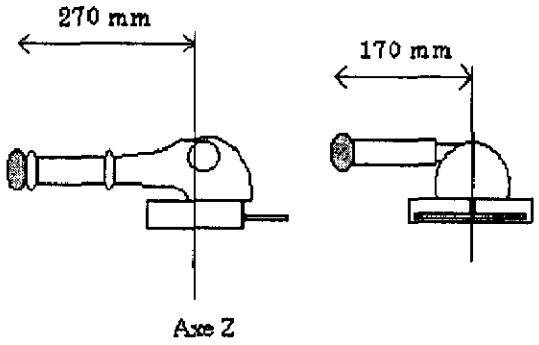
$M_1 = 0{,}270$ kg

Cas 2 - une masselotte de masse M_2 sur l'extrémité de la poignée

$M_2 = 0{,}150$ kg

Rotation autour de l'axe Z

Les positions possibles pour les masselottes sont à l'extrémité des poignées avant et/ou arrière.



Cas 3 - une masselotte M_3 sur l'extrémité de la poignée avant

$M_3 = 0{,}475$ kg

Cas 4 - une masselotte M_4 sur l'extrémité de la poignée arrière

$M_4 = 0{,}260$ kg

Rotation autour de l'axe Y

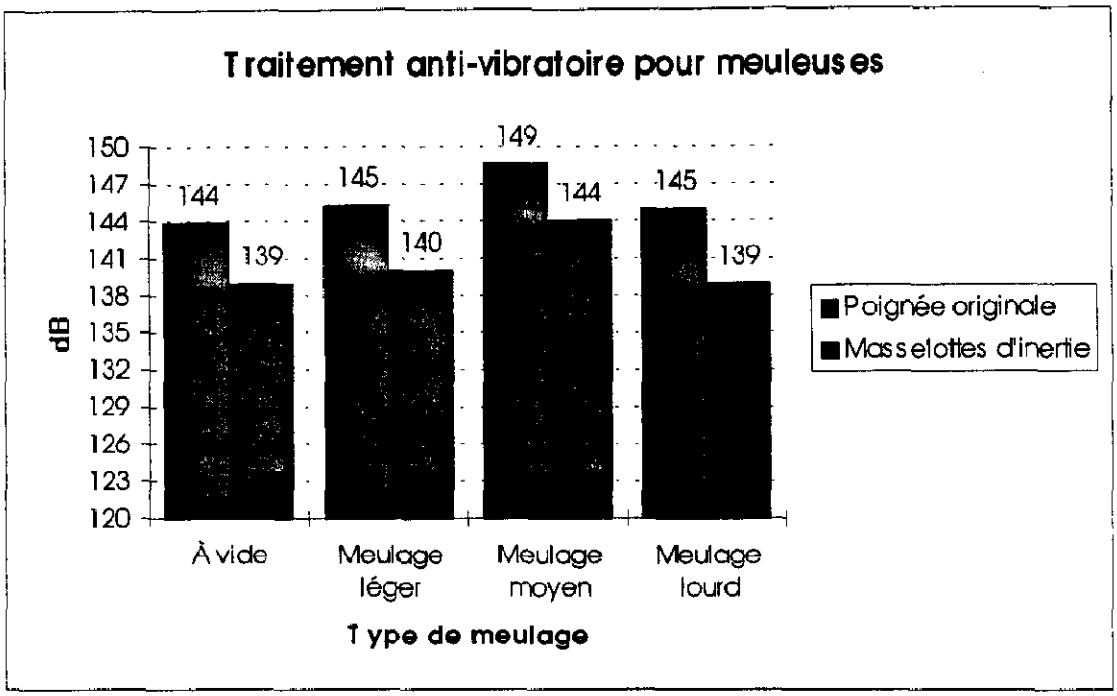
La seule position possible se trouve sur l'extrémité de la poignée arrière.

Cas 5 - une masselotte M_5 sur l'extrémité de la poignée arrière

$M_5 = 0{,}270$ kg

Validation expérimentale

Expérimentalement nous avons placé une masse de 222 g au bout de la poignée avant et une masse de 307 g au bout de la poignée arrière. Les niveaux de vibration à vide et en charge obtenus sont :



Les résultats montrent l'efficacité de la solution puisque avec deux petites masses nous avons pu réduire tous les niveaux de vibration à vide comme en coupe de 5 dB. La solution reste efficace quelques soient les conditions de fonctionnement, quelque soit la meule. Cet expérimentation est un essai exploratoire, car il est possible d'optimiser les positions et les valeurs des masses pour obtenir une atténuation plus importante est appliquant le même principe.

IV.2 Poignée anti-vibratile

IV.2.1 concept de la poignée lourde

La recherche dans la littérature et les brevets n'a pas donné de résultats intéressants. On trouve des études sur les gants anti-vibratiles ou sur les mousses qui recouvrent la poignée. Toutes ces études ne donnent aucun résultat véritablement concret.

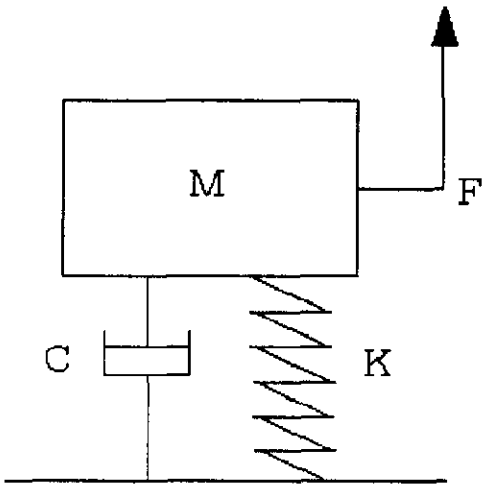
Dans la pratique, les poignées de tenue sont en plastique creux ou en tube d'acier. Si on découple la poignée du reste de la meuleuse, c'est l'ensemble bras/main/poignée qui devient le système à suspendre. Or on sait que la masse dynamique du système main/bras pour les fréquences de fonctionnement sont très faibles. Pourtant si on veut obtenir une bonne isolation par un système élastique (masse, ressort, ...), il faut que le système à isoler ait une certaine masse pour que la plage de fréquence d'isolation soit supérieure à la fréquence d'excitation.

Le concept de la poignée lourde est d'essayer d'isoler la masse la plus élevée possible afin d'obtenir des fréquences de résonance les plus basses possibles avec des plots les moins souples

possibles statiquement (résistance à la charge). Une poignée lourde pourrait être un cylindre plein en acier plutôt qu'un tube.

IV.2.1 Notions d'isolation vibratoires

Supposons une masse M supportée par un système ressort/amortisseur de raideur K et de coefficient d'amortissement d'amplitude F et de pulsation ω excité par un effort perturbateur. On a



La fréquence de résonance du système non amorti est

$$\omega_o = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

et le coefficient de transmission λ

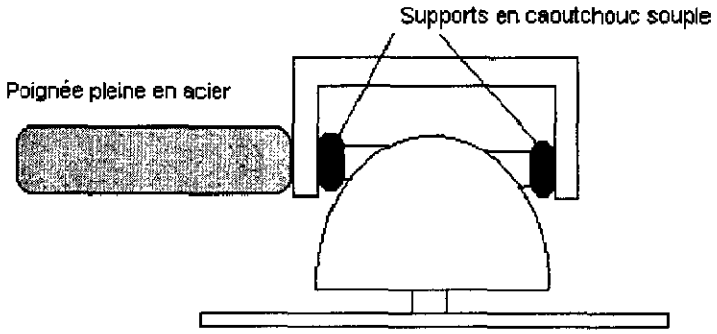
$$\lambda = \sqrt{\frac{1 + 4\,\varepsilon_o^2}{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_o}\right)^2 + 4\,\varepsilon_o^2}}$$

Le principe de toute suspension est que la fréquence d'utilisation de la masse soit dans la zone d'isolation soit $\omega_o > \sqrt{2}\,\omega_o$. Pour ce faire, il faut prendre *K* petit et/ou *M* grand.

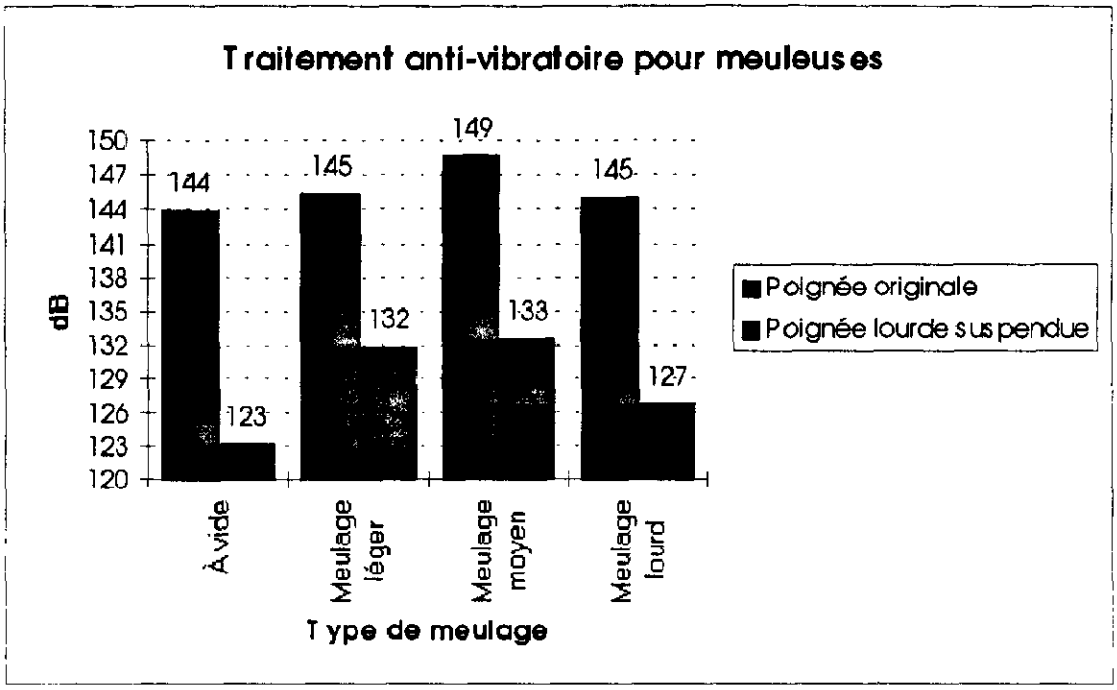
IV.2.2 Application aux meuleuses et validation expérimentale

Pour isoler le système main bras, il faut s'assurer de mettre en présence une masse importante montée sur un ressort mou. Nous avons vu que la masse dynamique de la main à 100 Hz (vitesse classique de fonctionnement des meuleuses) est d'environ 200 grammes et moins. Pour isoler cette masse, il faut au moins intercaler une raideur de manière à obtenir une fréquence de résonance de 70 Hz. La raideur cherchée est donc de 39 kN/m, cette raideur est relativement basse et est difficile à obtenir avec des mousses ou des caoutchoucs de garnissage autour de la poignée.

L'idée que nous avons suivie est d'éliminer le fait que le système main/bras a une masse dynamique faible et en le remplaçant par une masse rigide plus importante : c'est le concept de la poignée lourde. Cette poignée de masse plus importante sera reliée au corps de la meuleuse par des supports les plus souples possibles. Sur ce principe, nous avons réalisé le montage suivant :



Notre système test est une poignée en acier plein avec un arceau aussi en acier. Les supports en caoutchouc ont été choisis les plus souples possibles pour l'isolation et les plus rigides possibles pour pouvoir résister à la pression statique nécessaire au meulage. La masse de la poignée lourde est de 1.1 kg et la fréquence de résonance d'une dizaine de Hertz. Le graphe ci-dessous donne les réductions de vibration dans la poignée obtenues grâce à ce système.



Les réductions obtenues varient de 13 à 21 dB. L'effet est saisissant pour l'opérateur dans le cas de notre meuleuse prototype, celui-ci a eu de la difficulté à moduler le meulage (meulage léger, moyen, lourd) tellement les niveaux de vibrations étaient devenus anormalement bas. L'efficacité de la poignée lourde est très importante même dans le cas du prototype qui n'est pas optimisé.

CHAPITRE 4 : CAHIER DES CHARGES POUR LA RÉDUCTION DU BRUIT ET DES VIBRATIONS DU PROCÉDÉ DE MEULAGE

I- Recommandations pour la réduction du bruit et des vibrations - Cahier des charges

Bruit à vide

Meuleuse pneumatique

Source	Moyen de réduction	Contrôle requis	Réduction attendue
Moteur à palettes	Silencieux réactifs	Conception d'un silencieux adapté	?
	Utilisation d'une turbine	Limiter la puissance de la turbine à celle d'un moteur à palette pour un outil de taille équivalente	jusqu'à 15 dB

Vibration à vide

Meules de toutes sortes

Source	Moyen de réduction	Contrôle requis	Réduction attendue
Balourd	Équilibrage et/ou contrôle de la fabrication	Balourd résiduel inférieur à 250 g.mm/kg	3 à 5 dB

Bruit en charge

Meuleuses et meules plates

Source	Moyen de réduction	Contrôle requis	Réduction attendue
Moteur à palettes	Silencieux réactifs	Conception d'un silencieux adapté	?
	Utilisation d'une turbine	Limiter la puissance de la turbine à celle d'un moteur à palette pour un outil de taille équivalente	jusqu'à 15 dB
Arbre de montage	Contrôle de la tolérance d'ajustement	Ajustement type H9	2 à 5 dB
Forme irrégulière de la meule	Contrôle des tolérances de voilage et d'excentration	0.1 mm de voilage maximum et ajustement de type d9	
Rayonnement de la meule	Meule « sandwich » avec matériau amortissant	5 % d'amortissement	5 à 8 dB

Bruit en charge

Toutes Meuleuses et toutes meules

Source	Moyen de réduction	Contrôle requis	Réduction attendue
Arbre de montage	Contrôle de la tolérance d'ajustement	Ajustement type H9	
Trou de montage de la meule	Contrôle de la tolérance d'ajustement	Ajustement type H9	1 à 5 dB
Balourd de la meule	Équilibrage et/ou contrôle de la fabrication	Balourd résiduel inférieur à 250 g.mm/kg	3 à 5 dB (si contrôle des tolérances

II- Réduction globale réalisable

Nuisances	État actuel	Réduction attendue	État attendu	Sécuritaire ?
Bruit à vide	90 à 100 dB(A)	15 dB	75 à 85 dB(A)	oui
Vibration à vide	140 à 145 dB	3 à 5 dB	135 à 142 dB	non
Bruit en charge				
meule	92 à 95 dB(A)	7 à 13 dB	79 à 88 dB(A)	oui
meuleuse	90 à 100 dB(A)	15 dB	75 à 85 dB(A)	oui
total			80.5 à 89.7 dB(A)	non
Vibration en charge	144 à 148 dB	4 à 10 dB	134 à 144 dB	non

III- Rencontre des objectifs

Bruit :

Le cahier des charges implique principalement un meilleur contrôle de la qualité de fabrication des meules. Les recommandations du cahier des charges ne tiennent pas compte des contraintes des procédés de fabrication des manufacturiers de meules. Mais, étant donné les balourds et les voilages actuels, on peut douter de la difficulté et de l'ampleur du travail à accomplir pour atteindre les objectifs du cahier des charges
Si dans le meilleur des cas, les charges sont rencontrées, le procédé de meulage est à peine sécuritaire au niveau du bruit (89.7 dB(A) à un mètre, soit plus de 90 dB(A) pour l'opérateur), ceci implique qu'un outil même bien conçu ne pourra pas être utilisé sans discontinuer pendant 8 heures.

Vibrations :

Les essais ont montrés que même dans les meilleurs conditions possibles, les niveaux de vibration restent proches de la limite acceptable. Il est donc nécessaire de continuer à travailler sur des systèmes de découplage (poignée anti-vibratile) pour atteindre les objectifs de conditions d'opération sécuritaires.

CHAPITRE 5 : CONCLUSION GÉNÉRALE

Principaux résultats : les sources et les moyens de réduction

- Les sources de bruit du procédé de meulage sont :
  - ⇒ le moteur de la meuleuse
  - ⇒ le voilage et l'excentration des meules plates
  - ⇒ l'ajustement de l'arbre et le voilage du flasque de montage des meules plates

- Les sources de vibrations du procédé de meulage sont :
  - ⇒ le balourd résiduel des meules
  - ⇒ le voilage et l'excentration des meules
  - ⇒ l'ajustement de l'arbre et/ou le voilage du flasque de montage des meules

- Pour chacune de ces sources, on a déterminé les valeurs physiques (dimensions, balourd, ...) à respecter et les réductions du bruit et des vibrations associés

- Travailler uniquement sur les sources de bruit ne semble pas suffisant pour obtenir un procédé de meulage sécuritaire, car :
  - ⇒ pour le bruit, on ne peut pas contrôler le bruit de la pièce usinée
  - ⇒ pour les vibrations, la rencontre des objectifs du cahier des charges ne suffit pas pour assurer des niveaux de vibrations sécuritaires en tout temps

Pistes de solutions : poignée lourde et moments d'inertie

- La transmission des vibrations aux membres supérieurs a été étudiée de manière à aider à la conception de poignées anti-vibratiles efficaces :
  - ⇒ la masse dynamique du système main / bras est trop faible pour isoler les vibrations par recouvrement des poignées avec un matériau souple
  - ⇒ une bonne méthode pour obtenir une isolation performante est d'isoler la poignée par rapport au corps de la meuleuse et non la main par rapport à la poignée
  - ⇒ les niveaux de vibrations des meuleuses peuvent être aussi réduit en augmentant les moments d'inertie de l'outil. Ceci est obtenu en ajoutant des masselottes à des endroits choisis ou pourrait être obtenu en modifiant la répartition des masses lors de la conception d'un nouvel outil.

Originalité de l'étude : Caractérisation de la force de meulage

Au niveau scientifique, une des principales originalité de cette étude est la caractérisation de la force dynamique qui excite à la fois la meule, la pièce meulée (génération de bruit) et le corps de la meuleuse (génération de vibrations). On apprend que :

- Le grain et le liant de la meule n'interviennent pas dans la force de meulage dynamique.
- La force dynamique de meulage provient du fait que la meule « saute » sur la pièce usinée, ces impacts génèrent la force dynamique de meulage.
- Le contact meule sur pièce n'est pas permanent parce que la meule n'est pas plane.
- L'excentration générale ou moyenne de la meule génère une force à la fréquence de rotation et détermine le niveau global de la force de meulage. Cette excentration joue un rôle important sur la génération de vibrations.
- L'excentration aléatoire de la meule intervient sur le contenu spectral et la richesse harmonique du spectre de la force de meulage. Cette excentration joue un rôle important sur la génération de bruit.

Bibliographie

[1] : P. Moyen, « Développement sécuritaire des meuleuses portatives - Étude des mécanismes de bruit - vibrations », Rapport IRSST, Juin 1993

[2] : K. Zaveri, M. Phil, « Measurement of the dynamic mass of the hand-arm system », B&K Technical Review, No 3, 1974, pp 26-36

[3] : Norme ISO 1940, « Qualité d'équilibrage des corps rigides en rotation »

[4] : Norme NF E90-402, « Guide pour l'évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises aux membres supérieurs »

[5] : Mats C. Holmins *ea*, « Vibration damped hand held rotary grinding machine », US Patent 5,125,189, Jun.30,1992

[6] : Makoto, Kanagawa, JP, « Vibroisolirender Handgriff » Deutsches Patentamt, Bundesrepublik Deutchland, DE 33 04 849 A1, November 1983

ANNEXE "E" SUR LA GÉNÉRATION DE POUSSIÈRE

Dans le cadre du projet intitulé :

ANALYSE DES RISQUES ET ÉTUDE DES BESOINS RELATIFS AU PROCÉDÉ DE MEULAGE DANS L'INDUSTRIE LOURDE

par

Guy Perrault et Chantal Dion

Problématique

Les opérations de meulage produisent des poussières dont l'inhalation par les travailleurs peut causer des maladies pulmonaires. Il est donc important que les modifications au procédé de meulage pour le rendre sécuritaire tiennent compte des risques à la santé en contrôlant l'exposition des travailleurs aux poussières selon leur teneur en éléments métalliques ou en silice (SiO_2).

État des connaissances

Les problèmes pulmonaires des meuleurs peuvent être reliés à la composition, la granulométrie et la concentration des poussières provenant de la meule elle-même, de la matrice métallique ou d'autres procédés dans le voisinage du meuleur.

Les publications scientifiques sur la toxicité des poussières de meulage sont centrées sur l'utilisation de meules de métaux durs pour polir les surfaces d'acier, sans usage de liquide de refroidissement. Les meules en métaux durs sont généralement composées de carbure de tungstène dans une matrice de cobalt avec de petits ajouts potentiels de titane, de nickel, de chrome, de niobium, de vanadium, de tantale et de molybdène. Une étude japonaise (1) mentionne l'exposition de ces meuleurs à une concentration moyenne de 1.1 mg/m^3 en poussière totale et de 32 $\mu g/m^3$ en cobalt pour une distribution de diamètre aérodynamique des particules dont la médiane est à 3 μm. L'inhalation de poussières de métaux durs peut induire des pathologies qui sont bien documentées dans la littérature scientifique (2,3). Il s'agit surtout d'asthme, de fibrose pulmonaire et possiblement de cardiomyopathie (maladies qui atteignent le muscle du coeur). La surface d'acier peut ajouter, aux produits dont la meule est constituée, des expositions au fer, au nickel et au chrome. Selon le procédé, l'air ambiant peut contenir de la silice cristalline provenant de meules ou incluse dans l'acier. Quelques références soulignent la possibilité de la nocivité d'autres abrasifs (4).

