



**HAL**  
open science

# Water Jetting Milling Model: Application at the Automobile Tyres Dismantling

Alain Cornier

► **To cite this version:**

Alain Cornier. Water Jetting Milling Model: Application at the Automobile Tyres Dismantling. Engineering Sciences [physics]. Arts et Métiers ParisTech, 2004. English. NNT : 2004ENAM0007 . pastel-00001098

**HAL Id: pastel-00001098**

**<https://pastel.hal.science/pastel-00001098v1>**

Submitted on 2 Mar 2005

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

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

Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers  
Centre de Paris

# THÈSE

présentée pour obtenir le titre de

**DOCTEUR**  
de  
**L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE**  
**D'ARTS ET MÉTIERS**

Spécialité : Mécanique

par

**Alain CORNIER**

---

**DEVELOPPEMENT D'UN MODELE D'ENLEVEMENT DE MATIERE PAR  
GRANULATION UTILISANT LE JET D'EAU HAUTE PRESSION : APPLICATION AU  
DEMANTELEMENT DE PNEUMATIQUES**

---

*soutenue le 04 juin 2004 devant le jury composé de*

MM.	D.	BRISSAUD	Professeur à l'INPG, Grenoble	Rapporteur
	D.	FROELICH	Professeur à l'ENSAM, Chambéry	
	D.	GORDINE	Docteur-ingénieur de recherche à l'Ecole des Mines, Paris	
	F.	LAPUJOLADE	Maître de Conférence à l'ENSAM, Paris	
	J.F.	RIGAL	Professeur à l'INSA, Lyon	Rapporteur
	B..	YANNOU	Maître de Conférence à l'Ecole Centrale, Paris-HDR	

---

# Remerciements

**En tout premier lieu aux deux acteurs principaux associés à ce travail : le technicien de laboratoire et mon épouse Suzanne. Ces deux acteurs étant une seule et même personne, qu'elle en soit doublement remerciée.**

**Merci également à toutes les personnes qui m'ont assisté à un moment ou à un autre dans mon travail.**

**Une pensée particulière pour mon père qui a longtemps voulu faire une thèse sans que son travail à l'ENSAM lui laisse le temps de le faire : le vide est en partie comblé.**

# Sommaire

<b>SOMMAIRE.....</b>	<b>1</b>
<b>NOMENCLATURE.....</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>CHAPITRE I : LE JET D’EAU H.P. : OUTIL ALTERNATIF AU BROYAGE.....</b>	<b>17</b>
<b>MECANIQUE</b>	
I. Introduction : procédés de démantèlement.....	17
II. Les procédés de démantèlement et recyclage.....	19
II.1.Le démantèlement par démontage puis broyage de mono-matériaux.....	19
II.1.1.Principe et moyens utilisés.....	20
II.1.2.Performances et limites.....	22
II.2.Le démantèlement par broyage complet puis tri.....	23
II.2.1.Principe et moyens utilisés.....	23
II.2.2.Travaux menés sur le broyage mécanique.....	26
II.3. Conclusion.....	31
III. Le démantèlement par jet d’eau H.P.....	31
III.1.Principe général du jet d’eau H.P.....	31
III.2. De la découpe au démantèlement.....	35
III.2.1.La découpe appliquée au démantèlement.....	35
III.2.2.Le jet d’eau appliqué au décapage.....	37
III.2.3.Du décapage au démantèlement.....	39
III.2.4 Premier bilan du démantèlement par jet d’eau.....	42
III.3. Outils jet d’eau et principaux paramètres.....	43
III.3.1.Têtes et buses jet d’eau.....	43
III.3.2.Paramètres du procédé.....	46
IV. Conclusion.....	47
<b>CHAPITRE II : ENLEVEMENT DE MATIERE PAR JET D’EAU H.P.....</b>	<b>49</b>
I. Introduction.....	49
II. La recherche en jet d’eau H.P. dans le monde.....	51
II.1. Création d’un jet fluide.....	52
II.2. Ecoulement dans l’air.....	52
II.3. interaction matériau / procédé.....	53
II.4. Bilan de l’activité internationale.....	53

III. Création d'un jet et écoulement à l'air libre.....	55
III.1.Création d'un jet fluide.....	55
III.2.Ecoulement d'un jet à l'air libre.....	57
III.2.1.Approche expérimentale.....	57
III.2.2.Approche théorique.....	59
III.3. Conclusion.....	61
IV. Etude des interactions entre jet d'eau H.P. et matériaux.....	62
IV.1. Interaction Matériau / procédé en jet d'eau abrasif.....	62
IV.1.1. Phénoménologie.....	62
IV.1.2. Modélisation de la découpe par jet d'eau abrasif.....	64
IV.1.3. Conclusion.....	66
IV.2. Phénoménologie de l'impact fluide.....	67
IV.3. Modélisation des interactions jet fluide / cible.....	73
IV.3.1. Modèle de Leu et al.....	74
IV.3.2. Modèle de Mabrouki.....	78
IV.3.3. Conclusion intermédiaire.....	80
IV.4. Etude de la découpe par jet d'eau pure.....	81
IV.4.1. Principe de la découpe à l'eau pure.....	81
IV.4.2. Première famille de modèles.....	83
IV.4.2.1. Modèle de Rehbinder.....	83
IV.4.2.2. Modèle de Hashish.....	84
IV.4.3. Deuxième famille de modèles.....	86
IV.4.3.1. Modèle de Wilkins et Graham.....	88
IV.4.4. Discussion.....	92
V. Conclusion générale.....	93
<b>CHAPITRE III : APPROCHE EXPERIMENTALE DE L'USINAGE.....</b>	<b>96</b>
<b>PAR JET D'EAU H.P.</b>	
I. Introduction.....	96
II. Etude exploratoire.....	97
II.1.Installation utilisée.....	97
II.1.1.Première exploration.....	99
II.1.2.Analyse des résultats.....	101
II.1.3.Synthèse et limites.....	103
II.2.Mise en évidence de la problématique.....	104
II.3.Premières conclusions et hypothèses.....	107
III. Etude expérimentale approfondie.....	108
III.1.Définition du banc d'essais spécifique.....	108

III.2. Etude interaction buse mono-jet / éprouvette.....	114
III.2.1. Plan d'expériences.....	115
III.2.2. Analyse des résultats.....	116
III.3. Approche expérimentale du modèle de Graham et Wilkins.....	118
III.3.1. Détermination expérimentale du coefficient de friction $C_f$ .....	119
III.3.2. Validation de l'analogie entre buse de découpe et buse rotative.....	121
III.3.3. Détermination de la profondeur de coupe.....	123
III.3.4. Comparaison modèle de Graham et modèle expérimental.....	124
III.4. Etude interaction buses multi-jets rotative / éprouvettes.....	124
III.4.1. Etude expérimentale.....	124
III.4.2. Caractérisation géométrique d'une buse multijets rotative.....	127
III.4.3. Interaction tête multi-jets rotative / éprouvettes.....	128
III.5. Conclusions et hypothèses relatives à l'enlèvement de matière.....	130
<b>CHAPITRE IV : MODELISATION DE L'ENLEVEMENT DE MATIERE PAR BUSES MULTIJETS ROTATIVE.....</b>	<b>131</b>
I. Hypothèses et démarche.....	131
II. Modèle prédictif issu de la théorie des pyramides.....	132
II.1. Démarche retenue.....	132
II.2. Modélisation des pyramides.....	137
II.2.1. Calcul des coordonnées de la base des pyramides.....	137
II.2.2. Calcul du volume de matière enlevée.....	140
II.3. Analyse des hypothèses retenues pour notre modélisation.....	141
II.3.1. Modélisation en 3D de l'enlèvement de matière.....	141
II.3.2. Analyse de l'hypothèse de non déformation.....	144
II.4. Conclusion quant à la théorie des pyramides.....	145
III. Modèle prédictif global.....	146
III.1. Démarche retenue.....	146
III.2. Modélisation du recouvrement.....	146
III.2.1. Calcul de la densité de passage des jets sur la surface.....	146
III.2.2. Calcul du facteur de recouvrement.....	150
III.3. Modélisation de l'enlèvement de matière.....	153
III.3.1. Essai avec un seul jet sur tête tournante.....	153
III.3.2. Analyse des résultats.....	156
III.3.3. Logiciel de calcul du profil et du débit de matière.....	157
III.3.3.1. Cas d'une tête à une seule buse.....	157
III.3.3.2. Cas d'une tête à quatre buses.....	159
III.4. Validation du modèle.....	161
III.5. Application méthode à une autre tête rotative.....	162