Les manufacturiers de meuleuses de certains pays (5) développent des moyens d'évaluer les possibilités d'émission de particules nocives provenant de l'utilisation de leurs outils pour garantir la sécurité de leurs machines avant la mise en marché. Les moyens d'élimination à la source par aspiration intégrée ou par aspiration locale sont ordinairement recommandés (6,7) quoique l'efficacité de ces moyens de prévention ne semble pas avoir été documentée dans la littérature scientifique et technique.

Résultats

Trois industries ont été visitées durant la phase préliminaire, la Mil Davie de Lévis-Lauzon (M), la G.E. Hydro de Lachine (G) et l'industrie Ingersoll-Rand de Sherbrooke (I). Du point de vue de l'hygiène industrielle, les visites visaient à recueillir des renseignements sur les caractéristiques réelles de la tâche du meuleur qui peuvent avoir une incidence sur la génération de poussière aéroportée. Il en est ressorti premièrement, des observations sur la nature de la meule, la nature de la surface à meuler et la contiguïté avec les opérations de soudage, et deuxièmement, suite à un échantillonnage et à l'étude des rapports disponibles dans les industries, des informations sur la concentration et la nature des poussières aéroportées.

Observations

Nature de la meule

À toutes fins pratiques, les meuleurs des trois industries visitées utilisaient très souvent des meules composées de corindon (oxyde d'aluminium), de carbure de silicium avec des petites quantités de zircon et de céramique. Aucune de ces industries n'utilisait de meules en métaux durs (cobalt - carbure de tungstène). Pour mieux comprendre l'importance de cet état de fait, notons que les valeurs d'exposition admissible du cobalt, du corindon et du carbure de silicium non fibreux sont respectivement de 0.05, 10 et 10 mg/m^3 ce qui représente des exigences passablement différentes sur le contrôle des émissions de ces différentes poussières.

Nature des surfaces à meuler

En très grande majorité, le meulage se faisait sur de l'acier inoxydable avec moins de 5% du temps sur acier doux ou sur du matériel de coulée.

Contiguïté avec les opérations de soudage

La caractéristique prépondérante de la tâche du meuleur est la présence constante d'opérations de soudage dans son environnement immédiat. Dans certaines industries, certains meuleurs font aussi du soudage. Mais, de toute façon, le meulage et le soudage se font toujours plus ou moins simultanément. Il s'ensuit la possibilité de l'exposition du meuleur à mélange de poussière de meulage et de fumée de soudage. Dans au moins une industrie, le programme de santé identifie que l'exposition à la fumée de soudage est un danger qui nécessite une surveillance médicale et environnementale.

Autres

Dans cette phase, nous avons pu observer que des équipements de protection respiratoire (Masque Racal) et de ventilation à la source étaient parfois disponibles. Mais nous n'avons pu conclure sur l'efficacité d'utilisation de ces moyens de protection.

Poussières aéroportées

Concentration

Les résultats de concentrations de poussières et fumées échantillonnées selon les pratiques de l'IRSST ou recueillies au cours des années par le personnel des différentes industries sont résumés au tableau 1. En tenant compte de la nature des meules qui sont composés principalement de corindon et de carbure de silicium, ces résultats doivent être interprétés en fonction de valeurs d'exposition admissibles de 10 mg/m^3 (7). Toutefois, dans un contexte ou la fumée de soudage serait le contaminant prépondérant, il faudrait interpréter les résultats en se référant à la norme des fumées de soudage à 5 mg/m^3.

Tableau 1. Concentration moyenne (mg/m^3) des poussières totales, en poste fixe, aux postes de meulage.

Industrie	M	G	I
Résultats de l'industrie	0.76±0.30* (16)	3.2 ±2.2 (?)	2.0 (1)
Résultats de l'IRSST	2.38±0.38 (10)		

( ) : nombre d'échantillons

* : à différents postes de travail

Composition

Une caractérisation par diffraction des rayon x et microscopie à lumière polarisée a confirmé la présence dans les poussières aéroportées, de corindon (Al_2O_3), de magnétite ($FeFe_2O_4$), magnésioferrite ($MgFe_2O_4$), de peu de quartz (SiO_2), de fer et possiblement de carbure de silicium.

En microscopie électronique à transmission, deux échantillons de l'industrie M ont donné l'analyse élémentaire suivante d'une centaine de particules : 70% Fe,Si,Mn et 26% Fe,Si,Mn,Ti. La moyenne géométrique du profil des particules étaye de 0.8 μm. Aucune fibre de carbure de silicium n'a été détectée. Le diamètre des particules est plutôt indicatif de fumée de soudage plutôt que de poussière de meulage. Toutefois, la présence simultanée du Mn avec le Fe et le Si est habituellement un marqueur de fumée de soudage quoique l'absence totale de Cr et de Ni en soudage d'acier inoxydable soit difficile à expliquer.

Conclusion et recommandation

Selon les données recueillies, la concentration de poussière durant les opérations régulières de meulage se situe entre 1 et 3 mg/m^3. Cette exposition est un mélange de poussière de meulage et de fumée de soudage.

En absence de cobalt, de silice cristalline, de fibre de carbure de silicium et de Cr ou Ni dans les poussières, les fumées de soudage représentent le risque prioritaire du point de prévention des maladies pulmonaires. Toute modification au procédé de meulage devrait éviter d'introduire de contaminants fibrogènes ou cancérogènes ou d'augmenter la concentration de poussière aéroportée.

Bibliographie

1. KUSAKA, Y., KUMAGAI, S., KYONO, H., KOHYAMA, N. and SHIRAKAWA, T. "Determination of Exposure to Cobalt and Nickel in the Atmosphere in the Hard Metal Industry" Ann. Occup. Hyg. 36(5), 497-507 (1992).

2. PARKES, W.R. "Occupational Lung Disorders" -2nd ed. Butterworth & Co (Publishers) Ltd, pp.464-466 (1982).

3. CUGELL, D.W. "The Hard Metal Diseases" Clinics in Chest Medicine 13(2):269-279 (1992).

4. WEGMAN, D.H. "Causes of Death Among Employees of a Synthetic Abrasive Product Manufacturing Company" J. Occup. Med. 23(11), 748-754 (1981).

5. HALL, D.J., EMMOTT, M.A. AND SCHOFIELD, C. "The Performance of Test Cabins for Assessing Particle Emissions from Machines-A Theoretical Study Using a Numerical Model" Ann. occup. Hyg. 36(4):407-424 (1992).

6. MAHIEU, J.-C. "Préparation des Surfaces Métalliques: Décapage - Dégraissage - Polissage" Cahier des notes documentaires N°118, 73-82 (1985).

7. International Labour Office "Encyclopedia of Occupational Health and Safety" pp. 848-849 et 982-983 (1989).

8. Règlement sur la qualité du miieu de travail. S-2.1, r.15 dernière modification 15 février 1990.

ANNEXE F

ERGONOMIE

Rédigée par
Chantal Tellier,
ingénieure et ergonome
au Programme sécurité-ingénierie

et

Cécile Collinge,
ingénieure et ergonome
au Programme sécurité-ergonomie
à l'IRSST

Dans le cadre du projet, intitulé : "Analyse des risques et étude des besoins relatifs au procédé de meulage dans l'industrie lourde"

TABLES DES MATIÈRES

Pages

0. INTRODUCTION 1

1- MÉTHODOLOGIE 3
1.1 Analyse des données d'accidents 3
1.1.1 Analyse des données d'accidents graves et mortels 3
1.1.2 Analyse des données d'accidents des entreprises participantes 4
1.2 Entretien et observation préliminaire en usine 5
1.3 Construction d'outils d'observations de postes de travail 5
1.4 Entretiens et observations systématiques en usine 6
1.5 Groupes de discussions ("focus group") 9
1.6 Évaluation comparative (benchmarking) 10

2. RÉSULTATS 13
2.1 Description générale de la situation de travail 13
2.2 Analyse des accidents 14
2.2.1 Analyse des accidents graves et mortels 14
2.2.2 Analyse des rapports d'accidents des entreprises 17
2.3 Analyse de la situation de travail 20
2.3.1 Analyse des postures de travail et des efforts en situation de travail 20
2.3.2 Analyse des postures de travail et des efforts déployés lors de l'évaluation comparative 29
2.3.3 Utilisation des outils et leurs modifications 29
2.3.4 Utilisation des outils lors de l'évaluation comparative 34
2.3.5 Utilisation des équipements de protection individuelle 36
2.4 Analyse des besoins des meuleurs 38

3- CONCLUSION 41

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Pages

Figure 1 Meulage au plafond 24

Figure 2 Meulage d'une surface horizontale 25

Figure 3 Meulage d'une surface verticale 26

Figure 4 Meulage pour enlever les projections (spots) de soudure, nettoyer les soudures 27

Tableau 1 Principales caractéristiques des entreprises visitées 5

Tableau 2 Entreprises visitées lors des visites approfondies 7

Tableau 3 Principales caractéristiques concernant les accidents graves et mortels 16

Tableau 4 Type d'accident survenu aux meuleurs pour les années 1992-1995 18

Tableau 5 Type de blessure et siège de la lésion pour les meuleurs de 1992 à 1995 19

Tableau 6 Répartition du temps (%) de travail en fonction de la façon de travailler avec les différents types de meuleuses 33

Tableau 7 Répartition du temps (%) de travail en fonction de la position des mains du travailleur sur la meuleuse 34

Tableau 8 Présence des poignées sur les meuleuses en fonction du type de meuleuses. . . . 34

Tableau 9 Équipements de protection individuelle 37

Tableau 10 Principaux besoins exprimés 39

Répertoire des grilles d'analyses utilisées 45

Grille # 1 Analyse sommaire des accidents graves

Grille # 2 Données générales concernant l'établissement

Grille # 3 Données sur le procédé de meulage

Grille # 4 Données sur les équipements de protection individuelle

Grille # 5 Données sur les postures de travailleurs lors du meulage

Grille # 6 Tableau pour l'analyse des enregistrements vidéo des postes de travail

Grille # 7 Variables à considérer à partir des enregistrements vidéo pris lors du benchmarking

Tableau # 1 Compilation des résultats de l'évaluation comparative en ce qui concerne les postures, les efforts, la méthode de préhension et la méthode de travail.

0. INTRODUCTION

Le projet sur l'analyse des risques et l'étude des besoins relatifs au procédé de meulage[1] a été réalisé dans un cadre multidisciplinaire comprenant une composante ergonomique. Les deux objectifs principaux du projet étaient :

1. d'établir une base de connaissances par l'analyse de la situation existante en termes de risques à la santé et à la sécurité du travail;
2. de déterminer l'ensemble des besoins des différents utilisateurs et l'ensemble des contraintes du procédé pour en arriver à proposer des avenues de solutions ainsi que des priorités de recherche concernant les meules[2], les meuleuses et les procédés.

C'est dans cet ensemble que se situe l'intervention des ergonomes. Ainsi, les objectifs principaux de l'analyse ergonomique étaient les suivants :

1. comprendre la situation de travail propre au procédé de meulage dans l'industrie lourde, dont les éléments suivants : les activités de travail, les risques inhérents au meulage, les postures, les efforts, l'adéquation entre les outils et le travail à faire, ainsi que les équipements de protection individuelle;
2. déterminer l'ensemble des besoins des différents utilisateurs en ce qui a trait aux aspects ergonomiques.

Ce document contient d'abord une présentation de la méthodologie employée comprenant des analyses d'accidents et ergonomique, des observations, des entretiens de groupes, et une évaluation comparative. Les principaux résultats sont ensuite présentés. Ils comprennent les résultats de l'analyse d'accidents et ceux de l'analyse ergonomique des situations de travail. L'analyse des situations de travail inclut, entre autres, l'analyse posturale, des efforts et des méthodes de travail, ainsi que l'analyse de l'utilisation des outils et des équipements de protection individuelle.

---

[1] Collinge, Lemay, Wojtowicki, Tellier, Benoît, Charron, Gauthier, Nicolas, Perreault, "Analyse des risques et étude des besoins relatifs au procédé de meulage dans l'industrie lourde", IRSST, 1997.

[2] Définition des termes. Dans ce texte le terme "**meule**" signifie la pièce d'abrasifs agglomérés tournant lors du meulage et opérant par enlèvement de matière, le terme "**meuleuse**" signifie la machine manuelle à meuler, alimentée par une énergie (électrique ou pneumatique) servant à faire tourner la meule, le terme "**meulage**" signifie l'action de meuler ou le procédé lui même et le terme "**meuleur**" représente le travailleur qui effectue le procédé de meulage. Tous les meuleurs rencontrés sont des hommes et nous utiliserons donc le masculin lorsque nous parlerons de ces travailleurs dans ce texte. Toutefois, cela ne signifie pas que des femmes ne pourraient réaliser ce type de travail.

1- MÉTHODOLOGIE

Dans le cadre de ce projet, la méthodologie du volet ergonomique s'est la plupart du temps intégrée à la méthodologie d'ensemble du projet. Certaines activités méthodologiques présentées ici sont donc également rapportées dans d'autres sections du rapport synthèse et dans d'autres annexes à ce rapport synthèse.

Les principales réalisations ayant contribué à l'analyse ergonomique et aux résultats présentés ci-après sont les suivantes :

1. l'analyse de données d'accidents graves et mortels, provenant de la CSST;
2. l'analyse de données d'accidents des entreprises participantes;
3. des entretiens et des observations préliminaires en usine;
4. la construction d'outils d'observation de postes de travail (grilles);
5. des visites d'usines avec observations de postes de travail et entretiens avec des meuleurs et autres membres clés de l'organisation;
6. des groupes de discussions ("focus groups") avec des intervenants des organisations connaissant le procédé de meulage;
7. une évaluation comparative des meuleuses et des meules.

1.1 Analyse des données d'accidents

1.1.1 Analyse des données d'accidents graves et mortels

Une analyse des accidents graves et mortels a été réalisée afin de déterminer les principaux problèmes qui sont à l'origine de ces accidents. Elle visait également à connaître les conditions de travail ainsi que les activités réalisées au moment de l'accident.

Afin d'obtenir la description détaillée des accidents graves, la base de données VREN de la CSST a été utilisée. Cette base de données contient les rapports d'enquêtes d'accidents graves et mortels, effectuées par les inspecteurs de la CSST.

Une mise en garde s'impose en ce qui a trait à cette base de données d'accidents. Il est important de noter que la structure même de la base VREN permet d'identifier les accidents liés au meulage uniquement dans deux cas. Premièrement, les accidents qui ressortent sont ceux où l'accidenté porte officiellement le titre de meuleur, ce qui n'est pas le cas pour la très grande majorité des ouvriers qui font du meulage. Deuxièmement, ressortent les accidents où la meule ou la meuleuse est directement l'agent causal de la blessure, mais pas nécessairement de l'accident. Si, par exemple, un journalier subit des fractures multiples en tombant de la structure où il est juché pour meuler, cet accident ne ressortira pas. Ainsi, il est fort probable qu'il existe d'autres accidents graves ou mortels associés au meulage qui n'ont pas émergé de cette base de données sur les accidents.

Afin d'avoir un échantillonnage le plus important possible, les vingt dernières années (de 1975 à 1995) ont été retenues pour la sélection des rapports d'accidents. Ces rapports d'enquêtes d'accidents devant absolument rester confidentiels, les données s'y trouvant ont été dépersonnalisées avant d'être remises au groupe de recherche.

Une grille a été élaborée pour analyser ces accidents. Cette grille permet de relever et de consigner les informations les plus importantes contenues dans ces rapports d'enquêtes, qui peuvent parfois avoir plus de 45 pages.

Cette grille est divisée en plusieurs sections. Les deux premières sections caractérisent l'entreprise ainsi que le travailleur. Les trois sections suivantes définissent et expliquent l'accident. On y consigne : le type d'accident, sa description ainsi que ses causes répertoriées par l'inspecteur. Les sections suivantes servent à colliger les données sur le type de blessure ainsi que le type de meuleuse et de meule utilisées. La dernière section comprend les commentaires de l'analyste sur sa perception de l'accident.

Une copie vierge de cette grille se retrouve dans le "Répertoire des grilles d'analyses utilisées" situé à la fin de ce document (Grille #1 : Analyse sommaire des accidents graves).

1.1.2 Analyse des données d'accidents des entreprises participantes

Une analyse des accidents survenus dans les entreprises participant au projet de recherche a été réalisée. Cette analyse avait pour but :

1. de tracer un portrait général des types d'accidents se produisant lors du meulage;
2. d'identifier certains facteurs caractérisant ces accidents, dont l'activité au moment de l'accident et la blessure;
3. de déterminer les principaux risques inhérents au procédé de meulage.

Pour réaliser cette analyse, on a demandé aux usines participantes de fournir leurs descriptions des accidents survenus entre 1992 et 1995 inclusivement. Les données recueillies prenaient différentes formes :

1. statistiques d'analyses d'accidents pour les meuleurs;
2. formulaires de déclaration d'accident rapportés à la CSST, toujours pour les années 1992 à 1995 inclusivement;
3. formulaires d'enquête d'accident maison.

Les données recueillies ont été compilées et analysées. Cette analyse a permis de faire ressortir certaines caractéristiques sur les types d'accidents, sur l'activité au moment de l'accident et sur la blessure.

1.2 Entretien et observation préliminaire en usine

Dans le cadre de ce projet, plusieurs visites ont été effectuées par les membres du groupe de recherche. Tout d'abord, des visites préliminaires ont été réalisées dans cinq usines par l'ensemble du groupe de recherche. Elles avaient trois objectifs principaux :

1. présenter le projet aux différents intervenants des usines participantes;
2. recueillir des informations sur l'usine, les procédés, les outils et leur utilisation, leur entretien, les procédures d'achat ainsi que sur les accidents et la prévention - dans le but de faciliter la cueillette de ces informations et le déroulement de la visite, la personne responsable de la santé et de la sécurité dans l'usine avait d'ailleurs reçu à l'avance une liste des informations et des documents requis pour la réalisation du projet;
3. se familiariser avec l'activité de travail et recueillir des informations pour préparer les grilles d'observations des postes de travail utilisées lors des visites subséquentes en usine.

Les cinq usines visitées étaient représentatives du secteur de l'industrie lourde (voir tableau 1).

Tableau 1 Principales caractéristiques des entreprises visitées

Date	Région	Nom de l'entreprise	Type de produits
94-11-01	Lévis	Mil Davie	Construction navale
94-11-15	Sorel	Gec Alsthom	Turbines hydroélectriques
94-12-08	Sherbrooke	Ingersoll Rand	Équipements de pâtes et papiers
95-01-25	Lachine	GE Hydro	Turbines hydroélectriques
96-02-12*	Lachine	Dominion Bridge	Structure de ponts

* L'usine Dominion Bridge s'est ajoutée au groupe en cours de projet

1.3 Construction d'outils d'observations de postes de travail

Suite aux observations de tâches effectuées par des meuleurs et à l'enregistrement vidéo de quelques situations de travail lors des visites préliminaires dans les cinq usines participantes, des grilles d'observations ont été élaborées afin de faciliter la prise de données lors des visites approfondies en usine. Plusieurs grilles ont été élaborées, chacune ayant un but bien spécifique. Une copie de ces grilles est fournie dans le "Répertoire des grilles d'analyses utilisées" situé à la fin de ce document.

Une première grille a été conçue pour rassembler les données générales concernant l'entreprise visitée, soit : le nombre d'employés (production, entretien, etc.), les horaires de travail, la production annuelle, les différents départements, l'organisation du département de SST, etc. (Grille # 2 dans le répertoire).

Une deuxième grille a été réalisée afin de déterminer les différents types de procédés de meulage employés par l'entreprise. Cette grille comprend une série de questions mise au point afin d'obtenir, de diverses sources dans l'usine, des renseignements sur les postes de travail, les méthodes de travail, les particularités des différents procédés de meulage, le degré de précision requis, les critères de qualité, etc. (Grille # 3 dans le répertoire).

Une troisième grille a été élaborée afin d'obtenir des renseignements sur les équipements de protection individuelle requis pour le travail de meulage. En plus de déterminer les différents équipements utilisés, cette grille permet également de connaître les principaux problèmes reliés au port d'équipements de protection par les travailleurs (Grille # 4 dans le répertoire).

Une quatrième grille a été mise au point afin de caractériser les postures de travail lors du meulage (Grille # 5 dans le répertoire). Cette grille est séparée en deux parties. La première partie permet de recueillir des données sur le type de pièces meulées, la meuleuse et la meule utilisées ainsi que la position du travailleur (au sol, grimpé sur la pièce, monté sur un escabeau, etc.) pour meuler. La deuxième partie permet de décrire les postures utilisées lors des différentes activités de travail, la localisation et l'évaluation des efforts requis ainsi que la direction du mouvement et de la poussée sur la meuleuse, ceci en fonction du temps. La caractérisation de la posture est divisée en deux grands groupes : la posture du dos et des membres supérieurs, puis la posture des membres inférieurs. Chaque groupe est divisé en six postures types (voir schéma sur la grille d'observation). La localisation de l'effort et l'évaluation de l'effort permettent de qualifier l'importance de l'effort fourni par le meuleur.