III.5.1.Caractérisation géométrique de la tête.....	163
III.5.2.Etude comparative du modèle et de l'expérimentation.....	163
IV.Discussion et première conclusion.....	164
<b>CHAPITRE V : APPLICATION AU CAS DES PNEUMATIQUES.....</b>	<b>166</b>
I. Généralités sur le recyclage des pneumatiques.....	166
I.1.Description des pneumatiques.....	166
I.1.1.Nature.....	166
I.1.2.volumes à traiter.....	167
I.1.3.Contexte réglementaire.....	168
I.2.Filières existantes.....	168
I.3.Répartition des pneus usagés valorisés en tonnes.....	170
II .Problématique du démantèlement des pneus par jet d'eau.....	170
II.1. Essais préliminaires.....	170
II.2. Premiers résultats et limites.....	171
II.3.Problématique industrielle.....	172
II.4.Etude de la séparation des fils métalliques.....	173
II.4.1. Approche géométrique du franchissement des nappes.....	173
II.4.2. Etude de l'hypothèse de mobilité des câbles.....	176
II.4.3. Etude de l'influence de la direction de passage.....	177
II.5.Conclusion.....	178
III.Conception d'un équipement de démantèlement.....	179
III.1.Cahier des charges.....	179
III.2.Solution retenue.....	179
IV.Conclusion.....	183
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>185</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>189</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>197</b>

## NOMENCLATURE

$A_j$	: section du jet,
$A_s$	: surface du substrat décapée
$A_w$	: surface de frottement du jet sur la matière
$B$	: quantité physique
$C$	: vitesse du son (ou vitesse du choc)
$C_0$	: vitesse du son sans perturbation
$c_{ev}$	: coefficient d'évasement du jet
$d_0$	: diamètre de saphir (buse)
$d_{ba}$	: distance qui sépare la buse de l'axe de rotation de la tête de décapage
$d_{tc}$	: distance de tir critique
$d_{tir}$	: distance de tir
$d_{to}$	: distance de tir optimale
$D$	: largeur de saignée
$e$	: énergie interne spécifique
$E$	: module d'Young
$F$	: force de friction du jet sur la matière
$LD$	: degré de libération d'un matériau après broyage,
$h_T$	: hauteur de coupe finale en jet d'eau abrasif,
$k_p$	: coefficient de perte de charge
$\dot{m}_0$	: débit massique à la sortie de la buse
$\dot{m}_m$	: débit massique dans une section du jet
$\dot{m}$	: débit massique dans une surface infinitésimale d'une section du jet en gouttelettes
$N$	: vitesse de rotation de la tête de décapage
$N_{fi}$	: part massique de particules libres d'un matériau après broyage
$N_{li}$	: part massique de particules non libres après broyage
$n$	: nombre d'échantillons analysés,
$n_b$	: nombre de buse



$DNg$	: nombre de gouttelettes par unité de surface pendant un temps Dt
$P$	: pression
$P_a$	: pression sur l'axe du jet
$P_s$	: pression de seuil spécifique au matériau
$r$	: distance entre le centre d'une section du jet et un point considéré dans la même section
$R$	: rayon du jet
$r_0$	: rayon de la buse $\left( r_0 = \frac{d_0}{2} \right)$
$R_r$	: contrainte limite à la rupture du revêtement
$R_u$	: contrainte ultime
$\mathbf{r}_e$	: masse volumique de l'eau
$t$	: coordonnée temporelle
$t_{expo}$	: temps d'exposition de la cible au jet
$U$	: vitesse suivant (X)
$U_0$	: vitesse initiale (ou à la sortie de la buse) (suivant X)
$U_p$	: vitesse particulière
$V_a$	: vitesse d'avance du jet ou de la tête
$V_r$	: vitesse de rotation de la tête
$w$	: largeur de l'empreinte du jet sur le revêtement.
$w_m$	: largeur maximale du décapage
$\underline{x}(x_1, x_2, x_3)$	: coordonnées spatiales
$X_b$	: longueur de la région d'écoulement continu
$X_c$	: longueur de cohérence du jet
$X_p$	: longueur de la zone d'écoulement à cœur potentiel
$X_v$	: fin de la région de l'écoulement en gouttelettes
$(X, Y, Z)$	: coordonnées d'un point de l'espace
$v$	: nombre adimensionnel défini par : $\left( \mathbf{v} = \frac{r}{R} \right)$
$m$	: viscosité dynamique.
$n$	: coefficient de Poisson
$b$	: perte de masse d'un revêtement par impact d'une gouttelette d'eau

$d$	: rayon d'une gouttelette
$w_b$	: perte de masse du revêtement par unité de surface
$k$	: facteur multiplicatif
$w_{b0}$	: seuil de perte de masse du revêtement par unité de surface
$\mu$	: viscosité dynamique de l'eau
$s$	: résistance du matériau
$h$	: coefficient d'amortissement du matériau.
$l_{co}$	: coefficient de contrainte
$l_{cr}$	: rapport du coefficient de contrainte par rapport au coefficient de résistance
$\left( \lambda_{cr} = \frac{\lambda_{co}}{\lambda_{re}} \right)$	
$s_{im}$	: contrainte d'impact moyenne d'une gouttelette
$l_{re}$	: coefficient de résistance

### **Indices**

$0$	: initial
$s$	: substrat (ou cible)
$r$	: revêtement
$p$	: particulière
$f$	: fluide (liquide ou eau)

## **INTRODUCTION**

Les impacts environnementaux liés à l'activité humaine sont nombreux et relèvent aussi bien de l'activité des ménages que de l'activité industrielle, qui alimentent notre vie de tous les jours en biens de consommation de plus en plus divers et nombreux. Nous citerons comme exemple d'impacts, les rejets atmosphériques, favorisant l'effet de serre et l'acidification de l'air, les rejets dans l'eau, favorisant son eutrophisation, ou l'exploitation des ressources non renouvelables, que ce soit pour produire de l'énergie ou des matériaux de construction. Ces impacts sont difficiles à réduire de façon globale, dans la mesure où ils sont imbriqués du point de vue de leurs effets et parfois sources de contradiction, lorsque l'on aborde les mesures à prendre pour les traiter de façon unitaire :

L'introduction des pots catalytiques sur les véhicules automobiles, afin de réduire les rejets de gaz à effet de serre, progrès notable du point de vue émissions dans l'air, s'est accompagné d'une augmentation de l'exploitation des ressources fossiles par définition non renouvelables.

L'Europe a fait le choix de s'intéresser à ces émissions polluantes dans l'eau et dans l'air, mais aussi plus récemment, de réduire la mise en décharge des déchets, relayée sur ce dernier point par le Japon mais aussi par les USA.

L'objectif est double :

- Limiter le volume de déchets mis en décharge, avec tous les problèmes d'espaces occupés et de pollution qui en découlent,

- Réduire la consommation de matières vierges non renouvelables par la voie du recyclage des matériaux.