1.4 Entretiens et observations systématiques en usine

La quatrième étape de la méthodologie a consisté en une série de visites plus approfondies en usines. Ces visites avaient pour but de :

1. connaître et comprendre les opérations et les activités associées au meulage ainsi que la terminologie et le langage du milieu, qui sont souvent fort différents de ceux qu'on retrouve dans la littérature, chez les fabricants ou les fournisseurs;
2. faire l'analyse ergonomique des différentes situations de travail en fonction des particularités de chacune (procédés, qualité attendue, autres types d'activités reliées à la tâche, formation reçue, etc.);
3. analyser en particulier les postures et les efforts impliqués lors du meulage ainsi que les principales manipulations;

4. connaître les équipements de protection individuelle (EPI) recommandés par les entreprises, ceux qui sont obligatoires et ceux qui sont fournis, se renseigner sur leur taux d'utilisation ainsi que sur les raisons qui motivent une utilisation partielle;
5. recueillir différents besoins fonctionnels, liés à l'ergonomie et à la sécurité.

Ces visites ont été faites dans trois des cinq usines sélectionnées au départ, les autres usines n'étant pas disponibles pour ces visites approfondies. Le tableau 2 donne une liste de ces usines.

Tableau 2 Entreprises visitées lors des visites approfondies

Date	Région	Nom de l'entreprise	Type de produits
96-03-20 et 96-03-21	Lévis	Mil Davie	Construction navale
96-03-27	Lachine	GE Hydro	Turbines hydroélectriques
96-03-18, 96-03-28 et 96-04-10	Lachine	Dominion Bridge	Structure de ponts

Lors de cette seconde série de visites, nous avons procédé à des observations systématiques des différentes tâches et des différents types de travail que peut avoir à faire un meuleur. En effet, nous demandions au coordinateur en santé-sécurité de chaque usine de faire en sorte que nous puissions observer tous les types d'activités ou de tâches qu'un meuleur peut réaliser, en fonction du type de pièce à meuler ou de l'outillage utilisé. Lors de ces observations, les grilles d'analyse ergonomique (Grilles # 4 et # 5 dans le répertoire) développées spécifiquement pour ce projet ont été utilisées pour recueillir les données à analyser subséquemment.

En plus d'observer les meuleurs, les ergonomes ont réalisé des enregistrements vidéo de toutes les tâches étudiées, principalement dans le but d'analyser les postures, de qualifier les efforts et d'étudier l'utilisation de l'outil (garde, poignée, etc.). Par la suite, une grille d'analyse de ces enregistrements vidéo a été élaborée afin de colliger les informations contenues dans ces bandes vidéo et de les analyser.

Cette grille (Grille # 6 dans le répertoire) est divisée en deux parties. La première contient des renseignements généraux sur le meulage effectué, le type de pièce meulée, la meuleuse et la meule utilisées, etc. La deuxième partie permet de décrire en détail le travail effectué par le meuleur. En effet on y caractérise la posture du corps, la posture des membres supérieurs, la position des mains sur la meuleuse, la localisation de l'effort, l'évaluation de l'effort, la difficulté de la posture du meuleur ainsi que le type d'endroit où celui-ci meule (restreint, espace clos, etc.).

Il est à noter que cette grille d'analyse des enregistrements vidéo a davantage été utilisée pour l'analyse des postures et des efforts que la grille # 5 intitulée "Données sur les postures". En effet, la grille # 5, élaborée avant les observations systématiques des visites approfondies, nécessitait le

recueil d'un haut niveau de détail des postures et des efforts, niveau difficile à atteindre dans les conditions réelles d'observations et d'enregistrements vidéo. Cette difficulté a motivé la construction et l'emploi de la grille # 6. Cette grille comprend six critères détaillés comme suit :

1- **la posture générale,** c'est-à-dire : debout, assis, accroupi, à genoux, couché;

2- **la posture du tronc,** c'est-à-dire : en flexion vers l'avant, en torsion, en extension ou le dos droit;

3- **la posture des membres supérieurs (bras),** c'est-à-dire : plus haut que la hauteur des épaules, vers l'avant, vers le bas ou les bras pliés;

4- **l'effort déployé** : les différents efforts observés ont été regroupés en 3 classes : faible, modéré et important. Un effort est dit faible lorsqu'il n'implique que la main et le bras. Il est dit modéré lorsqu'il implique la main, le bras, l'épaule et le tronc (peu sollicité). Il est dit important lorsqu'il implique la main, le bras, l'épaule, le tronc (très sollicité) et même parfois tout le reste du corps. Il faut toutefois noter que ces efforts sont caractérisés en fonction du contexte général du travail qui est toujours relativement exigeant pour le meulage. L'effort a été qualifié de faible, modéré ou important pour ne pas encombrer le texte de superlatifs (important, très important, très très important). Ainsi, même si un effort est dit faible, il est quand même contraignant étant donné le type de tâche exécutée.

5- **la qualité de l'espace,** c'est-à-dire : endroit restreint, endroit non restreint. Un endroit est dit restreint si le travailleur est limité dans ses mouvements (plafond bas, ne peut marcher debout, travaille à l'intérieur d'une pièce, etc.). Un endroit non restreint implique que le travailleur a peu de contrainte d'espace de travail.

6- **la difficulté de la posture** : elle est regroupée en 3 classes : facile, moyennement difficile, difficile. Comme pour les efforts déployés, les postures sont caractérisées en fonction du contexte de travail. Ainsi, même si une posture est dite facile, elle est tout de même contraignante, car étant donné les efforts déployés pour diriger la meuleuse voire pour la soutenir ou la porter, ce type de tâche demeure exigeant physiquement dans toutes les situations.

   Posture facile : le travailleur est debout ou assis sur un "siège" (boîte, petit banc). Ses bras sont placés devant lui, sous le niveau de son coeur ou vers le bas. Il n'a pas trop de contraintes au niveau du tronc (tronc droit ou légèrement fléchi vers l'avant, pas de torsion importante). Il n'est pas dans un endroit restreint le contraignant à adopter une posture trop statique.

   Posture moyennement difficile : le travailleur peut être à genoux, debout, accroupi. Ses bras peuvent être par moments au-dessus de la tête. Il a une contrainte au niveau du tronc (torsion, très penché vers l'avant). Il est parfois dans un endroit restreint.

Posture difficile : le travailleur est à genoux, accroupi, assis sur un appui, couché. Ses bras sont souvent placés au-dessus de la tête. Il a une contrainte importante au niveau du tronc (dos en extension, torsion importante). Il peut être dans un endroit restreint.

Dans les usines, les ergonomes se sont également entretenues avec les meuleurs, afin de connaître et de comprendre les particularités de leur tâche ainsi que les problèmes reliés à leur métier. Les contremaîtres, les responsables en SST ainsi que les représentants syndicaux ont été rencontrés afin de connaître leurs perceptions des principaux problèmes reliés au procédé de meulage ainsi que leurs besoins.

Lors de la visite chez MIL Davie, les ergonomes du groupe de recherche ont assisté à une formation donnée aux meuleurs sur le procédé de meulage, la sécurité lors du meulage, les équipements de protection à utiliser ainsi que les différentes qualités de meulage. La formation s'est terminée par un cours pratique en atelier. Les formateurs évaluaient, à la fin du cours, les connaissances acquises ainsi que les habiletés pratiques.

1.5 Groupes de discussions ("focus group")

Des groupes de discussions, fréquemment appelés "focus groups", ont été mis sur pied afin de valider et de compléter les informations déjà recueillies lors de la revue de la littérature, des entretiens et des observations en usine. Cette approche est souvent utilisée en combinaison avec d'autres outils de recherche des besoins afin de valider les observations déjà obtenues. Les discussions ont couvert l'ensemble des disciplines impliquées dans ce projet de recherche.

Pour ce projet, trois groupes de discussions ont été formés avec des intervenants provenant de trois entreprises. Les trois usines ayant accepté de participer à cette démarche sont celles qui ont reçu le groupe de recherche pour les visites approfondies (voir tableau 2).

Le premier groupe de discussions était formé de meuleurs d'expérience, le deuxième des responsables de l'entretien des meuleuses et le troisième de contremaîtres et de responsables de la SST. Dans chacun de ces groupes, animés par un membre du groupe de recherche, la méthodologie utilisée était basée sur la recherche des problèmes, des besoins et des solutions. Voici les principaux thèmes de discussions, dont l'importance relative variait selon la composition de chaque groupe :

- caractéristiques des meuleuses et des meules;
- environnement de travail et ingénierie des procédés;
- activités de travail, efforts, postures et autres caractéristiques;
- organisation du travail;
- entretien des meuleuses et sources d'énergie;
- processus d'achat des meuleuses, des meules et des accessoires;
- accidents, incidents, "passer proche";
- formation et pratique sécuritaire;

- accessoires, équipements de protection individuelle;
- nouveautés à tester et améliorations.

1.6 Évaluation comparative (benchmarking)

Afin d'évaluer et de comparer entre elles les principales caractéristiques des meules et des meuleuses existantes, des activités d'études comparatives (benchmarking) ont été réalisées. Deux méthodes de comparaisons ont été utilisées : les essais comparatifs et les sondages comparatifs. Les essais comparatifs consistaient à mesurer certaines caractéristiques (généralement des spécifications fonctionnelles) sur plusieurs meuleuses, plus spécifiquement les niveaux de bruit émis et les niveaux de transmission de vibrations en opérations (voir annexe D au rapport synthèse sur le procédé de meulage). Les essais comparatifs ont également permis d'évaluer, à partir d'enregistrements vidéo, certaines caractéristiques ayant trait à l'ergonomie, telles que la posture, l'effort et la méthode de travail. Les sondages comparatifs consistaient à recueillir la perception des meuleurs quant au niveau de satisfaction d'un besoin qu'offre une machine par rapport à d'autres. Plus d'une trentaine de caractéristiques ont été comparées par les meuleurs participants (voir annexe G au rapport synthèse sur le procédé de meulage).

Six modèles de meuleuses, trois meuleuses verticales et trois meuleuses à angle, ont été comparées sur quatre bancs d'essais. Deux bancs d'essais servaient à tester le meulage d'un acier dur, les deux autres le meulage d'un acier mou. Pour chacun des aciers, deux configurations ont été montées : une position basse, où l'ouvrier meule une surface horizontale située à environ 75 cm du sol, l'autre en position haute, où le travailleur meule au plafond au-dessus de sa tête. Quatre meuleurs ont participé à cette étude. Au total, 96 essais ont eu lieu. Il s'agit de toutes les combinaisons possibles avec :

- deux types de meuleuses et trois meuleuses de chaque type,
- deux aciers,
- deux configurations de poste et
- quatre meuleurs.

Les enregistrements vidéo des 96 essais ont servi à l'analyse ergonomique des postures, des efforts et de la méthode de travail.

Chaque meuleur réalisait la routine suivante : pour chacune des trois meuleuses d'un même type, il meulait 2 minutes en position basse, puis il répondait au sondage sur ce qu'il venait de faire; ensuite, toujours pour les trois mêmes meuleuses, il meulait une minute en positon haute et il répondait au sondage sur ces trois derniers essais. Cette séquence a été réalisée quatre fois (pour les deux types de meuleuses, verticales et à angle, et deux types d'acier, dur et mou) par chacun des quatre ouvriers, spécialistes du meulage (voir figure 4.19 de l'annexe G du rapport synthèse).

Deux meules devaient être testées sur chacune des six meuleuses. Cependant, des incompatibilités meules-meuleuses (en termes de diamètres d'arbre, de vitesse de rotation ou d'outils de serrage) n'ont pas permis d'évaluer deux meules par meuleuse. Une seule meule par meuleuse a donc fait l'objet de

l'évaluation et aucune comparaison de meule n'a pu être réalisée.

Le détail de la méthodologie utilisée pour l'évaluation comparative est présenté à l'annexe G du rapport synthèse sur le procédé de meulage.

Une grille d'analyse des "Variables à considérer à partir des enregistrements vidéo (Benchmarking)", pris lors de cette évaluation comparative, se retrouve dans le "Répertoire des grilles utilisées", à la fin de ce document. Cette grille a également servi à compiler l'ensemble des données recueillies, à partir de ces enregistrements vidéo, sur les postures, les efforts et la méthode de travail des meuleurs.

2. RÉSULTATS

2.1 Description générale de la situation de travail

Le meulage consiste à enlever des particules d'une pièce, par abrasion, à l'aide d'une meule. Cet enlèvement de matière peut avoir différents objectifs; on parlera alors de différents procédés de meulage.

Parmi ceux-ci, mentionnons le tronçonnage (ou sciage), l'ébarbage (débarrasser une surface des aspérités ou des bavures), le rainurage (faire une cannelure ou une entaille), le surfaçage (polir une surface), etc. Parmi tous ces procédés répertoriés dans la littérature, les plus fréquemment rencontrés dans la pratique sont sans aucun doute l'ébarbage et le surfaçage. En fonction du type d'entreprise et des produits fabriqués, les pièces à meuler peuvent être constituées de différents matériaux (acier, béton, pierre, fibre-ciment, etc.). Dans le cadre de ce projet, les pièces meulées étaient toutes en acier.

Selon les différentes tâches à réaliser, le meuleur peut avoir à grimper dans des échafaudages ou des échelles, pour atteindre certaines parties des pièces qui sont à meuler. Dans l'industrie lourde, ces pièces sont souvent de très grandes dimensions. Les meuleurs peuvent avoir également à circuler et à travailler dans des endroits très restreints, des espaces clos. De plus, dans certains cas, ils travaillent à l'extérieur et sont sujets aux intempéries. Ces particularités de leur tâche peuvent en accentuer la pénibilité et en augmenter le risque.

Dans les usines visitées, on utilise plusieurs types de meuleuses pour exécuter les différentes tâches. En effet, lors de ces visites, quatre types de meuleuses ont été observés : meuleuse verticale, meuleuse à angle, meuleuse droite et burineuse (petite meuleuse droite). Pour les tâches que nous avons observées, les meuleuses à angle ainsi que les meuleuses verticales étaient de loin les plus utilisées. C'est pourquoi dans cette étude, seules les tâches avec les meuleuses verticales et les meuleuses à angle ont fait l'objet d'analyses systématiques. Les meuleuses employées lors des observations étaient toutes à alimentation pneumatique.

Il y a de grandes disparités dans les pièces meulées, elles varient considérablement en dimensions et en formes. Le travailleur peut avoir à meuler des surfaces courbes, dont le strict respect de la courbure est primordial ou des surfaces planes, ayant parfois des formes complexes. Il arrive même que le travailleur doive meuler des surfaces cachées, qu'il ne peut voir. Il doit alors meuler à l'aveugle, puis vérifier la qualité du meulage au toucher.

La qualité requise du meulage peut être très différente d'une tâche à une autre (d'une pièce à une autre) et le meuleur doit s'adapter aux différents types de finitions nécessaires. Un meulage de très grande précision peut être demandé, par exemple pour les contrats militaires ou du nucléaire, tandis que dans d'autres cas, le meulage sert uniquement à enlever le surplus de soudure (aplanir la soudure). Les meuleurs vérifient la qualité de leur meulage avec la main ou avec des gabarits mis au point en fonction de la pièce à réaliser (bon rayon de courbure, bonne dimension, etc.). Les meuleurs

disposent également de systèmes de marquage sur les pièces pour identifier la quantité de métal à enlever par meulage. La qualité des soudures est par la suite vérifiée par des méthodes plus sophistiquées.

Étant donné le type de travail réalisé, les meuleurs doivent porter de nombreux équipements de protection individuelle (EPI) : lunettes de protection, visière, casque de marque Racal, masque filtrant, coquilles, bottes, etc. Ces EPI contribuent à augmenter la difficulté de la tâche par leur poids et leur encombrement. De plus, dans plusieurs cas, ils ne sont pas adaptés au travail à réaliser : ainsi, par exemple, le casque Racal est trop encombrant pour le travail dans un espace très restreint. Le meuleur doit donc s'adapter à tous ces types de contraintes.

Dans les trois usines où des visites approfondies ont été réalisées, les tâches observées sont très différentes d'une entreprise à l'autre et même dans une même entreprise. Les travailleurs peuvent dans certains cas meuler 40 heures par semaine tandis que dans d'autres types de tâches, le travailleur ne meule que sporadiquement, quelques heures dans la semaine et fait autre chose, le reste du temps. Il arrive même que ce soit le soudeur qui meule ses propres soudures.

Ceci trace un portrait grossier de l'ensemble de la situation du meulage à travers les usines visitées pour ce projet. Ce portrait d'ensemble a de plus été confirmé lors des entretiens semi-dirigés des groupes de discussions ("focus groups"). De plus, malgré la grande variabilité des situations de travail existantes, les différentes discussions, réalisées au cours de ce projet avec divers acteurs des entreprises, confirment que les ergonomes ont eu l'occasion d'observer et d'analyser l'essentiel des situations typiques qui existent dans les usines. Les sections suivantes rapportent les résultats des analyses d'accidents ainsi que des analyses ergonomiques des situations de travail réalisées à partir des données recueillies dans les usines.

2.2 Analyse des accidents

2.2.1 Analyse des accidents graves et mortels

L'interrogation de la base de données sur les accidents graves et mortels de la CSST (la base de données VREN) a permis de répertorier 8 accidents graves et mortels entre les années 1975 et 1995, soit sur une période de vingt ans. Rappelons toutefois que la structure même de la base de données VREN ne permet probablement pas d'aller rechercher tous les accidents liés au meulage. En effet, la structure même de cette base de données ne fait ressortir que les accidents où l'accidenté porte officiellement le titre de meuleur, ce qui est rare ou ceux pour lesquels l'agent causal de la blessure - mais pas nécessairement de l'accident - est la meule ou la meuleuse. Notons également que si la profession de meuleur a pu évoluer depuis 1975 (voir rapport synthèse), on peut supposer par contre, selon les acteurs du milieu, que les outils (meuleuses et meules) n'ont pas subit de transformations majeures.

Les huit descriptions d'accidents (rapport des inspecteurs) graves et mortels recueillies, et dépersonnalisées avant d'être remises au groupe de recherche, ont été analysées. Le tableau 3 résume les principales caractéristiques résultant de cette analyse.

Malgré le fait que seul un petit nombre d'accidents graves ait pu être étudié, certaines tendances ressortent tout de même. À la lecture du tableau 3, on remarque que l'éclatement de la meule semble être le risque le plus fréquent et le plus grave, parmi les accidents graves. En effet, 6 accidents sur 8 et tous les décès (5) sont causés par l'éclatement de celle-ci. On remarque également que la meule éclate parce qu'elle était défectueuse (fêlée) ou qu'elle avait été mal choisie pour le type de tâche à effectuer ou pour la meuleuse disponible. Il faut cependant noter que, lorsque la meule éclate, la meule est l'agent causal de la blessure et que la structure même de VREN fait ressortir principalement ce type d'accidents. Néanmoins, il est à considérer que des accidents de ce type se sont déjà produits et qu'ils ont été, d'après les données de la base VREN, la plupart du temps mortels.

Tableau 3 Principales caractéristiques concernant les accidents graves et mortels

Variables étudiées		Résultats	
Date de l'accident		2 accidents en 1975 1 accident en 1981 1 accident en 1983	1 accident en 1984 2 accidents en 1988 1 accident en 1989
Entreprise	**Type d'établissement**	4 fonderies 1 fabricant de quincaillerie 1 fabricant de structure d'acier 1 réparateur d'équipements agricoles 1 chantier de construction	
	Nombre d'employés	4 entreprises : moins de 50 employés 4 entreprises : données non disponibles	
Travailleur *Note : Dans 2 accidents, 2 travailleurs ont été blessés.*	**Poste au moment de l'accident**	6 meuleurs 1 opérateur de pont roulant	2 journaliers 1 peintre
	Ancienneté au poste au moment de l'accident	moins d'un mois de 1 mois à 6 mois plus d'un an non disponible	4 travailleurs 2 travailleurs 3 travailleurs 1 travailleur
	Tâche au moment de l'accident	Meulait une pièce de métal Coupait un bloc de béton avec une meuleuse non disponible	7 travailleurs 1 travailleur 2 travailleurs
Accident *Particularités : Dans 6 cas sur 8, lors de l'accident, les meuleuses n'avaient pas de garde.*	**Type d'accident**	La meule a éclaté Une particule de métal en fusion tombe dans un contenant de solvant et met le feu Main est coincée entre la pièce et la meule	6 1 1
	Cause de l'accident	Meule défectueuse Pas le bon choix de meule Meuleuse défectueuse Matière inflammable près du meuleur	2 2 3 1
Blessure	**Type de blessure**	Décès Traumatismes multiples Lacération profonde Brûlures	5 2 1 2
	Siège de la lésion	Tête (fracture du crâne) Abdomen Main Multiples	3 Décès 2 Décès 1 4

Sept de ces huit accidents se sont produits dans des secteurs d'activités économiques très différents de l'industrie lourde, objet de ce projet de recherche. Entre autres, quatre ont eu lieu dans une fonderie. Les causes des accidents, selon les rapports d'enquête, ont trait, dans sept cas sur huit, à une meule défectueuse, au mauvais choix de meule ou à une meuleuse défectueuse. On peut se demander, dans ces cas-là, si le meuleur était suffisamment formé pour savoir reconnaître une meule fêlée, pour choisir la bonne meule, assortie à la meuleuse et fonction du travail à faire ou pour vérifier le bon état de la meuleuse. Même si elle ne peut être confirmée, l'hypothèse d'un manque de formation est à considérer. D'autant plus que six accidentés ont moins de six mois d'ancienneté ce qui indique leur peu d'expérience dans la tâche. On doit également se poser des questions au sujet de l'entretien des meuleuses et de la disponibilité de meules de bonne qualité (les participants aux groupes de discussions ont signalé le peu d'uniformité dans la qualité des meules, même celles d'un même lot). Les données disponibles ne permettent pas de répondre à ces questions, toutefois on peut se demander si une formation plus adéquate, un programme de maintenance plus complet ou des exigences plus serrées sur la qualité des meules auraient pu éviter un ou plusieurs de ces accidents.