Un arsenal juridique a été mis progressivement en place. Il est possible de citer :

- Le décret 94-609 du 13 Juillet 94 issu des Directives Européennes 94/62/CE, relatif à la valorisation des emballages,

- Le décret 2002-540 du 18 Avril 2002 et l'article L541-24, définissant les différentes familles de déchets (ménagers, industriels banaux, spéciaux, dangereux et ultimes) avec leurs spécificités de traitement et de mise en décharge,

Le décret 99-374 du 12 Mai 1999, issu de la directive 91/157/CE, relatif à la mise sur le marché et à l'élimination des piles et batteries,

- Le décret 2002-727 lié à la Directive 200/53/CE, imposant avant mise sur le marché, un niveau de valorisation élevé des futurs véhicules automobiles en fin de vie (95 % en masse pour l'automobile), le constructeur étant responsable du recyclage de son produit.,

- La Directive 2002/96/CE, imposant le même type de contraintes pour les produits électriques et électroniques.

Ce contexte implique que les produits soient conçus dans l'optique de leur recyclage (volet fin de vie de l'éco-conception), et que les techniques de retraitement des déchets, chutes et rebuts de fabrication soient développées en parallèle.

Certaines de ces techniques existent depuis très longtemps car, dès la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, s'est mis en place une activité de collecte et de recyclage des matériaux métalliques. Elle s'est industrialisée dans le dernier quart du siècle dernier, avec le déploiement de grosses unités de broyage et de tri des matériaux dans toutes les régions de France. Ce broyage, première étape du recyclage, a pour vocation de réduire un produit en petits morceaux de façon à :

- Densifier le lot de produits de afin d'en faciliter le transport,
- Libérer les unes des autres les différentes matières constituantes du produit, de façon à les trier ensuite sans risque d'erreur (suppression des liaisons entre matériaux),
- Obtenir des matériaux sous forme de morceaux de petites dimensions (broyat), adaptés aux procédés de traitement aval du process de recyclage : (capacité de chargement et optimisation de la fusion de l'acier, par exemple, pour un four électrique).

Cette recherche d'une faible granulométrie est fort contraignante en broyage, principalement pour des raisons économiques car il est difficile de passer en une seule opération d'un produit volumineux à un broyat de faibles dimensions. Le traitement de pneumatiques usagés de véhicules légers ou de poids lourds impose, par exemple, pour séparer la carcasse métallique du caoutchouc, un broyage très fin nécessitant jusqu'à 6 broyeurs différents pour un montant d'investissement estimé à de 3 M€ en 2003. De plus, ces broyeurs sont de capacités inégales, d'où des en-cours de production importants. Ils sont par ailleurs fragiles, dans la mesure où toute présence de corps étrangers très résistants est susceptible d'entraîner la rupture des outillages, d'où la nécessité de parfois sur-dimensionner les équipements.

Le jet d'eau Haute Pression (H.P. dans la suite de notre document), trouve depuis très récemment de nouvelles applications dans ce domaine du démantèlement et du broyage pour granulation de matériau. Ce procédé est à l'origine un procédé de découpe, développé au début des années 1950, dans les laboratoires Américains travaillant pour l'industrie aéronautique et militaire. L'objectif était de mettre à la disposition de l'industrie naissante des polymères, et surtout des composites, un outil susceptible de découper ces matériaux sans les altérer (déformations plastiques, échauffement, délaminage).

Cet objectif n'a jamais été totalement atteint, du point de vue du délaminage en particulier, mais il a permis de développer toute une gamme d'applications encore aujourd'hui en constante évolution.

La principale offre hors aéronautique date de la fin des années 1960 et a très longtemps concerné la découpe, en premier lieu à l'eau pure pour des matériaux à faibles caractéristiques mécaniques : polymères, caoutchouc, panneaux de particules, laine de verre, produits alimentaires surgelés ou frais.

Ces applications se sont développées sur la base de pompes de technologie spécifique, permettant d'atteindre 4000 bars, qui seront présentées dans le chapitre I, ainsi que sur la base de machines à commande numérique.

En 1984, les premières installations de découpe par jets abrasifs apparaissent et permettent de travailler métaux et minéraux sur de fortes épaisseurs.

Le jet d'eau abrasif est maintenant utilisé dans de nombreux secteurs industriels où il est particulièrement performant, pour la découpe de matériaux à hautes caractéristiques mécaniques, sur de fortes épaisseurs et pour des formes complexes. Nous pouvons citer par exemple la découpe d'alliages de titane sur 300 mm d'épaisseur, chez ALSTOM pour l'industrie nucléaire ou de 150 mm d'acier pour l'industrie militaire.

Au début des années 1990, de nouvelles applications, autres que la fabrication par découpe de pièces manufacturées, sont apparues :

-Le démantèlement par découpe d'installations pétrolières (plate-forme off-shore et têtes de puits de pétrole au Koweït en particulier). L'intérêt du procédé était de pouvoir découper des matériaux variés et épais sans générer d'étincelles ni d'accroissement notable de température, avantage évident dans ces ambiances explosives.

-Le nettoyage ou décapage de pièces techniques, rendu possible par l'apparition de systèmes permettant de traiter des surfaces importantes (buses à jet plat ou têtes multi-jets rotatives). Ce procédé, souvent présenté comme une alternative à des procédés chimiques, thermiques ou mécaniques a trouvé une large utilisation dans l'industrie aéronautique, maritime, automobile et plus généralement dans tout le domaine de la maintenance des biens d'équipement et de production mécanique.

Les têtes rotatives permettant de traiter des surfaces importantes, il devient possible de développer des applications d'usinage proches, dans le principe, de l'enlèvement de matière par fraisage (fraisage de poches par exemple). Quelques applications ont vu le jour en utilisant de l'eau chargée d'abrasif, dans le domaine nucléaire civil comme militaire. Nous verrons dans le prochain chapitre que la création d'un jet d'eau abrasif est complexe. Elle est contraignante, du point de vue de l'efficacité et de la fiabilité, ce qui a limité ses performances et sa diffusion dans ce domaine. L'absence de contraintes d'alimentation en abrasif a permis de développer des têtes multi-jets rotatives, utilisant de l'eau pure, très intéressantes : toute la largeur de la pièce est traitée en un seul passage.

Ces équipements pour un traitement de matériaux à hautes caractéristiques mécaniques sont limités par à un enlèvement de matière sur des matériaux homogènes non métalliques, comme ceux déjà usuellement traités en découpe, ou à des matériaux non homogènes et fragiles. Cela laisse malgré tout un champ d'application étendu, comme nous allons l'illustrer par quelques exemples, qui nous montrent les avantages induits par l'utilisation du jet d'eau.

-L'hydrodémolition d'ouvrages d'arts en béton (séparation béton et treillis métallique),

-Le démantèlement pour recyclage de :

- Volants automobiles (cerceau métallique et mousse polyuréthane),
- Tableaux de bords (peau PVC, mousse Polyuréthane, inserts métalliques),
- Moquettes (matrice polypropylène, fil PP ou laine, latex),
- Câbles électriques gainés (fil cuivre ou alu et gaine PVC ou polyéthylène),
- Skis (Mousse Pu, semelle PE sur structure métallique),
- Produits électroniques (circuits imprimés, composants )

-Le démantèlement pour recyclage de pneumatiques automobiles et plus généralement tous types de pièces surmoulées.

Pour les deux premiers exemples, les applications sont déjà largement industrialisées. Le cas des pneumatiques, en cours de développement, est le support applicatif de la présente étude.

Pour chacun de ces produits on retrouve les avantages suivants du procédé :

- Possibilité de séparer les matériaux d'un produit « composite », c'est-à-dire un produit constitué de au moins deux matériaux intimement mêlés, avec un bon niveau de qualité de tri (les aciéristes n'acceptent les carcasses métalliques de pneumatiques que si la quantité de gomme encore adhérente est inférieure à 5% en masse du total),
- Sélectivité du traitement avec non altération de la matrice, selon ses caractéristiques mécaniques, ce qui permet d'utiliser le procédé comme un outil de maintenance (cas du béton armé), d'extraction de pièces pour réemploi (cas des volants automobiles), valorisation la plus noble issue du recyclage. De plus, le tri des matériaux est facilité puisque le constituant non détruit, est plus facilement récupérable (cas de la carcasse métallique des pneus par exemple),

- Extraction de la matière désagrégée avec une granulométrie faible et maîtrisable,
- Adaptabilité de la cinématique de la tête jet d'eau de broyage au produit à traiter.