Finalement, on note que dans six cas sur huit, les meuleuses n'avaient pas leur garde, ce qui peut indiquer un problème important avec ceux-ci. Pourquoi les gardes sont-elles enlevées ? Y a-t-il inadéquation entre la garde et le travail à faire ? Ce résultat semble confirmer ce qui avait été mentionné lors du premier comité aviseur, c'est-à-dire que les gardes ne sont pas fonctionnels et que les meuleurs les enlèvent souvent pour travailler. Cette information a de plus été rapportée à nouveau lors des groupes de discussions ("focus groups"). Le sujet des gardes sera repris plus loin, dans l'analyse des outils et de leurs modifications.

2.2.2 Analyse des rapports d'accidents des entreprises

Lors des visites préliminaires, il a été demandé aux cinq entreprises participantes de nous fournir les renseignements suivants concernant les accidents des meuleurs :

1. statistiques d'accidents pour les meuleurs, de 1992 à 1995 inclusivement;
2. formulaires de déclaration d'accidents à la CSST, pour les années 1992 à 1995 inclusivement;
3. formulaires d'enquêtes d'accidents maison, si disponible.

Les données fournies par les cinq usines variaient considérablement en termes de contenu, de nombres et de types de rapports. Certaines entreprises ont fourni des rapports d'enquête complets. Pour d'autres entreprises, le groupe de recherche n'a pu obtenir les formulaires de déclarations d'accidents de la CSST ou les formulaires d'enquête maison, sans lesquels il est difficile de déterminer l'activité du meuleur lors de l'accident ou la cause de l'accident. Une entreprise a fourni des statistiques d'accidents, pas assez détaillées pour pouvoir isoler les accidents associés spécifiquement au meulage. Étant donné la variété des données disponibles, il a été difficile de faire une analyse exhaustive des accidents des entreprises. Le groupe de recherche a toutefois pu obtenir des renseignements plus ou

moins complets pour 640 accidents[3] sur une période de 4 ans.

Les deux tableaux suivants donnent un aperçu sommaire des accidents survenus aux meuleurs entre 1992 et 1995. Le tableau 4 décrit le type d'accident et, lorsque disponible, renseigne sur l'activité lors de l'accident. Le tableau 5 renseigne sur le type de blessure ainsi que sur le siège de la lésion.

En analysant le tableau 4, on peut voir que le type prépondérant d'accident survient lorsque le travailleur reçoit des particules dans les yeux, fréquemment en enlevant son casque ou sa visière. Cet accident se produit dans plus de la moitié des cas (55 %). Le deuxième type d'accident le plus fréquent se produit lorsque le travailleur circule dans son lieu de travail (11 %). Ceci peut s'expliquer par le fait que les meuleurs de l'industrie lourde ont souvent à monter sur des échafaudages, à se promener sur des structures en hauteur ou à descendre dans des endroits restreints très difficiles à atteindre. Un autre type d'accidents est associé aux postures difficiles (10 %) que le meuleur doit adopter dans certaines situations; par exemple, couché, les bras au-dessus de la tête durant de longues périodes ou à genoux dans un endroit restreint.

Tableau 4 Type d'accident survenu aux meuleurs pour les années 1992-1995

Types d'accidents et activités réalisées lors de l'accident	Nombre	Pourcentage
Corps étrangers dans les yeux en meulant.	353	55 %
Accident de circulation : travailleur marchait, grimpait, descendait (se frappe ou chute).	72	11 %
Douleurs ou se frappe sur quelque chose alors qu'il meulait dans une posture difficile.	62	10 %
Corps étrangers (ex. : petites échardes de métal) dans les doigts ou mains en meulant.	28	4 %
Engourdissements et douleurs aux mains et doigts causés par le meulage (vibrations et travail avec les bras au-dessus de la tête).	26	4 %
Se blesse avec ou à cause de la meule ou de la meuleuse.	17	3 %
Brûlure sur une soudure encore chaude.	5	1 %
Flash de soudure dans les yeux.	5	1 %
Autres	72	11 %
Total	640	100 %

[3]Certaines lésions rapportées pourraient être considérées comme découlant de maladies plutôt que d'accidents, l'accident, selon la définition, étant "un événement imprévu et soudain". C'est le cas en particulier de certaines lésions musculo-squelettiques. Toutefois, ces blessures ont été rapportées comme des accidents dans les entreprises et seront donc considérés comme tels dans cette analyse.

À la lecture du tableau 5, on constate que le siège de la lésion le plus fréquent après les yeux (56 %, 358/640), est la main avec 15 % (96/640) des accidents, suivi du dos avec 13 % (82/640) des accidents. On remarque également que les blessures musculo-squelettiques représentent 15 % des accidents (96/640). C'est au dos qu'on en retrouve le plus (57 % ou 55/96) puis aux mains (29 % ou 28/96).

Tableau 5 Type de blessure et siège de la lésion pour les meuleurs de 1992 à 1995

Siège de la lésion	Blessures			
	De type musculo-squelettique	Autre type de blessure	Nombre total	%
Yeux	0	358	358	56 %
Mains	28	68	96	15 %
Dos	55	27	82	13 %
Membres supérieurs	10	26	36	6 %
Membres inférieurs	1	33	34	5 %
Multiples, Tête et visage, Tronc, Autres	2	16	18	3 %
Pieds et chevilles	0	16	16	2 %
Total	96	544	640	100 %

Suite à l'analyse de ces deux tableaux, on peut voir que le risque le plus fréquent pour le meuleur est de recevoir des particules dans les yeux (plus de 55 %). Ce risque, sans gravité importante dans la plupart des cas, dénote toutefois un problème en ce qui a trait aux visières, aux lunettes et à leur efficacité en termes de protection lorsqu'elles sont portées, soulevées ou enlevées. En effet, il est vrai qu'il arrive fréquemment que les meuleurs reçoivent des poussières dans l'oeil en relevant leur visière. Cette information est ressortie à plusieurs reprises lors des entretiens en usines et des groupes de discussions ("focus groups"). En second lieu, on remarque les problèmes musculo-squelettiques, reliés fréquemment aux postures de travail ou aux vibrations produites par la meuleuse lors de son fonctionnement (96 accidents sur 640, soit 15 %). Il ne faut pas négliger les risques relatifs aux lieux de travail, souvent difficiles d'accès, conduisant à un nombre considérable d'accidents lors des déplacements des meuleurs (11 %).

2.3 Analyse de la situation de travail

Dans la section suivante sont présentés les résultats de l'analyse de la situation de travail des meuleurs des entreprises étudiées (visites approfondies) ainsi que certains résultats obtenus lors des essais comparatifs. Plusieurs de ces résultats vont dans le même sens que les informations recueillies lors des groupes de discussions ("focus groups").

Trois grands types de résultats seront décrits :

1- une analyse des postures et des efforts déployés lors des différentes tâches étudiées (section 2.3.1 et 2.3.2);
2- une analyse de l'utilisation des outils de meulage ainsi que des modifications apportées à ceux-ci (section 2.3.3 et 2.3.4);
3- une analyse de l'utilisation des équipements de protection individuelle (section 2.3.5).

2.3.1 Analyse des postures de travail et des efforts en situation de travail

L'analyse des postures et des efforts en situation de travail a été réalisée par l'étude des grilles d'analyse de postures complétées lors des visites d'usine ainsi que par l'analyse des enregistrements vidéo réalisés en usine (référer aux sections 1.3 et 1.4).

Dans les entreprises étudiées, les différentes tâches analysées ont pu être regroupées en quatre grands types ayant des caractéristiques communes. Ces quatre grands types de tâches sont :

1- **Meulage au "plafond"** : le travailleur meule une surface plane au-dessus de sa tête;
2- **Meulage d'une surface horizontale** : le travailleur meule à l'horizontale, une surface basse qui peut être plane ou courbe (ex. : pale de turbine hydroélectrique);
3- **Meulage d'une surface verticale** : le travailleur meule à la verticale, la surface peut être plane ou courbe;
4- **Meulage pour enlever les projections de soudure ("spots") ou nettoyer les soudures** : le travailleur meule des projections de soudure, et non pas de grandes surfaces, un peu partout sur une pièce, à l'horizontale, à la verticale ou à angle. Ce type de tâches peut inclure des recoupements avec les trois premiers, il se caractérise par plus de mobilité, car il s'agit de meulage de points, non de surface.

Tel que détaillé à la section 1.4, chacun de ces quatre grands types de tâches a été analysé en fonction des 6 critères suivants :

1- la posture générale;
2- la posture du tronc;
3- la posture des membres supérieurs (bras);
4- l'effort déployé;
5- la qualité de l'espace;

6- la difficulté de la posture.

Les résultats de cette analyse sont présentés aux figures 1 à 4. Chaque figure présente un exemple type de posture de la tâche étudiée ainsi que les résultats observés pour chacun des critères. Il est à noter que certaines sommations des critères n'égalent pas 100 %, la figure ne contenant que les résultats les plus importants.

Meulage au plafond (voir figure 1)

Cette tâche est caractérisée par le fait que le travailleur meule toujours au-dessus de sa tête (comme un plafond), les bras plus hauts que la hauteur des épaules. Les travailleurs meulent des pièces habituellement planes. Parfois le lieu du meulage est très bas (cale de bateau) et le meuleur ne peut travailler debout. Le travailleur peut avoir à meuler une grande surface ou seulement des projections (spots) de soudure situées à différents endroits de la surface, il se déplace alors plus fréquemment d'un endroit à l'autre.

En analysant les résultats présentés à la figure 1, il est aisé de se rendre compte que cette tâche est extrêmement contraignante tant au niveau de la posture, qu'au niveau de l'effort déployé. En effet, les meuleurs travaillent toujours avec le dos en extension et les bras au-dessus des épaules et même de la tête. Le travailleur doit donc réaliser un travail musculaire statique d'une grande intensité. De plus, l'effort déployé est important dans tous les cas, car le meuleur doit non seulement porter sa meuleuse, mais également exercer une pression sur la meuleuse, pour enlever le métal par abrasion. Finalement, les meuleurs observés travaillent la plupart du temps dans un endroit restreint.

Un indice de l'extrême pénibilité de cette tâche est le fait que les ouvriers ne puissent meuler longtemps sans prendre des micro-pauses. En effet, ils meulent habituellement pendant des périodes variant entre 20 et 50 secondes, puis abaissent leur meuleuse et se "reposent" pendant de 3 à 8 secondes avant de reprendre leur tâche, ceci dans le but de diminuer l'effort statique requis et rétablir la circulation sanguine dans les muscles des bras. Le temps pris pour déplacer l'escabeau, d'une durée de 15 à 60 secondes, pour rejoindre une autre partie de la surface à meuler, est aussi un temps de "repos" par rapport au meulage au plafond.

Le fait que le travailleur ait le dos en extension et les bras au-dessus de la tête représente un grand risque pour le développement de maux de dos. De plus, le travailleur meulant les bras au-dessus de la tête a continuellement les poignets en extension (renversés vers l'arrière). Des études ont démontré que les postures contraignantes du poignet, et plus spécifiquement l'extension, sont associées au syndrome du tunnel carpien. Aussi, plus la force exercée est grande, plus le risque de lésions est grand[4].

[4]Kuorinka, I., Forcier, L. (Eds) Hagberg, M., Silverstein, B., Wells, P., Smith, M., Hendrick, H., Carayon, P., Pérusse, M., «Les lésions attribuables au travail répétitif : Ouvrage de référence sur les lésions musculo-squelettiques liées au travail», Éditions Multimondes, 510 p., (1995).

Meulage d'une surface horizontale (voir figure 2)

Cette tâche est caractérisée par le fait que le travailleur doive meuler une surface à l'horizontale, c'est-à-dire que la surface est sous le niveau de sa taille et qu'il en meule le dessus. Il peut s'agir d'une surface placée à quelques dizaines de centimètres du sol ou d'une surface "en plancher", sur laquelle le meuleur se tient. Cette tâche implique le meulage de grandes surfaces ou de longues soudures. Les surfaces à meuler peuvent être planes ou courbes.

En analysant les résultats de la figure 2, on voit que la posture est moyennement contraignante. En effet, le travailleur meule debout, le tronc en flexion vers l'avant et les bras vers le bas dans près de 70 % du temps observé. L'ouvrier n'a pas à porter sa meuleuse pour cette tâche et il est la plupart du temps dans un endroit non restreint. Étant donné la posture adoptée et l'effort relativement faible, il s'agit, en général, de la tâche la moins contraignante.

Meulage d'une surface verticale (voir figure 3)

Cette tâche se caractérise par le fait que le travailleur doit meuler une surface verticale, c'est-à-dire une surface qui est devant lui, comme un mur. Le travailleur doit meuler, comme pour la surface horizontale, de grandes surfaces ou de longues soudures. Les surfaces à meuler peuvent être planes ou courbes.

Les résultats de la figure 3 indiquent que dans 70 % du temps le travailleur est assis (sur un petit banc, une boîte, un échafaudage, etc.). Le travailleur a le tronc droit (34 %) ou en flexion vers l'avant (66 %). La plupart du temps, les contraintes au niveau du dos ne sont pas majeures. Pour ce type de tâche l'effort déployé est, dans 70 % du temps observé, modéré (45 %) ou important (25 %). En effet, le meuleur doit soutenir presque continuellement le poids de la meuleuse et de la meule. De plus, il ne peut prendre appui sur la pièce comme dans le cas du meulage d'une surface horizontale. Le travailleur meule continuellement (100 %) dans un endroit non restreint.

Meulage pour enlever les projections de soudure ou nettoyer les soudures (voir figure 4)

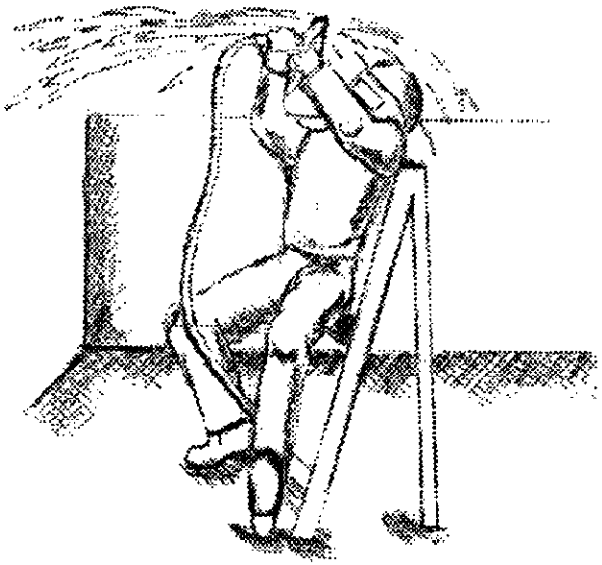
Ce qui caractérise cette tâche est le fait que le travailleur doive nettoyer des projections de soudure ou de petites soudures, un peu partout sur une pièce. Il peut avoir à se déplacer à l'intérieur de la pièce, sur le dessus ou sur les cotés. Cette tâche implique beaucoup de déplacement de la part du travailleur. La proportion du temps passé au meulage comme tel est donc moins importante que pour les tâches présentées précédemment. Également, ce travailleur est souvent affecté à d'autres tâches que le meulage. Il est à noter, toutefois, que les observations du groupe de recherche et les résultats de l'analyse présentés ci-dessous ne traitent que de la tâche du meulage et non des tâches connexes (soudage, nettoyage ou autre).

En analysant les résultats de la figure 4, on réalise tout d'abord que cette tâche implique une grande variété de postures. En effet, la posture générale du travailleur varie entre 3 positions différentes, à genoux (41 %), debout (39 %), couché sur le côté (19 %). Lors des observations, le meuleur a

fréquemment le tronc en flexion avant et en torsion (54 %). L'effort déployé, par contre, est faible (74 %) ou modéré (24 %). Il est à noter que les résultats présentés ici concernent principalement un ouvrier qui meule dans un endroit restreint (83 %). Dans 56 % du temps de meulage observé, il adopte une posture difficile ou moyennement difficile, ceci est sans doute provoqué par l'exiguïté de l'espace. En fait, cette tâche implique une très grande variété de situations et n'est pas aussi uniforme que les trois tâches présentées précédemment.

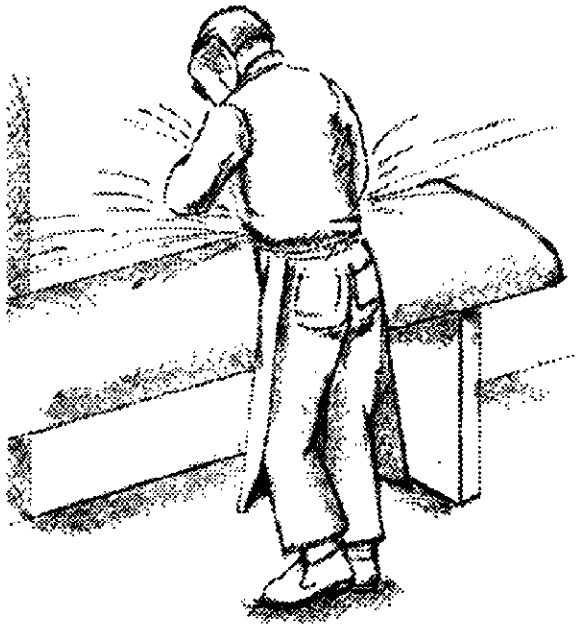
L'analyse des postures et des efforts est effectuée à partir des observations réalisées en usines, en mars et en avril 1996. Étant donné la nature très variable des contrats et du travail à faire dans ces entreprises du secteur de l'industrie lourde, il est possible que des observations réalisées à une autre époque aient donné lieu à des résultats quelques peu différents. Toutefois, les discussions avec différentes personnes concernées par le meulage - meuleurs, contremaîtres, coordinateurs en santé-sécurité - lors des visites d'usines et lors des "focus groups", incitent les ergonomes à croire que les situations de travail observées sont représentatives des diverses situations de travail présentes habituellement dans ces usines.

FIGURE 1 MEULAGE AU PLAFOND



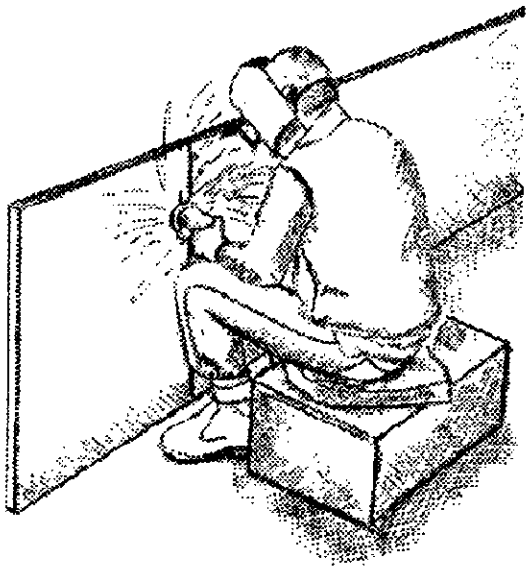
	% du temps consacré à la tâche
Posture générale	
Assis sur appui =	100 %
Posture du tronc	
Dos en extension appuyé =	76 %
Dos fortement en extension =	11 %
Posture des bras	
Bras plus haut que la hauteur des épaules =	100 %
Effort déployé	
Important =	100 %
Qualité de l'espace	
Endroit restreint =	100 %
Difficulté de la posture	
Posture difficile =	100 %

FIGURE 2 MEULAGE D'UNE SURFACE HORIZONTALE



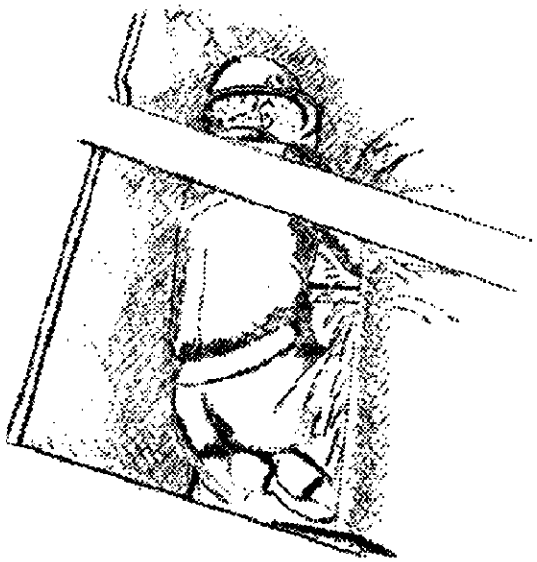
	% du temps consacré à la tâche
Posture générale	
Debout =	69 %
À genoux =	19 %
Posture du tronc	
Tronc en flexion vers l'avant =	71 %
Tronc en flexion > 70 degrés =	13 %
Posture des bras	
Bras en bas =	65 %
Bras devants repliés =	25 %
Effort déployé	
Faible =	58 %
Modéré =	40 %
Qualité de l'espace	
Endroit non restreint =	88 %
Difficulté de la posture	
Posture facile =	57 %
Posture moyennement difficile =	43 %

FIGURE 3 MEULAGE D'UNE SURFACE VERTICALE



	% du temps consacré à la tâche
Posture générale	
Assis jambes écartées =	70 %
Accroupie =	23 %
Posture du tronc	
Tronc en flexion vers l'avant =	66 %
Droit =	34 %
Posture des bras	
Bras devant et en bas =	68 %
Bras devants =	17 %
Effort déployé	
Faible =	25 %
Modéré =	45 %
Important =	25 %
Qualité de l'espace	
Espace de travail non restreint =	100 %
Difficulté de la posture	
Posture facile =	75 %
Posture moyennement difficile =	14 %

FIGURE 4 MEULAGE POUR ENLEVER LES PROJECTIONS (SPOTS) DE SOUDURE, NETTOYER LES SOUDURES



	% du temps consacré à la tâche
Posture du tronc	
Tronc en flexion avant et en torsion =	54 %
Tronc droit =	24 %
Posture des bras	
Bras devant =	46 %
Bras en bas =	42 %
Effort déployé	
Faible =	74 %
Modéré =	24 %
Qualité de l'espace	
Endroit restreint =	83 %
Endroit non restreint =	17 %
Difficulté de la posture	
Posture facile =	44 %
Posture moyennement difficile =	36 %
Posture difficile =	20 %

Figure 5 : Poste bas lors de l'évaluation comparative

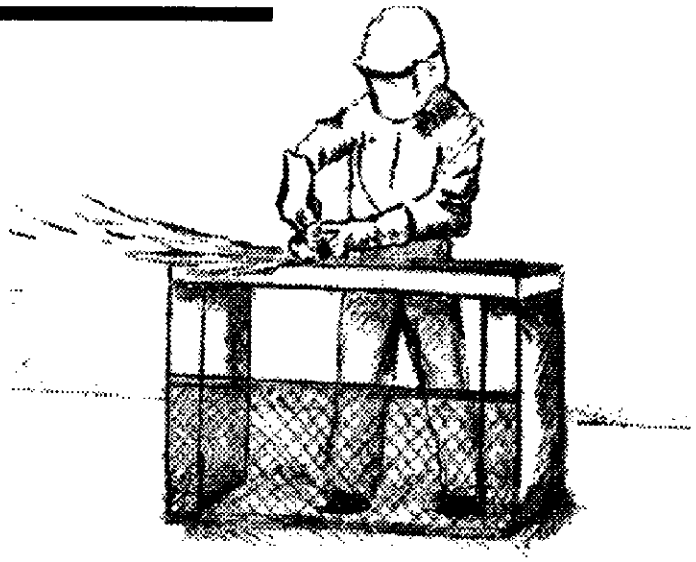
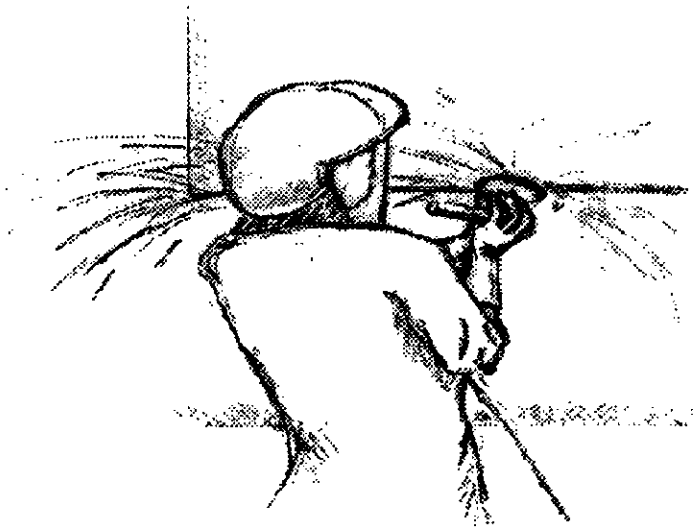


Figure 6 : Poste haut lors de l'évaluation comparative



2.3.2 Analyse des postures de travail et des efforts déployés lors de l'évaluation comparative

Lors des essais comparatifs, les postures adoptées et les efforts déployés étaient évidemment fonction des postes de travail, conçus spécialement pour les essais et imposés aux meuleurs. La présente section rapporte les principaux résultats concernant ces postures et ces efforts. Le détail de la compilation des résultats de l'évaluation comparative pour ce qui est des postures, des efforts, de la méthode de préhension de la meuleuse et de la méthode de travail avec la meuleuse se trouve annexée à la fin de ce document.

Rappelons que pour le poste bas, le travailleur meule une surface horizontale, à une hauteur d'environ 75 cm du sol (voir figure 5). Pour le poste bas, le tronc est droit ou légèrement fléchi vers l'avant et le cou est légèrement penché vers l'avant (< 20°) dans la quasi-totalité des cas. Par contre, la posture des bras varie considérablement d'un cas à l'autre. Certains meuleurs surélèvent une épaule, d'autres placent un ou les deux bras plus ou moins vers l'avant, à l'horizontale ou vers le bas. L'effort requis, localisé dans les membres supérieurs et les épaules, est plus élevé pour les grosses meuleuses (meuleuses verticales) que pour les petites meuleuses (meuleuses à angle).

Pour le poste haut (voir figure 6), où le travailleur meule comme "au plafond", le tronc est, pour la plupart des meuleurs, soit penché vers l'arrière, soit droit. Le cou est parfois fléchi vers l'arrière ou latéralement. Les bras sont évidemment vers le haut. Cependant, pour les grosses meuleuses (meuleuses verticales), dans la majorité des cas, les ouvriers se tiennent le bras droit en appui sur le côté du tronc. Ceci permet de supporter le poids de la meuleuse avec le tronc. L'effort est localisé dans les membres supérieurs, les épaules et le dos et même dans les jambes. Visiblement, lors du meulage au plafond, l'effort déployé est toujours soit important, soit très important et ce, surtout pour les grosses meuleuses. D'ailleurs, au sujet de l'effort, rappelons que lors des essais, il était demandé aux meuleurs libérés par les trois entreprises participantes, de meuler au plafond pendant une minute. Or, bien que chacun ait respecté cette consigne, la durée d'une minute est apparue très longue aux meuleurs qui sont pourtant des gens de grande expérience.

Au niveau de la posture et de l'effort, l'évaluation comparative a permis de réaliser que, pour un même type de meuleuse (il y en avait deux types : les petites, "à angle", et les grosses, "verticales"), il y a plus de différences inter-individu qu'intermeuleuse. Chaque travailleur adopte un peu sa méthode propre, sa posture, qui dépend en bonne partie de sa grandeur. En effet, la méthode de travail et la posture des deux travailleurs de grande taille (environ 1m 85) est semblable. De même, la méthode et la posture des deux travailleurs plus petits (environ 1m 70) sont également semblables. Il y a évidemment des différences fondamentales entre le poste haut et le poste bas.

2.3.3 Utilisation des outils et leurs modifications

L'analyse de l'utilisation des outils et de leurs modifications a pour but de comprendre comment sont utilisés les outils (ensemble meuleuse-meule), quelles sont les modifications qui y sont apportées et pourquoi ces modifications y sont apportées. Pour ce faire quatre éléments ont été étudiés :

1. les méthodes de meulage;
2. les méthodes de préhension des meuleuses (les manières de les tenir);
3. les modifications apportées aux poignées des meuleuses et les raisons de ces modifications;
4. les modifications apportées à la garde des meuleuses et les raisons de ces modifications.

L'analyse de l'utilisation des meuleuses et de leurs modifications a été réalisée par l'analyse des enregistrements vidéo filmés en usine (voir section 1.4.), ainsi que par les entretiens réalisés avec les meuleurs en usine et lors des "focus groups". Cette étude a été réalisée pour les meuleuses à angle et les meuleuses verticales (à boisseau). Le travail avec d'autres types de meuleuses (2 types de meuleuses droites) a été observé mais pas suffisamment pour pouvoir présenter des résultats.

L'analyse des enregistrements vidéo a permis de déterminer la manière dont les meuleurs travaillent avec leur outil, c'est-à-dire la position qu'ils donnent à l'outil pour meuler ainsi que les types de mouvements qu'ils exécutent. La façon de travailler avec l'outil permet de déterminer la proportion des meulages plus à risque (travail par sautillement, angle très prononcé de la meuleuse par rapport à la pièce meulée).

L'utilisation des poignées, c'est-à-dire la position des mains sur les poignées ou sur la meuleuse a également été étudiée, de même que le pourcentage de meuleuses modifiées, c'est-à-dire celles dont une poignée a été enlevée. Cette analyse permet de déterminer dans quelle proportion les travailleurs utilisent les poignées de la façon prescrite (une main sur chaque poignée) et dans quelle proportion, ils en modifient l'utilisation afin de les adapter à leur travail.

L'analyse des résultats du tableau 6 permet de constater que, pour la meuleuse verticale (à boisseau), l'angle entre la surface meulée et la meule est prononcé (> 15°), dans 47 % des cas, ou très prononcé (>30°), dans 6 % des cas, pour un total de 53 % du temps observé. La méthode de travail recommandée, dans la littérature prescriptive, dans la documentation des fabricants et par les contremaîtres, est le meulage à plat. Or, l'observation, de même que les divers entretiens réalisés en usine ou lors des groupes de discussions, démontrent que les travailleurs meulent régulièrement en créant un angle prononcé ou très prononcé entre la meule à boisseau et la surface meulée. Ceci représente un risque d'éclatement pour ce type de meule, risque à haut potentiel de gravité, tel que présenté plus haut dans l'analyse des accidents graves et mortels.

Pourquoi les ouvriers meulent-ils avec un angle si cela engendre un tel risque ? Selon les meuleurs, cette méthode leur permet d'enlever plus de métal que le meulage à plat et cela "fait du plus beau travail". En fait, l'enlèvement par abrasion n'a lieu que dans la mesure où la pression est suffisante - sinon la meule glisse sur la surface sans enlever de métal. Ainsi, disposer la meule avec un angle permet probablement, avec la même force, d'exercer une pression plus forte sur une plus petite surface. De plus, lorsque les meuleurs travaillent à plat et exercent une très forte pression sur la meuleuse, il arrive - cela dépend des meuleuses et de la pression d'air dans le système pneumatique - que la meuleuse arrête de tourner, ce qui évidemment ne donne pas le résultat escompté. Ce problème n'arrive pas, toutefois, avec les meuleuses les plus puissantes. Ces éléments font que le juste meulage demande d'exercer la bonne pression, ni trop, ni pas assez, et il est plus facile de s'ajuster pour

exercer la bonne pression quand la meule fait un angle avec la surface meulée.

Les meuleurs utilisent également les meuleuses verticales pour travailler par sautillement dans une proportion de 21 % du temps observé. Cette pratique n'est pas recommandée. Elle est à risque pour les vibrations et pour l'éclatement de la meule, car elle implique de donner des petits coups avec la meule. Il semble selon l'observation que la force appliquée, normale (90 degrés) à la pièce, soit moins importante pour cette façon de travailler. Par contre, l'effort normal à la pièce étant moins grand, la meuleuse est très instable dans le plan parallèle à la pièce. Ceci augmente la nécessité de retenir la meuleuse, ce qui est aussi contraignant que le meulage sans sautillement. Cette façon de travailler, par sautillement, a été observée dans une seule des usines visitées, mais dans cette usine les travailleurs meulaient dans une très grande proportion de cette façon. Les meuleurs qui adoptent cette méthode disent l'employer car cela donne "un plus beau fini" à la pièce meulée. Malgré le risque, cela témoigne d'un souci de réaliser un travail dont on peut être fier.

L'analyse des résultats du tableau 6 permet de constater que la meuleuse à angle - petite meuleuse avec une meule plate - est utilisée avec un angle entre la meule et la surface meulée dans environ 75 % des cas. Dans 8 % des cas le travailleur meule avec un angle très prononcé entre la meule et la surface meulée. Il est plus difficile de travailler à plat avec cette meuleuse étant donné la forme de la garde. En effet, la garde touche rapidement la pièce meulée lorsque la meule est à plat. Comme pour la meule à boisseau, cette pratique - angle prononcé ou très prononcé - est considérée à risque et n'est pas recommandée. Les travailleurs disent employer ce genre de pratique parce qu'ils manquent d'espace pour meuler. Les raisons du meulage avec un angle pour la meule à boisseau s'appliquent également pour la meule plate.

En ce qui concerne la disposition des mains sur les poignées de la meuleuse, la recommandation générale est de placer une main sur chaque poignée. Or, cette prescription n'est pas fréquemment mise en application, tel qu'on peut le remarquer dans les tableaux 7 et 8. Les données de ces tableaux montrent que, lors de l'utilisation de la meuleuse verticale, les travailleurs placent les deux mains sur les poignées dans 80 % du temps observé; dans tous les cas les meuleuses possédaient leurs deux poignées. Par contre, pour les meuleuses à angle, la situation est différente. Pour les meuleuses à angle une poignée a été enlevée dans 66 % des cas observés. De plus, dans 23 % du temps observé, les meuleurs placent une main sur une poignée et une main sur le moteur de la meuleuse. Dans 29 % du temps observé, les travailleurs meulent avec les deux mains sur la poignée où se trouve le boyau d'alimentation pneumatique.

Cette modification apportée à la meuleuse à angle de façon si fréquente (66 % des cas) indique qu'il existe une incompatibilité entre la tâche à exécuter et la conception de l'outil. Les travailleurs interrogés ont mentionné qu'ils enlèvent la poignée de la meuleuse parce que l'espace est insuffisant pour travailler avec les deux poignées. Au cours des "focus groups", ils ont rapporté qu'ils enlèvent la poignée lorsqu'elle nuit à leur travail et qu'ils ne la remettent pas car elle ne sert à rien. La fréquente position d'une main sur le moteur de la meuleuse ou des deux mains sur la poignée du boyau d'alimentation confirme les résultats des discussions.

Pour la meuleuse verticale, il est difficile, étant donné sa grosseur et son poids, de n'utiliser qu'une seule poignée. Les travailleurs qui doivent aller meuler dans des endroits difficiles d'accès n'utiliseront pas ce type de meuleuse, car ils n'auront pas l'espace suffisant, ils préfèrent utiliser une meuleuse à angle, qui est plus petite et qu'ils peuvent modifier.

Un autre changement fréquemment apporté à la meuleuse à angle est la modification de la garde. Les meuleurs la coupent de deux ou trois centimètres de chaque côté afin de permettre le meulage. En effet, lorsque la garde est correctement placée, d'une part, l'ouvrier ne peut voir ce qu'il est en train de meuler, d'autre part, la garde appuie sur la pièce meulée et l'ouvrier ne peut travailler convenablement avec la meule à plat. Finalement, les travailleurs ont rapporté qu'ils devaient fréquemment enlever la garde pour pouvoir meuler dans les endroits restreints. Lors des groupes de discussions, les meuleurs ont également mentionné la difficulté de travailler avec la garde : en plus de leur "cacher la vue" de la surface à meuler, la garde augmente le poids de la meuleuse, si elle est mal installée, elle en augmente aussi les vibrations et sa conception actuelle oblige à meuler avec un angle entre la meule et la surface. Toujours lors des "focus groups", les meuleurs ont également spécifié ne pas se sentir protégés par la garde : ils considèrent que la garde n'est d'aucune utilité si la meule éclate.

En ce qui concerne la meuleuse verticale, la garde est présente. Toutefois, cette garde est beaucoup plus courte que la meule. Elle est rarement ajustée en fonction de l'usure de la meule, et il n'est pas certain qu'elle protégerait vraiment le travailleur en cas d'éclatement de la meule.

Trois autres problèmes concernant les outils ont été rapportés par les meuleurs lors des entretiens en usines et lors des groupes de discussions. Premièrement, les travailleurs rapportent avoir des difficultés avec les connections des boyaux d'alimentation en air à la meuleuse : il arrive que le boyau se détache de la meuleuse et que le meuleur le reçoive en plein visage. Les meuleurs ont également mentionnés que dernièrement des "quick connect", ou raccords rapides, ont été installés aux boyaux d'alimentation. Ces types d'attaches permettent une connexion plus rapide, cependant ils diminuent la puissance des meuleuses ce qui crée une difficulté à travailler convenablement.

Le second problème concerne le travail au froid, plus fréquent dans une des entreprises. Les meuleurs concernés mentionnent que les poignées des meuleuses deviennent blanches et qu'eux-mêmes s'y gèlent les mains. Il arrive également que l'air "gèle" dans les boyaux d'alimentation et que la meuleuse n'ait plus de puissance.

Le troisième problème concerne le dispositif de mise en marche et d'arrêt de la meuleuse. Le dispositif de mise en marche est composé d'une gâchette et d'un système anti-démarrage, un loquet de sécurité, permettant d'éviter les démarrages intempestifs si la gâchette est actionnée involontairement. Ce dispositif varie beaucoup d'une meuleuse à l'autre. De plus, il est souvent difficile à engager et requiert une importante force de maintien. Pour contrer cette difficulté, issue d'une mauvaise conception, certains meuleurs contournent le dispositif et le loquet de sécurité de différentes manières. Le groupe de recherche a vu, entre autres, des élastiques retenir des gâchettes. Il n'existe pas de système d'arrêt de la meuleuse, sauf de lâcher la gâchette. Les meuleuses devraient

avoir un dispositif d'arrêt plus adéquat, car lorsqu'une meuleuse est arrêtée (gâchette désengagée), la meule continue à tourner un bon moment. Les travailleurs appuient donc la meule au sol ou sur la pièce afin de l'arrêter le plus rapidement possible, cette habitude peut contribuer à augmenter le risque de fêlure de la meule.

Tableau 6 Répartition du temps (%) de travail en fonction de la façon de travailler avec les différents types de meuleuses

	Type de meuleuses	
Façon de travailler	**Meuleuses verticale**	**Meuleuses à angle**
Travail à plat	26 %	----
Travail à angle (15 à 30°) (grand mouvement)	47 %	70 %
Travail à angle (15 à 30°) (petit mouvement)	----	5 %
Travail à angle prononcé (> 30°)	6 %	8 %
Travail meuleuse debout	----	5 %
Travail par sautillement	21 %	----
Non visible	----	12 %
Total	100 %	100 %

Tableau 7 Répartition du temps (%) de travail en fonction de la position des mains du travailleur sur la meuleuse

	Type de meuleuses	
Position des mains sur la meuleuse	**Meuleuse verticale**	**Meuleuse à angle**
Position 1 : 2 mains sur les 2 poignées	80 %	39 %
Position 2 : 1 main sur la poignée, 1 main sur le moteur de la meuleuse	8 %	23 %
Position 3 : tient la meuleuse à 1 main par 1 poignée	1 %	1 %
Position 4 : 2 mains sur la poignée du boyau d'alimentation	----	29 %
Positions 2, 3, 4 en alternance sans arrêter de meuler	11 %	----
Non visible	----	8 %
Total	100 %	100 %

Tableau 8 Présence des poignées sur les meuleuses en fonction du type de meuleuses.

	Type de meuleuse	
Nombre de poignées	**Meuleuse verticale**	**Meuleuse à angle**
2 poignées présentes	100 %	44 %
1 poignée présente	----	66 %
Total	100 %	100 %

2.3.4 Utilisation des outils lors de l'évaluation comparative

En ce qui concerne l'utilisation de l'outil meuleuse-meule, les résultats des essais comparatifs vont dans le même sens que ceux des observations en usines présentés ci-haut. Rappelons que le lecteur peut se reporter au tableau de compilation des résultats de l'évaluation comparative, annexé à ce document.

En ce qui concerne la méthode de travail, il est à noter que plusieurs caractéristiques du meulage à exécuter étaient imposées par le protocole des essais (hauteur de la surface à meuler, meuleuses,

durée du meulage, etc.). Pour le poste bas, on constate que tous les meuleurs tiennent les grosses meuleuses (meuleuses verticales) à plat, mais que les petites meuleuses (appelées aussi meuleuses à angle) font un angle assez prononcé par rapport à la surface meulée. Pour le poste haut, c'est-à-dire pour le meulage au plafond, dans la majorité des cas, l'angle entre la meule et la surface meulée est assez prononcé (> 15° et même > 30°) et ce, qu'importe la meuleuse utilisée.

Pour les essais, aucune consigne particulière n'a été donnée par rapport à la méthode de meulage comme telle, ni par rapport à la manière de tenir la meuleuse. Les meuleurs devaient faire "comme d'habitude". On remarque toutefois que malgré les prescriptions connues des meuleurs expérimentés ils ne meulent pas à plat dans la majorité des cas. En ce qui concerne le poste haut, il est vrai que la position de travail imposée au plafond ne favorise pas le meulage à plat. En effet, pour meuler à plat, le meuleur doit adopter une posture encore plus pénible (extension du dos encore plus prononcée, impossibilité d'appuyer un bras sur le tronc, extension des poignets encore plus prononcée également). De plus, il doit placer son corps sous la meuleuse. Ceci est difficilement possible car la meuleuse se retrouve alors dans sa visière. Finalement, ceci crée un risque de recevoir la meuleuse sur lui si elle dérape. En tenant la meuleuse un peu éloignée de lui avec un angle il diminue le risque de la recevoir en plein visage si elle dérape.