Par ailleurs, l'impossibilité, en l'absence de systèmes tournants fiables d'alimentation en abrasif, de développer des outils de type têtes rotatives, utilisant de l'eau chargée, si elle est pénalisante du point de vue de la diversité des matériaux à traiter, facilite la tâche au niveau des process avals : le jet d'eau pur simplifie en effet le problème de tri entre broyat obtenu et effluents issus de l'opération, puisque les abrasifs, dont nous avons étudié la complexité d'utilisation et de recyclage durant la thèse de Sophie Ferrendier [Fer.Cor.(2002)], ne sont plus présents.

Développer ce procédé en temps qu'outil de broyage impose de travailler en deux phases :

- Première phase d'usinage, qui nécessite de bien comprendre les phénomènes mis en jeu, de façon à pouvoir modéliser l'enlèvement de matière afin d'optimiser le procédé et les équipements associés.

- Deuxième phase de séparation (et de nettoyage) de la structure support (matrice) du produit usiné. Elle est très spécifique au cas traité et ne peut être abordée que d'un point de vue purement applicatif.

Les travaux de recherche sont assez peu nombreux sur ces domaines, pour plusieurs raisons :

- Applications encore récentes et donc abordées au coup par coup, sans que les problématiques de fond ne soient encore bien identifiées,

- Domaine scientifique lié aux interactions jet d'eau / matériau assez peu couvert par les laboratoires, les quelques entités s'y employant s'étant orientées vers l'étude du jet d'eau abrasif plutôt que celle de l'eau pure, dont la phénoménologie est très différente (abrasion en lieu et place du cisaillement de la matière).

On trouve ainsi beaucoup de travaux relatifs à la découpe par jet d'eau abrasif et ses mécanismes d'abrasion [Fin.(1958)],[Hash.(1987)],[Ferr.(2001)], mais très peu sur la découpe à l'eau pure et encore moins sur le traitement de surfaces ou l'usinage de matière.

Quelques chercheurs, tels Bowden et Field [Bow.Fie.(1974)] se sont attachés à étudier l'action de l'eau (en goutte ou en jet continu) sur une cible.



Nous avons travaillé, avec Mabrouki, sur l'impact d'un jet fluide à haute énergie cinétique sur une surface revêtue ou non, de façon à aborder les phénomènes mécaniques de séparation dépôt / substrat en décapage par jet d'eau [Mab. et Cor.(1998)].

D'autres ont étudié le phénomène de coupe en eau pure pour le modéliser, afin de prévoir les performances de coupe d'un jet (profondeur de saignée), en fonction des paramètres du procédé et des caractéristiques du matériau considéré. Wilkins et Graham ont œuvré en particulier sur ce sujet [Wil et Al. (1993)]. La transposition d'un modèle de découpe de matériau par jet unique, pour obtenir une saignée de quelques mm de profondeur sur moins de 1 mm de largeur, à un modèle représentatif de l'action répétée de nombreux jets sur la matière, jusqu'à enlever de la matière, sur plusieurs dizaines de mm de largeur et de profondeur, à notre connaissance, n'a pas été abordée jusqu'à présent.

L'objectif du projet de recherche présenté ici est donc, en partant sur la base de ces différents travaux, de modéliser l'action d'un outil jet d'eau multi-jets sur des matériaux dont les caractéristiques mécaniques sont compatibles avec les mécanismes d'interaction matériau/procédé en découpe, de façon à en tirer un modèle prédictif d'enlèvement de matière par granulation. Ce modèle permettra d'optimiser les configurations de buse (géométrie et cinématique associée) pour différentes applications.