En ce qui concerne les poignées, les résultats démontrent assez clairement que la prescription de placer une main sur chaque poignée n'est pas réaliste. Pour les essais, toutes les meuleuses possédaient leurs deux poignées et leur garde. Dans aucun cas, les meuleurs n'avaient à travailler dans un espace restreint. De plus, on ne leur demandait pas de vérifier la qualité de leur travail, donc de bien voir ce qu'ils meulaient. Pour le poste bas, les ouvriers plaçaient leurs mains sur les deux poignées. Par contre, pour le poste haut, sauf en ce qui concerne un meuleur, qui parfois plaçait ses mains sur chacune des poignées, les trois autres meuleurs ne répondaient jamais à cette prescription. La plupart du temps, les ouvriers plaçaient la main gauche sur la poignée et la main droite sur le corps de la meuleuse. Parfois, ils mettaient les deux mains sur la poignée du boyau d'alimentation. En fait, pour le poste haut, la main droite supporte le poids de la meuleuse et exerce la pression, tandis que la main gauche dirige la meuleuse. Placer les mains sur chacune des poignées génère un moment trop important au niveau des poignets et l'effort demandé est de beaucoup supérieur à celui fourni en supportant le poids de la meuleuse avec la main droite. Ainsi, la méthode prescrite est peut-être moins nocive en ce qui a trait aux vibrations, toutefois elle n'est pas réaliste en ce qui concerne l'effort requis.

L'évaluation comparative a également mis en évidence un problème de standard dans les outils. D'ailleurs, un manque d'uniformité a été rapporté fréquemment lors des entretiens en usines et dans les groupes de discussions. Ce problème de manque de standard n'a pas permis au groupe de recherche d'évaluer deux meules par meuleuse, tel que cela était prévu, car il y avait incompatibilité à plusieurs niveaux (diamètres des arbres, vitesses de rotation). Lors de l'évaluation comparative, ce manque d'uniformité est principalement ressorti au niveau des outils pour enlever et replacer les meules. Il n'existe pas d'outil universel pour poser et enlever les meules sur les meuleuses. Souvent dans les usines, les meuleurs se fabriquent leurs propres outils, qu'ils gardent précieusement pour leur usage personnel. Sinon, comme ce fut le cas lors des essais comparatifs, ils sont souvent à la

recherche d'un outil de serrage plus ou moins compatible. Quand ils n'en trouvent pas, il arrive qu'ils utilisent la nouvelle meule pour donner un coup sur une pince et "aider" au desserrage. Cette pratique est dangereuse car elle peut endommager la nouvelle meule. Les meuleurs connaissent ce danger. Après de longues minutes à tenter d'enlever la meule convenablement, ils ont néanmoins procédé de cette manière devant le groupe de recherche, en spécifiant que le manque d'outils appropriés fait que cette pratique est courante en entreprise. Cela a d'ailleurs confirmé les informations provenant des entretiens en usines et des groupes de discussions.

2.3.5 Utilisation des équipements de protection individuelle

Les données sur les équipements de protection individuelle ont été recueillies lors des visites approfondies dans les trois usines participantes ainsi que lors des groupes de discussions ("focus groups").

Dans ces usines les équipements de protection sont toujours fournis par l'entreprise. Les équipements de protection individuelle obligatoires peuvent varier d'une entreprise à l'autre (voir tableau 9).

Tableau 9 Équipements de protection individuelle

Équipement de protection individuelle	Nombre d'entreprises exigeant le port	L'équipement est-il porté ? Sinon, pourquoi ?
Bottes de sécurité	Toutes les entreprises	L'équipement est porté dans les 3 entreprises.
Casque de sécurité	1 entreprise l'exige	L'équipement est porté.
Gants de protection	Toutes les entreprises	L'équipement est porté. Une entreprise fournit des gants de protection anti-vibration à tous les meuleurs. Une autre entreprise fournit un gant de protection régulier et un petit gant mince anti-vibration à porter à l'intérieur du gant de protection. Certains travailleurs n'aiment pas porter ces petits gants car ils disent qu'ils sont serrés et qu'ils coupent la circulation dans les mains.
Protecteurs auditifs, bouchons ou coquilles	Toutes les entreprises exigent un ou l'autre des protecteurs.	L'équipement est porté. Certains travailleurs portent les bouchons et les coquilles en même temps. Dans une entreprise, les travailleurs se disent incapables de porter les coquilles avec le casque Racal.
Visière	Toutes les entreprises l'exigent si le casque Racal n'est pas porté.	L'équipement est porté sauf dans une entreprise où certains travailleurs ont dit ne pas toujours le porter. Dans une entreprise les travailleurs disent que pour certaines tâches, il arrive régulièrement que les visières embuent et qu'ils doivent arrêter de travailler parce qu'ils ne voient plus rien.
Lunettes de sécurité	Le port de lunettes est nécessaire lorsque la visière n'est pas portée.	L'équipement est porté lorsque nécessaire. Certains travailleurs portent leurs lunettes de sécurité et leur visière pour plus de sécurité. Dans une entreprise les travailleurs se disent incapables de porter leurs lunettes avec le casque Racal.
Casque Racal	2 entreprises fournissent les casques Racal. 1 exige son port. 1 les met à la disponibilité des travailleurs.	Les travailleurs rapportent ne pas toujours porter le casque Racal parce que c'est encombrant et que dépendant des endroits à meuler, ils ne peuvent y accéder en portant le casque (ex. : cales de bateau). De plus, ils sont rarement nettoyés ce qui fait que la respiration devient très difficile. Certains équipements de protection ne peuvent être portés avec le casque Racal.(voir plus haut)

Équipement de protection individuelle	Nombre d'entreprises exigeant le port	L'équipement est-il porté ? Sinon, pourquoi ?
Masque avec cartouche et demi-masque à poussière	Port obligatoire dans une usine si le casque Racal n'est pas utilisé.	Cet équipement est peu porté parce que les travailleurs disent avoir de la difficulté à respirer avec ces demi-masques. De plus, ils spécifient que le masque avec cartouches est quasi-impossible à porter avec la visière.

La lecture de ce tableau permet de constater à quel point le meulage exige le port de nombreux équipements de sécurité, certains lourds et encombrants, qui interfèrent plus ou moins avec la tâche à réaliser. Il est important de souligner, tel que mentionné dans le tableau 9, qu'il arrive assez fréquemment que certains équipements ne puissent être portés à cause de la tâche à exécuter ou tout simplement que le port d'un équipement empêche le port d'un autre à cause de leur incompatibilité respective.

2.4 Analyse des besoins des meuleurs

Lors des visites en usines et des groupes de discussion, les travailleurs, les contremaîtres, les responsables en santé et sécurité du travail ont exprimé au groupe de recherche plusieurs besoins qui amélioreraient et faciliteraient l'utilisation de la meuleuse et l'exécution de la tâche des meuleurs. Les résultats des observations et des analyses du groupe de recherche vont d'ailleurs dans le même sens que ces besoins.

Les principaux besoins exprimés sont énoncés ici en sept grands thèmes soient : la meuleuse, la meule, la garde, l'alimentation pneumatique, les équipements de protection individuelle, la formation et l'achat des meuleuses.

Tableau 10 Principaux besoins exprimés

Thèmes	Besoins exprimés
Meuleuse	Caractéristiques désirées : • être moins lourde, plus légère; • être moins encombrante; • être plus puissante pour le même poids et le même encombrement; • être mieux équilibrée; • être moins bruyante et moins vibrante; • posséder une gâchette et un loquet de sécurité adéquats : que l'ensemble soit facile à engager, se tienne bien dans la main et nécessite une force de faible amplitude; • être pourvue d'un système d'arrêt rapide, sûr et efficace, c'est-à-dire d'un système d'arrêt qui fait que la meule cesse rapidement de tourner; • posséder un meilleur système d'attache de la meule, plus sécuritaire, pour que la meule ne puisse se détacher par inadvertance; • posséder un arbre de montage standard plus sécuritaire pour toutes les meuleuses; • nécessiter une seule clé, standard pour toutes les meuleuses, servant à installer les meules; • posséder des poignées mieux conçues : plus confortables, plus adhérentes, isolées thermiquement, ajustables en plusieurs positions et situées sur le corps de la meuleuse (pour la meuleuse à angle).
Meule	Caractéristiques désirées : • être mieux balancée pour réduire le bruit et les vibrations; • être de qualité plus uniforme pour les meules d'un même lot; les fournisseurs devraient être capables de garantir un approvisionnement rapide de meules uniformes.
Garde	Caractéristiques désirées : • avoir une bonne capacité de protection en cas d'éclatement de la meule; • être facile et rapide à installer; • être facile à bien installer pour ne pas augmenter les vibrations de la meuleuse; • être ajustable en continu, et non par palier, en hauteur et en circonférence; • être moins encombrante et plus légère pour ne pas augmenter le poids de la meuleuse; • être compatible avec le travail à faire : permettre de voir la surface meulée et permettre de travailler à plat sur la surface.
Alimentation pneumatique	Caractéristiques désirées : • attacher plus facilement le boyau d'alimentation à la meuleuse; • disposer d'une attache solide qui ne se défasse pas; • régulariser la pression d'air afin de pouvoir maintenir une révolution constante de la meuleuse; • obtenir une température de l'air suffisante, par temps froid, pour que l'air "ne gèle pas" dans les boyaux et que la meuleuse ne perde pas de sa puissance; • conserver la même puissance avec les "quick connect" qu'avec les attaches traditionnelles.
EPI	Caractéristiques désirées : • être compatibles les uns avec les autres; • avoir des casques, de type Racal, peu encombrants pour pouvoir être utilisés dans les espaces restreints.

Thèmes	Besoins exprimés
Formation	Pour les meuleurs : • recevoir une bonne formation, plus importante que présentement; • recevoir une formation sur le site même du meulage, dans le lieu de travail.
Achat des meules et des meuleuses	Pour les meuleurs : • être consultés lors de l'achat des meuleuses et des meules; • que l'entreprise se dote de critères d'achats tenant compte des différents aspects de la SST.

Il est à noter qu'un des principaux besoins exprimés par les meuleurs est d'être consultés lors de l'achat des meuleuses et des meules. De plus, le besoin que l'entreprise se dote de critères d'achats tenant compte des différents aspects de la SST était également manifeste chez d'autres acteurs de l'entreprise, entre autres chez les contremaîtres et les responsables en SST (voir dans le tableau 10 : les deux derniers besoins exprimés).

En fait, la majorité des besoins exprimés plus haut dans le tableau 10 pourrait servir de base à l'élaboration de critères d'achats et de sélection des meules et des meuleuses. Toutes les caractéristiques désirées pour ce qui est des meuleuses, des meules et des gardes, ainsi que quelques caractéristiques désirées concernant l'alimentation pneumatique et les EPI pourraient être regroupées et structurées dans un outil d'aide à la sélection des meules et des meuleuses. De plus, un tel outil d'aide pourrait contenir une méthodologie de participation des meuleurs à la sélection des ensembles meuleuses-meules ainsi qu'un programme de formation intégrant la SST à l'opération et s'adressant aux meuleurs.

L'annexe J au rapport synthèse présente le détail d'une proposition d'un tel outil d'aide à la sélection.

3- CONCLUSION

Dans le cadre multidisciplinaire de ce projet sur l'analyse des risques et l'étude des besoins relatifs au procédé de meulage, l'analyse ergonomique a permis de répondre aux **objectifs spécifiques** de la composante ergonomique, soit :

1. comprendre la situation de travail propre au procédé de meulage dans l'industrie lourde, dont les éléments suivants : les activités de travail, les risques inhérents au meulage, les postures, les efforts, l'adéquation entre les outils et le travail à faire, ainsi que des équipements de protection individuelle;

2. déterminer l'ensemble des besoins des différents utilisateurs en ce qui a trait aux aspects ergonomiques.

Les principaux résultats de l'analyse ergonomique peuvent se résumer ainsi.

A) Le contexte

Tout d'abord, il faut souligner que les **situations** de travail du meulage manuel sont **variées et complexes**. Les tâches sont nombreuses et diversifiées. Les différents éléments de la situation de travail sont autant de variables qui influencent le travail à réaliser et la manière de le réaliser. Les procédés de meulage les plus fréquemment rencontrés sont l'ébarbage et le surfaçage. L'environnement physique a une influence prépondérante sur l'activité de travail : les meuleurs peuvent travailler dans de grands ateliers, à l'extérieur, sur des échafaudages, dans des espaces confinés ou carrément dans des espaces clos. Les pièces meulées sont toutes volumineuses dans l'industrie lourde, mais ici également leurs formes et l'emplacement relatif des surfaces ou des arêtes à meuler varient considérablement : surfaces planes ou courbes, meulage à l'horizontal, à la verticale, au plafond... La qualité de meulage requise est une donnée importante dans le choix de la méthode de travail adoptée par le meuleur. Les types de meuleuses et de meules utilisées sont fonction de la structure organisationnelle de chaque entreprise, de la disponibilité des outils (influencée en grande partie par la structure organisationnelle), de l'environnement physique où se fait le meulage, de la tâche à réaliser et, en faible partie, du choix du meuleur. Les équipements de protection individuelle pour le meulage sont nombreux et importants. Le meulage manuel est donc loin de représenter un portrait unique et uniforme à travers l'industrie lourde. Ce sont ces situations multiples et diversifiées qui ont fait l'objet de l'analyse ergonomique.

B) Les accidents

L'analyse des données d'accidents, à partir des données fournies par les usines et des données de la base VREN de la CSST (VREN est une base de données d'accidents graves), a permis de faire trois constatations principales. Les **accidents aux yeux** sont les plus fréquents, et même s'ils ne sont pas nécessairement les plus graves, ils font ressurgir un problème important lié aux lunettes et aux visières

portées par les travailleurs lors du meulage. Les accidents de types **musculo-squelettiques**, affectant principalement les mains et le dos, sont les seconds en nombre. S'il est difficile, à partir des données disponibles, de déterminer la source de ces lésions, trois types de problèmes ressortent néanmoins :

1. les accidents de circulation en marchant, grimpant ou descendant (se frappe ou chute),
2. les douleurs ou les "frapper sur" en meulant dans une posture difficile et
3. les engourdissements et douleurs aux mains et aux doigts imputés aux vibrations et au travail avec les bras au-dessus de la tête.

Parmi les accidents graves - et malgré les réserves quant à la possibilité de rechercher les accidents liés au meulage à l'intérieur de cette base de données - ceux qui ressortent le plus sont liés à **l'éclatement de la meule**, accidents mortels selon les données de la base VREN.

C) Les observations sur les postures, les efforts et les méthodes de travail

L'analyse ergonomique du travail observé a porté principalement sur trois éléments : premièrement, les postures et les efforts, ensuite, l'utilisation des outils et leurs modifications et, finalement, les méthodes de travail adoptées par les meuleurs. Les données recueillies lors des observations ont été complétées et confirmées lors des groupes de discussions et lors de l'évaluation comparative des meuleuses.

Considérons d'abord les postures et les efforts. Les postures adoptées et les efforts déployés par les meuleurs sont évidemment fonction des tâches à réaliser, de l'environnement physique, en particulier de l'espace disponible, et du type de surfaces ou d'arêtes à meuler : horizontales, verticales, au plafond, ou par points. Dans tous les cas le meulage est un **travail exigeant physiquement**. Toutefois, le meulage en espace restreint et le meulage au plafond (parfois les deux sont combinés) sont particulièrement pénibles, autant au niveau de la posture que de l'effort à exercer.

Les outils soit les meuleuses, les meules, les connections et les outils de remplacement des meules sont objets de **modifications** et sources de nombreux mécontentements de la part des meuleurs. En ce qui concerne les meuleuses, particulièrement pour les meuleuses à angles appelées également petites meuleuses, une **poignée** est souvent enlevée. Les meuleurs ont rapporté enlever les poignées car elles nuisent dans les espaces restreints. Même quand elle est présente, cette poignée est fréquemment inutilisée. L'observation du meulage en situation imposée (lors de l'évaluation comparative) a d'ailleurs permis de constater que, pour le meulage au plafond, l'utilisation des deux poignées exige un effort encore plus important et augmente le risque de recevoir la meuleuse sur soi en cas de dérapage de la meuleuse.

Les **gardes** des meuleuses sont souvent soient trafiqués : coupés, remontés à leur position la plus haute, soient carrément enlevés. Les gardes ne permettent pas au meuleur de bien voir la surface à meuler. Pour certaines tâches, la garde nuit à l'atteinte de la surface ou de l'arête à meuler. De toute façon, les meuleurs ne croient pas qu'en cas d'éclatement de la meule, la garde les protégerait, eux ou leurs voisins de travail.

Les meuleurs se fabriquent des outils pour enlever et poser les meules. Ils se plaignent du manque de standard dans ce domaine. Ils se plaignent également des raccords rapides ("quick connect") posés sur les boyaux d'air comprimés. Ils sont en effet plus rapides à installer que les raccords ordinaires, par contre ils diminuent de beaucoup le débit d'air, ce qui diminue la puissance de la meuleuse.

Les **méthodes de travail** adoptées par les meuleurs ont été étudiées. Trois aspects des méthodes de travail observées, qui diffèrent de ce qui est considéré comme les "bonnes méthodes de travail", méritent une attention particulière. Le premier aspect est **l'angle entre la meule et la pièce.** Théoriquement, la meule devrait être à plat sur la surface à meuler. En réalité on remarque que ceci est rarement le cas. D'une part, le fait de disposer la meule avec un angle par rapport à la surface permet au meuleur d'exercer une pression beaucoup plus juste et d'effectuer un meilleur travail. D'autre part, pour les petites meuleuses, la garde, si elle est bien placée, nuit au meulage à plat. Finalement, certaines positions de meulage sont presque impossibles à réaliser à plat.

Le second aspect intéressant concerne les **méthodes de préhension des meuleuses.** En effet, la prescription ici est de tenir la meuleuse par ses deux poignées, une main sur chaque poignée. Fréquemment, une main est posée sur le corps de la meuleuse, tandis que l'autre main tient la poignée à laquelle est raccordé le boyau d'alimentation pneumatique. Il est déconseillé de tenir la meuleuse par le corps, entre autres, car cela augmente les vibrations reprises par le membre supérieur. Toutefois, les résultats indiquent, non seulement que cette méthode de préhension fréquente permet d'effectuer un plus beau travail, mais encore que dans certains cas, elle est de loin la moins exigeante physiquement et elle permet un moins grand risque de perte de contrôle de la meuleuse.

Le troisième aspect de la méthode de travail concerne la pose et le **remplacement de la meule** sur la meuleuse. Le manque de standard de conception entre les meules et les meuleuses, de même que le manque d'outils standards de serrage et de desserrage, amène souvent les meuleurs à frapper avec la nouvelle meule pour forcer le desserrage de la vieille meule, ce qui augmente le risque de fêlure des meules.

D) Les équipements de protection individuelle

Les équipements de protection individuelle (EPI), nombreux pour le meulage manuel, sont également ressortis comme source de plusieurs problèmes : encombrement, incompatibilité des uns avec les autres, incompatibilité avec certains tâches, entretien insuffisant des casques Racal, poussières aux yeux lors de l'enlèvement des visières...

E) Les besoins des utilisateurs

Finalement, l'étude a permis de déterminer et de structurer l'ensemble des besoins exprimés par les divers utilisateurs en ce qui a trait aux aspects ergonomiques. Plusieurs caractéristiques désirées concernent les meuleuses, les meules, les gardes, l'alimentation pneumatique et les EPI. Toutefois, il est également ressorti un besoin de formation par rapport à l'opération sécuritaire des meuleuses

et un besoin de critères d'achats des meuleuses et des meules tenant compte des différents aspects de la SST et du travail. Ce dernier besoin a d'ailleurs fait l'objet d'une attention particulière. Le détail de la réflexion sur ce besoin de critères de sélection des meuleuses et des meules est rapporté dans un document à part, à l'annexe J du rapport synthèse.

RÉPERTOIRE DES GRILLES D'ANALYSES UTILISÉES

Grille # 1

Analyse sommaire des accidents graves

IRSST
Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec

Projet Meulage
Analyse sommaire des accidents graves

# VREN	DATE	QUART	TYPE D'ÉTABLISSMENT	TAILLE	ACCIDENTÉ	AGE	ANCIEN.	TACHE DU MEULEUR	POSTURE DU MEULEUR	TYPE ACCIDENT

# VREN	DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'ACCIDENT	CAUSES DE L'ACCIDENT	TYPE DE BLESSURE	SITE DE LA LÉSION

# VREN	Type de meuleuse	Marque de la meuleuse	Type Alimenta.	Vitesse de la meuleuse	Garde présent ou non	Type de meule	Marque de la meule	Vitesse de la meule	Commentaires de l'analyste (spécifié si angle dans la meule ou par)

Grille # 2

Données générales concernant l'établissement

IRSST
Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec

DONNÉES GÉNÉRALES CONCERNANT L'ÉTABLISSEMENT

Établissement : _____ Lieu : _____

Section, département : _____ Date : _____

Contact #1 : _____ Téléphone : _____

Contact #2 : _____ Téléphone : _____

Nom de l'analyste : _____ Nombre de travailleurs : _____

Nombre d'employés : de production : _____

d'entretien : _____

à l'ingénierie (ing. techniciens, etc) : _____

Quelle est la production annuelle de votre établissement? _____

Organisation du travail : Horaires de travail _____

Horaire et durée des quarts de travail : jour _____, soir _____, nuit _____

Combien de gens sont rattachés à la SST: _____

Représentant à la prévention : _____, patronal : _____, syndical : _____

Y a-t-il une ou plusieurs infirmières ? _____ À temps complet ou partiel ? _____

Faites-vous partie d'un groupe prioritaire ? _____ Y a-t-il un Comité SST ? _____ Paritaire ? _____

Quels sont les différents départements de l'établissement et le nombre de travailleurs par département?

DÉPARTEMENT	Nombre de travailleurs/dépt	Nb travailleurs/quart			Nb meuleurs/quart		
		jour	soir	nuit	jour	soir	nuit

Autres commentaires : _____

Grille # 3

Données sur le procédé de meulage

IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

DONNÉES SUR LE PROCÉDÉ DE MEULAGE

Établissement : _____ Lieu : _____

Section, département : _____ Date : _____

Contact #1 : _____ Téléphone : _____

Contact #2 : _____ Téléphone : _____

Nom de l'analyste : _____ Nombre de travailleurs : _____

N.B.: NOTER LA SOURCE DE CES RÉPONSES (D, C, T, O)[1]

Quels sont les différents types de postes où il y a meulage ?

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Quels sont les différents types de procédés de meulage ? Les décrire.

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

[1] D signifie document; indiquer de quel type de document il s'agit : catalogues, liste de magasiniers, procédures de travail, etc.
C signifie un cadre, un contremaître ou un autre représentant de l'employeur.
T signifie un travailleur; indiquer s'il s'agit d'un opérateur (meuleur) ou d'un travailleur de maintenance.
Pour C ou T indiquer par un S si la personne est représentante en SST.
O signifie que l'information recueillie l'a été par observation.

Décrire les différentes méthodes de travail des procédés de meulage (meulage circulaire, à angle, par sautillement, etc).

Quels sont les principales particularités des différents types de meulage ?

Peut-on associer les différents types de pièces moulées, ou de matériaux, ou de formes (ou configuration), à différents types de procédés de meulage ? Si oui, pouvez-vous associer les types de pièces, de matériaux ou de formes aux différents types de procédés de meulage ?

Existe-t-il différents niveaux de précision du meulage ? Si oui, les décrire. Donner les conditions de ces différents niveaux de précision (types de pièces, types de procédés, etc).

Quels sont les critères de qualité attendus, formels et informels ?

Quels sont les types de procédés en amont du meulage ?

Quels sont les types de procédés en aval du meulage ?

Existe-t-il des manuels d'utilisation concernant les meuleuses et les meules et quel est leur contenu en ce qui concerne l'entreposage, la manipulation, l'opération et l'entretien ? Ces manuels sont-ils disponibles aux meuleurs ?

Quelle est la formation reçue par les meuleurs concernant l'opération de même que la SST ?

Quelle est la formation reçue par le personnel d'entretien concernant le meulage et la SST ?

Existe-t-il des manuels de formation disponibles concernant les meuleuses et les meules et quel est leur contenu en ce qui concerne l'entreposage, la manipulation, l'opération et l'entretien ? Ces manuels sont-ils disponibles aux meuleurs ?

Grille # 4

Données sur les équipements de protection individuelle

DONNÉES SUR LES ÉQUIPEMENTS DE PROTECTION INDIVIDUELLE

Établissement:_____ Lieu:_____

Section, département:_____ Nombre de travailleurs:_____

Contact #1 :_____ Téléphone:_____

Contact #2 :_____ Téléphone:_____

Nom de l'analyste:_____ Date:_____

Données sur les équipements de protection individuel

Équipement	Port Obligatoire?		Fournis par l'entreprise?		Est-il porté?		Raisons	Source
	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non		
Casque								
Visière Quel type?								
Lunettes								
Lunettes-visière								
Masque Quel type?								
Bottes								
Genouillière								
Vêtements Quel type?								

Équipement	Port Obligatoire?		Fournis par l'entreprise?		Est-il porté?		Raisons	Source
	Oui	Non	Oui	Non	Oui	Non		
Tablier Quel type?								
Gants Quel type?								
Protecteur contre le bruit Quel type?								
Harnais ou ceinture de sécurité								
Autres								

Source: C signifie un cadre, un contremaître, ou un autre représentant de l'employeur
T signifie un travailleur (pour C et T indiquer par la lettre S si la personne est représente en SST. O signifie que l'information recueillie l'a été par observation.

Grille # 5

Données sur les postures de travailleurs lors du meulage

DONNÉES SUR LES POSTURES DES TRAVAILLEURS LORS DU MEULAGE

Établissement:_____ Lieu:_____

Section, département:_____ Nombre de travailleurs:_____

Contact #1 : _____ Téléphone:_____

Contact #2 : _____ Téléphone:_____

Nom de l'analyste:_____ Date:_____

Données sur le type de pièces meulées

Forme de la pièce:

_____

_____

_____

Dimensions approximatives de la pièce

_____

_____

Partie de la pièce meulée (intérieur, extérieur, concave, convexe....)

_____

_____

_____

Quelle type de meuleuse utilise-t-on et pourquoi?

_____

_____

_____

Quelle type de meule utilise-t-on et pourquoi?

_____

_____

_____

Le travailleur est-il directement sur la pièce, est-il au sol ou est-il grimpé (sur quoi est-il grimpé (escabeau, madrier, ...)

_____

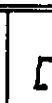
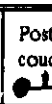
_____

_____

Données sur les postures

Date de l'observation	Nom de la Compagnie	Nom du meuleur observé

Heure	Activité	Posture dos-bras	Posture jambes	Grimpé (sur quoi)	Localisation de l'effort	Direction de la poussée	Direction du mouvement	Évaluation de l'effort	Remarques

Posture du dos et des bras							Posture des jambes							Posture couchée 
	A	B	C	D	E	F		G	H	I	J	K	L	M

Localisation de l'effort	Main M	M.Sup MS	Tronc T	Corps C	Autre A		Évaluation subjective de l'effort	Faible F	Modéré M	Important I	Très Import. TI	Autre A

Grille # 6

Tableau pour l'analyse des enregistrements vidéo des postes de travail

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION **1**

2. DESCRITPTION DES ACTIVITÉS DE L'ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES BESOINS ET ATTENTES DES UTILISATEURS **2**

2.1 ANALYSE DE LA LITTÉRATURE ET DE LA DOCUMENTATION 2

2.2 ENTRETIENS ET OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES SUR LE TERRAIN 4

2.3 ENTRETIENS SEMI-DIRIGÉS 6

2.4 ANALYSE DES TENDANCES ACTUELLES DANS LA CONCEPTION DES MEULES ET MEULEUSES 7

3. SYNTHÈSE DES BESOINS ET DES ATTENTES DES UTILISATEURS **9**

4. ÉTUDE COMPARATIVE **11**

4.1 PRÉPARATION DU SONDAGE ET DES ESSAIS COMPARATIFS 11

4.2 ANALYSE DES RÉSULTATS DU SONDAGE COMPARATIF 28

4.3 RÉSULTATS DES ESSAIS COMPARATIFS 47

ANNEXE 1: QUESTIONNAIRE DU SONDAGE COMPARATIF .....

ANNEXE 2: ENSEMBLE DES RÉSULTATS RECUEILLIS AU COURS DES SONDAGES COMPARATIFS .....

1. INTRODUCTION

Ce projet de recherche visait principalement à établir une base de connaissance permettant d'élaborer des recommandations afin d'établir adéquatement les priorités de recherche en ce qui concerne le procédé de meulage. Pour ce faire, il a été décomposé en plusieurs blocs d'activités parmi lesquels on retrouve entre autres une analyse des besoins et des attentes des clients, conformément à un des principes de base de l'ingénierie simultanée qui a été adoptée pour ce projet.

La satisfaction des besoins des clients est un élément essentiel et, à cette fin, les activités suivantes ont été réalisées: une étude évaluative préliminaire de la littérature suivie des activités nécessaires à l'évaluation systématique des besoins et des attentes en groupes de travail par des observations sur le terrain, une série d'entrevues personnelles et de groupe et une étude comparative sur des meules et des machines à meuler dans différentes configurations.

Ce rapport présente donc la description des activités réalisées de même que les résultats obtenus.

2. DESCRITPTION DES ACTIVITÉS DE L'ANALYSE PRÉLIMINAIRE DES BESOINS ET ATTENTES DES UTILISATEURS

Comme énoncé précédemment, la satisfaction du client est l'élément le plus important de la philosophie de l'ingénierie simultanée. Ainsi, tout le processus de développement de produits de l'ingénierie simultanée est conditionné par la nécessité de bien identifier et de satisfaire les besoins SST et fonctionnels du client. À cette fin, voici la description des activités qui ont été réalisées et les résultats obtenus.

2.1 Analyse de la littérature et de la documentation

L'analyse de la littérature menée dans le cadre de ce projet avait quatre objectifs principaux. Le premier objectif était de donner un aperçu des tendances générales actuelles dans la conception des meuleuses. Le second objectif était d'identifier les principaux besoins des utilisateurs, compte tenu des conditions d'opération et de la technologie disponible. Le troisième objectif était de répertorier les accidents les plus graves et les plus fréquents impliquant les meuleuses, ainsi que d'analyser les circonstances de ces accidents. Enfin, le quatrième objectif était l'analyse des technologies et des solutions (nouvelles et existantes) pour la maîtrise des risques inhérents à l'utilisation des meuleuses.

Les informations issues de ces analyses visaient principalement à compléter et appuyer celles obtenues lors des visites sur le terrain. On pourrait croire qu'il existe une littérature abondante sur le sujet. Mais en fait, nous n'avons retrouvé aucune autre étude descriptive ou analytique sur les accidents impliquant des meuleuses portatives. Il existe toutefois une abondante littérature descriptive sur la nature des risques (risques d'éclatement de meule, risques de projection, risques de contact avec la meule en mouvement, etc.). De plus, une littérature encore plus abondante, prescriptible cette fois, traite des bonnes méthodes d'entreposage, de manipulation et d'installation des meules, du bon entretien et de la bonne utilisation des meuleuses, recommandant entre autres des vitesses de rotation

maximales sécuritaires et des gardes protecteurs. Plusieurs de ces documents traitent aussi des équipements de protection individuelle (EPI) que doit porter le meuleur. Ceci est un des résultats du fait que plusieurs pays ont émis des normes concernant les meules et les meuleuses (portatives ou fixes). Les normes françaises sont particulièrement nombreuses: on en retrouve une vingtaine référencées en bibliographie (les normes commencant par NF). Il existe aussi quelques normes ANSI aux États-Unis [ANSI B7.1; B11.9] et quelques normes internationales ISO [ISO 525; 666; R603; 1117; 2933] concernant les meules et/ou les meuleuses.

Finalement, rarissimes sont les documents traitant d'amélioration de la sécurité et dont les solutions semblent concrètes et applicables à l'exception de certains catalogues de produits directement offerts par quelques compagnies désireuses d'offrir des produits plus fonctionnels et sécuritaires.

La recherche bibliographique sur les brevets nous a permis de faire ressortir plus de 200 brevets concernant les meules et /ou les meuleuses qui nous intéressent, associés à la SST et ce, pour la période de 1982 à 1995. Des 200 titres, seulement une trentaine semblaient pertinents et ont été commandés. Sur les seize brevets reçus, quatre concernent les vibrations, quatre les poussières, un le bruit de la meule et sept la sécurité comme telle. Parmi ceux-ci, six traitent des carters de protection et un de la composition de la meule. Aucun des brevets dont nous avons eu connaissance ne traitent de reconception de la meuleuse où des composantes de sécurité sont intégrées au procédé au même titre que les autres caractéristiques de la machine.

Selon les dires des divers intervenants rencontrés en usine, il y a eu très peu de changement significatif dans le domaine depuis les quinze dernières années, ce qu'appuie et confirme en réalité la revue de la littérature concernant la sécurité du procédé de meulage.

Les informations issues de ces analyses visaient principalement à compléter et confirmer les informations obtenues lors des visites sur le terrain. Ces informations sont donc intégrées aux résultats présentés aux trois prochaines sections de ce chapitre. Le tableau suivant présente les types de documents consultés. Une bibliographie complète est également présentée à la fin du rapport synthèse du projet.

Tableau 2-1 Documents consultés pour l'analyse de la littérature et de la documentation

Type de documents
Rapports de recherche
Publications scientifiques
Documents techniques de fabricants (1993 à 1995)
Brevets (US, 1982 à 1995)
Autres documents

2.2 Entretiens et observations préliminaires sur le terrain

Dans le cadre de l'étude évaluative préliminaire, plusieurs visites sur le terrain ont été effectuées par les membres du groupe de recherche. Les visites préliminaires avaient les objectifs suivants:

- présenter le projet aux différents intervenants des usines participantes;
- recueillir des informations sur l'usine, les postes de travail, les procédés, les outils utilisés, leur entretien, les procédures d'achat ainsi que sur les accidents et la prévention;
- se familiariser avec l'activité de travail et amasser de l'information dans le but de préparer les grilles d'observation utilisées lors des visites subséquentes.

Ces visites préliminaires ont été suivies de secondes visites plus structurées avec des questions beaucoup plus précises et une orientation marquée vers l'analyse ergonomique des différentes situations de travail.

Les entreprises sélectionnées pour ces visites étaient situées dans plusieurs régions de la province. Elles étaient également assez représentatives des différents types de production que l'on retrouve au Québec. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques des entreprises visitées.

Tableau 2-2 Principales caractéristiques des entreprises visitées

Visite	Région	Nom de l'entreprise	Types de produits
1	Lévis	MIL Davie	Construction navale
2	Sorel	GEC Alshtom	Équipements hydroélectriques
3	Sherbrooke	Ingersoll Rand	Équipements de pâtes et papiers
4	Lachine	GE Hydro	Turbines hydroélectriques
5	Lachine	Dominion Bridge	Structures de ponts

L'ensemble des visites ont permis au groupe de recherche de se familiariser avec le milieu, de mieux connaître les habitudes de travail des utilisateurs de meuleuses et d'obtenir un aperçu des principales contraintes du métier. Ces visites ont également permis d'établir une terminologie commune avec les utilisateurs de meuleuses. En effet, les termes employés par les personnes sur le terrain diffèrent souvent beaucoup de ceux que l'on retrouve dans la littérature et la connaissance du langage des utilisateurs est absolument nécessaire à la compréhension de leurs besoins. Ce dernier point, la cueillette et la compréhension des besoins, était un objectif important des visites préliminaires. Ces visites nous ont également permis d'identifier les principaux risques d'utilisation des meuleuses portatives, dont une analyse est présentée à l'annexe H. Enfin, nous avons pu recueillir lors de ces visites quelques idées, suggestions et solutions proposées par les utilisateurs de meuleuses pour la maîtrise des risques ou la satisfaction de leurs besoins. Ces idées de solutions potentielles sont également présentées par l'annexe H.

2.3 Entretiens semi-dirigés

Dans le but de valider et de compléter les informations recueillies par le biais des entretiens et des observations lors des visites, des groupes de discussions (communément appelés "focus group") ont été organisés. Cette dernière approche consiste à réunir différentes personnes ayant à interagir de près ou de loin avec le "produit" et à lancer une discussion (semi-dirigée) afin de recueillir leurs commentaires sur un sujet précis. Cette approche est souvent utilisé en combinaison avec d'autres outils de recherche des besoins afin de valider les informations déjà obtenues. Il suffit donc de provoquer des échanges sur des sujets bien planifiés entre des gens ayant différentes expertises et expériences.

Plus spécifiquement pour ce projet, trois groupes de discussions ont été formés par des intervenants provenant de trois usines différentes. Le premier groupe était formé de meuleurs d'expérience, le deuxième de gens responsables de l'entretien des meuleuses ou de tous les autres équipements utilisés par les meuleurs dans leur usine respective et enfin le troisième groupe par des contremaîtres et des responsables de la SST. Chacun de ses groupes étaient animés par un membre du groupe de recherche, lui-même accompagné d'un secrétaire, également du groupe de recherche, afin de prendre en note les différents points pertinents des discussions. La méthodologie utilisée pour ces "focus group" était basée sur la recherche des problèmes, des besoins et des solutions par rapport aux différents thèmes de discussions suivants:

- caractéristiques de meuleuses et des meules;
- environnement de travail et ingénierie des procédés;
- organisation du travail;
- entretiens et sources d'énergie;
- processus d'achat des meuleuses, des meules et des accessoires;
- accidents, incidents, passer-proche;
- formation et pratiques sécuritaires;
- accessoires, équipement de protection individuelle (EPI);
- nouveautés à tester et améliorations.

Bien sûr, les participants des différents groupes de discussions n'avaient pas les mêmes expertises et en conséquence, la liste des thèmes précédente ne fut pas traitée dans la même séquence et avec le même niveau de détail pour chacun des groupes.

2.4 Analyse des tendances actuelles dans la conception des meules et meuleuses

Les documents consultés pour cette analyse étaient surtout des documents techniques des principaux fabricants de meules et meuleuses. Certaines publications scientifiques, issues de ces mêmes fabricants, ont également été consultées. Parmi les marques de meules et meuleuses étudiés, on retrouve:

Tableau 2-3 Liste des fabricants de meules et meuleuses répertoriés

- Walter
- Makita
- Atlas Copco
- Hitachi Power Tools
- Black & Decker
- Milwaukee
- Chicago Pneumatic
- Universal Power Canada
- DEPRAG Pneumatic Tools
- Ingersoll-Rand
- Air Turbine Tools
- Tyrolit
- Flexovit
- JET
- United Abrasives

À l'analyse de ces documents, nous avons pu constater que certaines tendances générales se retrouvent chez tous les fabricants.

Nous avons entre autres pu constater une certaine tendance, quoique non-généralisée, à intégrer des **éléments de sécurité** dans la conception. Ces éléments partagent toutefois une caractéristique commune: ils ne favorisent pas la prévention intrinsèque (élimination des risques à la source) mais la réduction de la probabilité d'occurrence des événements à risque.

Plusieurs autres tendances de conception ayant des impacts sur la satisfaction des besoins fonctionnels des utilisateurs ont été observées suite à l'analyse des documents techniques des fabricants. Ces tendances ont d'ailleurs été évaluées lors des groupes de discussions et également lors de l'étude comparative dont les résultats sont présentées ultérieurement dans les prochaines sections de cette annexe.

3. SYNTHÈSE DES BESOINS ET DES ATTENTES DES UTILISATEURS

On distingue quatre types de besoins pour un produit donné. Le premier comprend les besoins "de base", c'est à dire les besoins généralement non exprimés par les clients et qui, peu importe la façon dont ils seront remplis, n'influenceront pas de façon positive la satisfaction du client. Le client assume qu'ils seront automatiquement remplis. Un exemple de besoin de base non-exprimé par les opérateurs est de "faire démarrer la meuleuse". Les besoins de performance sont ceux qui définissent le niveau de satisfaction attendu face à la fonctionnalité du produit. Un exemple de besoin de performance exprimé par les opérateurs est de "Pouvoir faire varier la vitesse de rotation de la meule". Les besoins d'innovation sont des besoins spécifiques exprimés par les clients, ou proposées par les concepteurs, qui visent à combler une lacune ou une innovation dans la fonctionnalité du produit. Un exemple de besoin d'innovation exprimé par les opérateurs est d'être " Puissante et légère à la fois ". Enfin, le dernier type de besoin est celui des besoins de contrainte, qui tendent souvent à servir de limites aux autres besoins. Les besoins de SST font souvent partie de ce type de besoins.

Les visites sur le terrain étaient la principale source d'information concernant les besoins des utilisateurs de meuleuses portatives. Les différentes visites nous ont permis de recueillir plusieurs observations et commentaires rattachés aux besoins fonctionnels et de sécurité tant des utilisateurs de machines à meuler que des responsables de l'entretien ou des contremaîtres et coordonnateurs de la SST du milieu. Ces observations et commentaires, ainsi que les informations obtenues par l'analyse de la littérature, nous ont permis d'identifier leurs principaux besoins. Le tableau suivant présente les besoins identifiés. Il est important de mentionner que cette liste n'est que préliminaire et que les besoins n'ont pas été validés ou pondérés par les utilisateurs.

Tableau 3-4 Liste préliminaire des principaux besoins énoncés lors des visites

- Poignée plus adhérante, plus confortable et isolante
- Position des poignées ajustable
- Choix de grosseur de poignée
- Meuleuse plus puissante
- Ne bourre pas
- Montage et démontage facile et rapide de la meule (système de serrage amélioré et uniformisé)
- Position du garde ajustable
- Installation du garde facile et rapide
- Offrir une bonne visibilité (garde, ...)
- Protéger de la projection de poussières ou autres
- Empêcher perforation du boyau d'air
- Efficacité
- Moins bruyant
- Gâchette facile à engager et désengager avec faible force de maintien (Low trigger force, positionnement et fonctionnalité)
- Loquet de sécurité plus facile à engager et à désengager (positionnement et fonctionnalité)
- Système d'arrêt d'urgence efficace
- Système de connexion (entrée d'air) facile
- Arbre de montage uniforme d'une meuleuse à l'autre
- Meuleuse légère
- Facilement manipulable
- Système simple et efficace du maintien automatique de la gâchette (Lock off throttle)
- Facilite l'accessibilité aux endroits restreints
- Faire une coupe "froide"
- Maintenir le RPM
- Régulariser (contrôler) la pression
- Durabilité
- Avoir des boyaux de couleurs
- Robustesse, résistance aux chocs (chutes, poignées qui cassent, ...)
- Moins de vibrations
- Motorisation plus résistant
- Système de rangement des équipements et des accessoires
- Abordable
- Meule bien balancée
- Meuleuse bien balancée
- Compatibilité entre les différents accessoires de protections (EPI)
- Entretien facile et simple
- Bonne formation

4. ÉTUDE COMPARATIVE

L'étude comparative a été décomposée en deux étapes; un sondage comparatif et des essais comparatifs. Les sondages comparatifs (ou competitive benchmarking) sont des activités qui amènent **différents clients ou utilisateurs** à comparer, par rapport à leurs besoins ou attentes, différents produits concurrents entre eux. Ce genre d'activités amène souvent les utilisateurs à positionner des produits similaires par rapport à des produits de référence en fonction de plusieurs critères. Pour leur part, les essais comparatifs entre différents produits (engineering benchmarking) sont des comparaisons exclusivement techniques et faites par rapport à des spécifications ou des caractéristiques. Les objectifs principaux de ces activités sont de déterminer les niveaux de performance des produits analysés et de vérifier du même coup la cohérence entre les réponses au sondage qui donne une perception des gens face à une caractéristique quelconque et les résultats des essais qui sont des évaluations objectives du niveau de cette caractéristique.

4.1 Préparation du sondage et des essais comparatifs

Afin de réaliser ces sondages et ces essais comparatifs, un banc d'essai fut construit et sur lequel ont travaillé 4 meuleurs pendant deux jours, à raison de deux meuleurs par jour. Les objectifs de cette étude étaient de faire opérer ces meuleurs afin de leur faire comparer différentes meules et meuleuses sur différents types d'acier et dans différentes conditions ou positions de meulage. Le banc d'essai se divise en deux cellules permettant respectivement de meuler sur de l'acier dur et sur de l'acier mou et chacune de ces cellules offre deux configurations de meulage différentes (voir Figure 4.1 et Figure 4.2); le meulage en position basse (Figure 4.3) et le meulage en position haute (Figure 4.4).

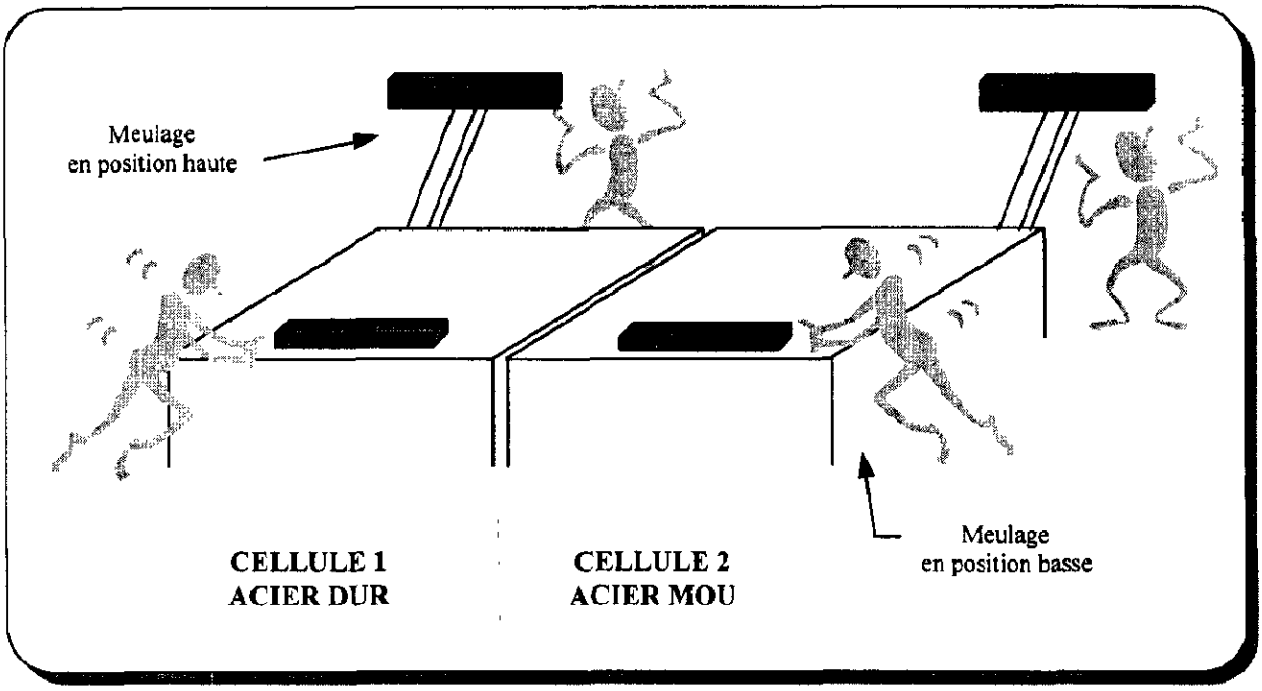


Figure 4.1 Schématisation du banc d'essai de l'étude comparative.

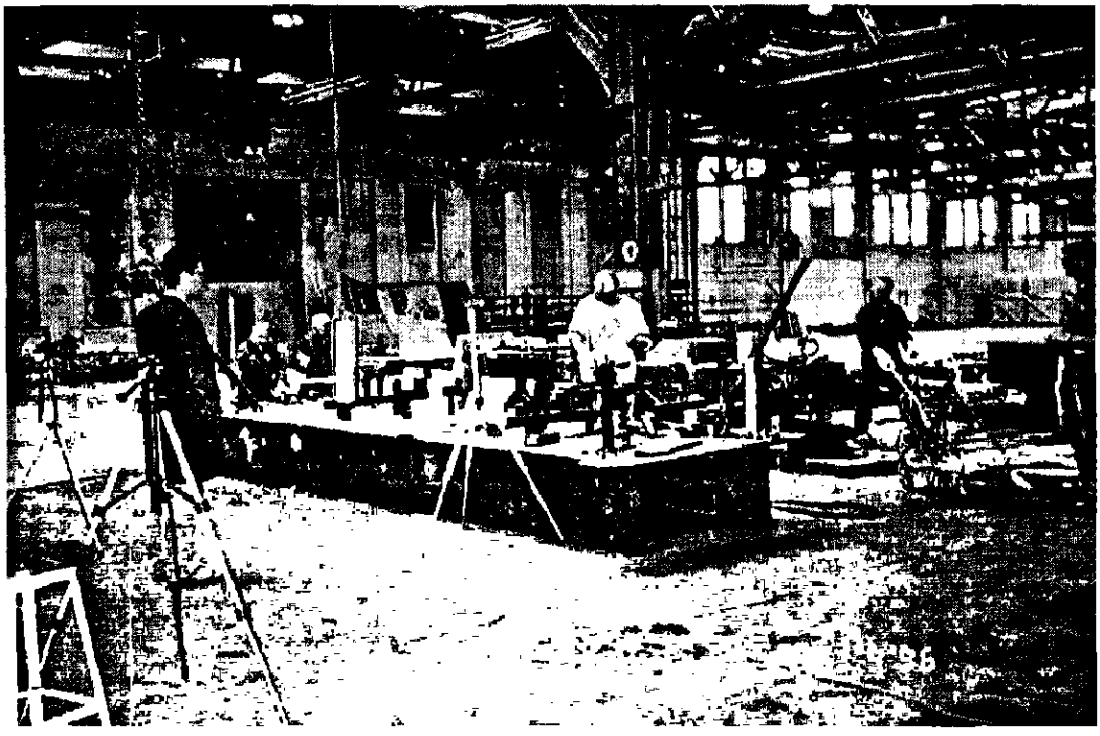


Figure 4.2 Site des essais: usine Dominion Bridge de Lachine, les 4 et 5 juin 1996.

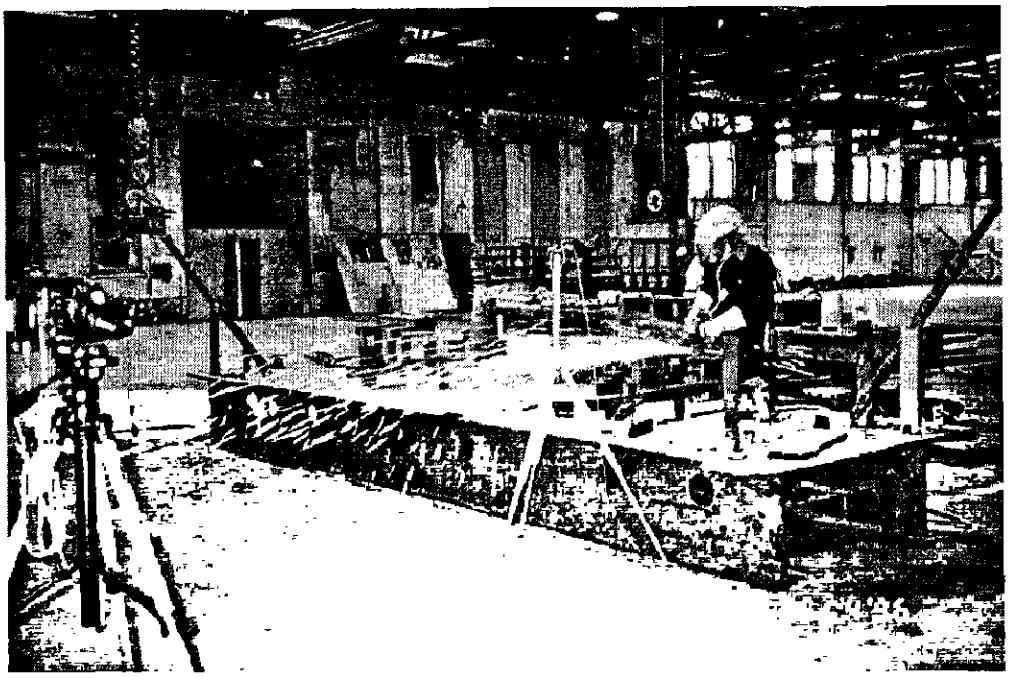


Figure 4.3 Meulage sur acier dur en position basse

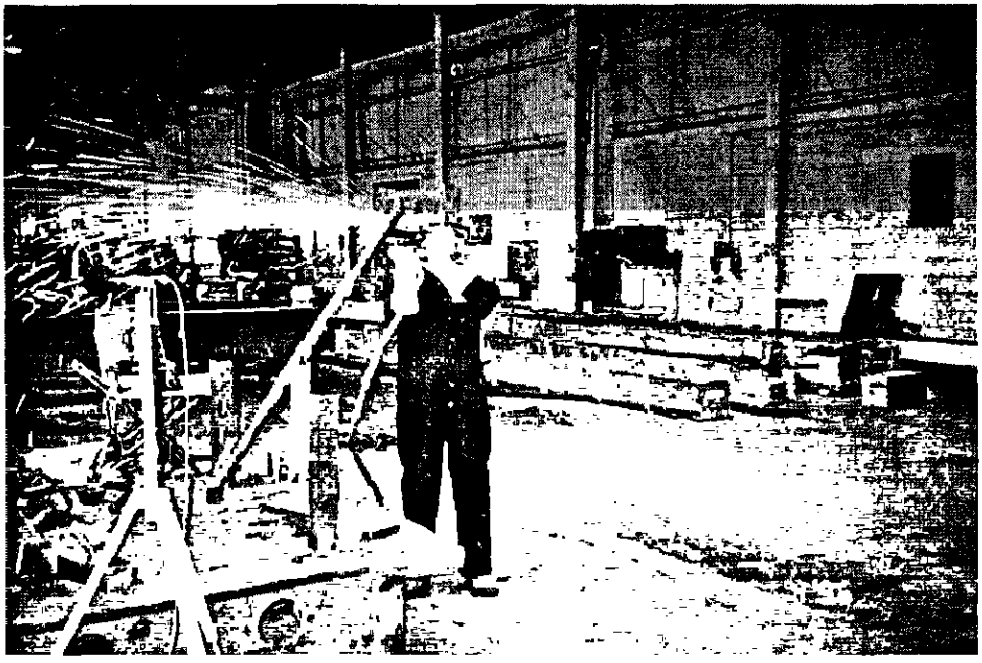


Figure 4.4 Meulage sur acier dur en position haute

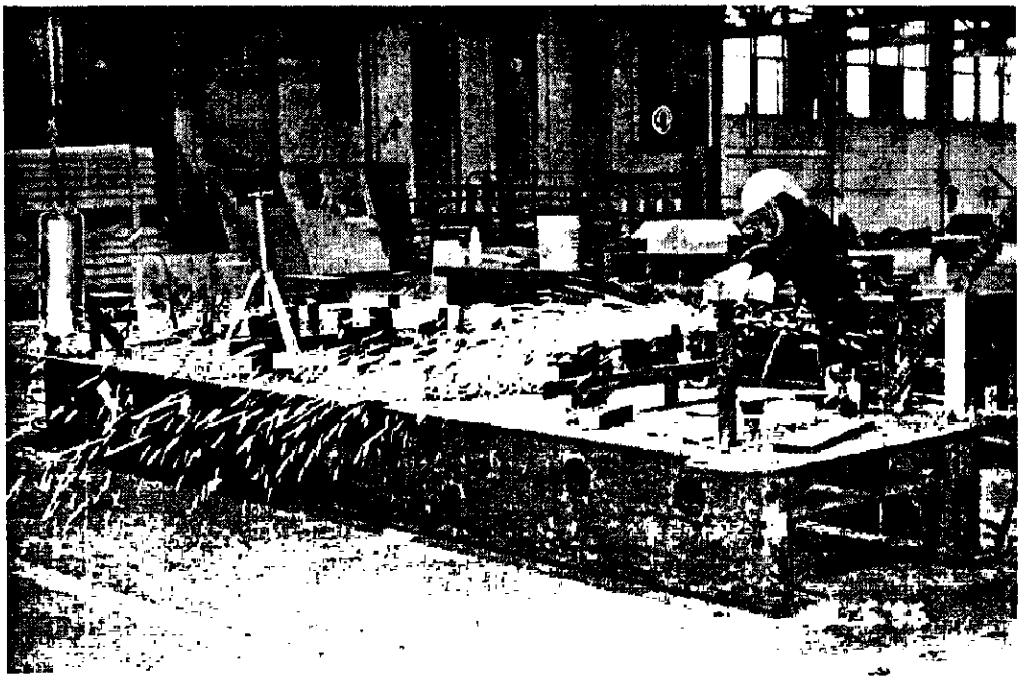


Figure 4.5 Meulage sur acier dur en position basse

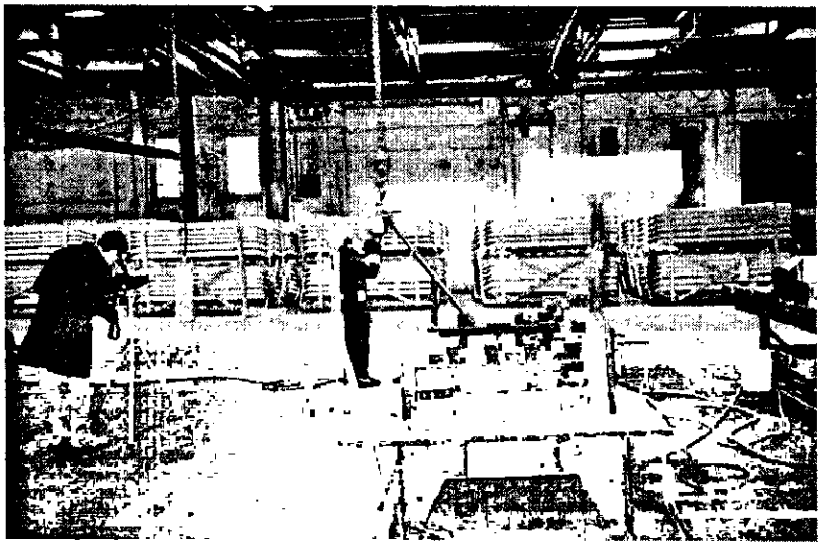


Figure 4.6 Meulage sur acier mou en position haute et enregistrement vidéo des mouvements et positions de l'opérateur.

Le contenu initial des essais proposait de tester un total de six meuleuses, c'est-à-dire, trois meuleuses droites (gros grinders) et trois meuleuses à angle (grinders à 90°), combinées avec deux modèles de meules à boisseau pour les meuleuses droites et deux modèles de meules plates pour les meuleuses à angle.

Tableau 4-1 Contenu initialement proposé pour les essais

VARIABLES	NOMBRE DE MODALITÉS	NIVEAUX	SYMBOLES
Meuleuses	6	3 meuleuses droites 3 "meuleuses à angle"	A, B, C D, E, F
Meules	2	2 Meules plates 2 meules à boisseau	P1 et P2 B1 et B2
Aciers	2	Acier dur Acier mou	
Configurations de meulage	2	Position basse Position haute	Configuration A Configuration B
Meuleurs	4	Meuleurs A-B-C-D	Meuleurs A-B-C-D
TOTAL	**192**		

*Note: Le nombre total d'essais ci-haut présenté s'obtient en multipliant le nombre de modalités pour former une matrice d'essais complète

Le choix des meules et meuleuses a été effectué à partir de propositions faites par les entreprises participantes à l'étude comparative. En fait, le groupe de recherche a demandé à chacune des entreprises (3) d'identifier 3 modèles des meuleuses droite, 3 modèles de meuleuses à angle ainsi que 2 modèles de meules à boisseau et 2 modèles de meules plates pour lesquels ils avaient un intérêt à comparer leur performance à différents niveaux. Nous avons donc tenter de concilier l'ensemble des propositions en tenant compte tout particulièrement d'intégrer le premier choix de chacune des compagnies participantes. Pour ce qui est des meuleuses, la sélection n'a pas causée de problème. Toutefois, le choix des meuleuses imposait des restrictions quant au choix des meules à utiliser. On doit agencer à chacune des meuleuses une meule respectant le diamètre maximum acceptable, résistant aux vitesses de rotation et se fixant aux tiges de montage. Cependant, il existe une grande variété dans les meuleuses. Par exemples, les connections des entrées d'airs ne sont pas standards et nécessitent des tas de "fittings", les vitesses de révolution et le diamètre de meule acceptable diffèrent d'une meuleuse à une autre et les tiges ou arbres de montage ont une dimension variable d'un modèle de meuleuse à un autre (1/4", 3/8",

½", ...) et requiert des outils différents pour installer et enlever les meules. Ce manque de standardisation dans la conception des meuleuses compliquait donc le choix des meules puisqu'il était difficile d'en trouver, parmi les meules proposées (à boisseau ou plate), qui s'adaptaient avec toutes les meuleuses (droite et à angle). Nous avons donc été contraint de n'utiliser qu'une seule meule plate pour les meuleuse à angle et une meule à boisseau pour les meuleuse droites. Le groupe de recherche s'est finalement arrêter sur la liste des équipements décrit dans le tableau suivant et illustrer par les figures qui suivent :

Tableau 4-2 Liste des meuleuses et meules utilisés pour l'étude comparative.

Groupe	Symbole	Descritption meuleuse	Description meule
Meuleuses droites	Meuleuse A	Henry Tools Cleveland Modèle: 56-VL	Meule à boisseau Walter, 12-A 006, 6" ∅
	Meuleuse B	Atlas Copco Modèle: G2415	Meule à boisseau Wright Abrasives, A42-R, 4" ∅
	Meuleuse C	Atlas Copco Turbo Modèle: GTG40S060-611	Meule à boisseau Walter, 12-A 006, 6" ∅
Meuleuses à angle	Meuleuse D	Chicago Pneumatic Modèle: CP-9119-12A5	Disque plat Carborundum, Type 27, Z24, 4" ∅
	Meuleuse E	Uryu Modèle: UAG-50SBL-109	Disque plat Carborundum, Type 27, Z24, 5" ∅
	Meuleuse F	Chicago Pneumatic Modèle: CP-9110	Disque plat Segro, America 5505, 4" ∅

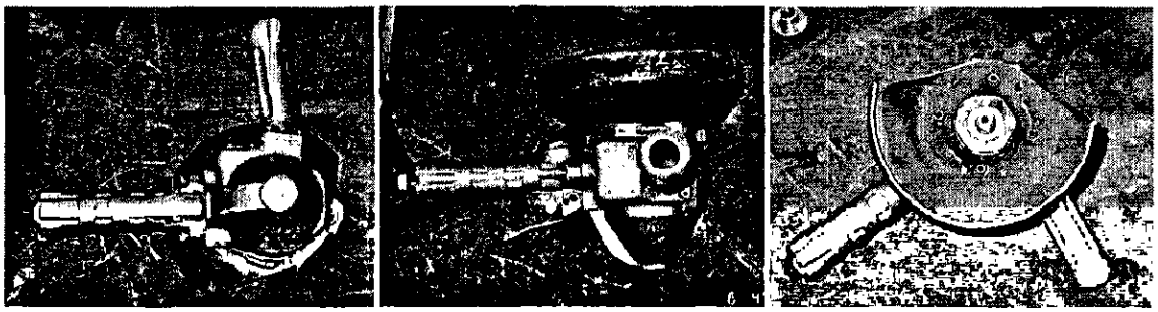


Figure 4.7 Trois vues de la meuleuse Henry Tools Cleveland (56-VL / meuleuse A)