Le développement parallèle d'une application industrielle de fabrication de poudre fine (poudrette) de caoutchouc, issue du démantèlement par jet d'eau de pneumatiques automobiles, nous poussera à prendre ce matériau comme support expérimental de compréhension des mécanismes d'interaction, avant de passer au modèle prédictif.

La deuxième phase, purement applicative, visera à étudier la séparation du caoutchouc, lors de l'usinage, des armatures métalliques qui constituent la superstructure (ou matrice) de notre produit.

Ainsi cette étude sur le :

**Développement d'un modèle d'enlèvement de matière par granulation utilisant le jet d'eau haute pression : application au démantèlement de pneumatiques**

S'articule autour de cinq chapitres :

Le chapitre 1, « *Jet d'eau H.P. : outil alternatif au Broyage mécanique* », présente le positionnement du procédé par rapport au procédé plus classique de broyage, les principes du jet d'eau haute pression, outils et applications au démantèlement par broyage.

Le chapitre 2, « *Enlèvement de matière par jet d'eau H.P.* » présente les principales études menées en jet d'eau. Il vise à comprendre et maîtriser toutes les phases de vie du procédé : création du jet, structure lors de son écoulement dans l'air, impact sur une cible et enlèvement de matière. Ces différentes étapes sont abordées sous un angle physique basé sur l'expérimentation mais également sous celui de la modélisation des phénomènes mis en jeu.

Le chapitre 3, « *approche expérimentale de l'usinage par jet d'eau H.P.* », décrit les moyens mis en œuvre et les expérimentations menées sur éprouvettes, afin d'appréhender le comportement d'un jet fluide sur le matériau caoutchouc, puis l'action répétée de jets rotatifs (multi exposition de la matière), de façon à identifier et comprendre les spécificités de chaque cas.

Le chapitre 4, « *modélisation de l'enlèvement de matière par buses multi-jets rotatives* » présentera les différentes approches explorées et retenues permettant la mise en place d'un modèle prédictif d'usinage et de production de poudrette de caoutchouc. Ce modèle a pour vocation de prédire la section de matière enlevée par un système multi-jet rotatif, et donc le débit de matière engendré. Il pourra également être utilisé comme moyen de recherche de la meilleure cinématique des têtes rotatives (répartition spatiale des buses par exemple),

Le chapitre 5, « *application au cas des pneumatiques* » permettra d'exposer la transcription de notre travail au cas industriel, avec deux étapes : usinage du caoutchouc, puis séparation de l'armature, ainsi que sa validation. Un prototype original d'équipement de démantèlement, avec une cinématique spécifique au produit traité, sera présenté à cette occasion.

Enfin, les « *conclusions et perspectives* » reprendront les principaux résultats, de façon à montrer les limites du travail et proposer de nouvelles perspectives.

# **CHAPITRE 1. LE JET D'EAU H.P. : OUTIL ALTERNATIF AU BROYAGE MECANIQUE**

## **I. INTRODUCTION : PROCEDES DE DEMANTELEMENT**

Le démantèlement de ressources constitué par les produits en fin de vie consiste en sa déconstruction industriellement organisée afin d'extraire des pièces ou des morceaux pour réutilisation ou recyclage de ses matières constituantes. Il s'est développé dès le début de l'ère industrielle par la mise en place d'une activité économique (souvent marginale dans tous les sens du terme) destinée à récupérer les métaux pour les refondre. Ces métiers ont commencé à s'industrialiser il y a quelques dizaines d'années, de par le fort développement en variété et en nombre des biens de consommation. Les consommateurs, poussés par l'approche publicitaire et marketing des industriels et par une évolution rapide des technologies (électroniques entre autres), source d'une obsolescence rapide des produits, ont pris l'habitude de renouveler de plus en plus rapidement leurs biens.

Le gisement de produits en fin de vie a ainsi cru et croit toujours de manière spectaculaire, pour atteindre des millions de tonnes par an. Rien qu'en France. On évalue par exemple les gisements à valoriser par an à environ (source Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie(ADEME) en 2003.) :

-20 Millions de tonnes pour les déchets du bâtiment,

-1,5 Millions de tonnes de véhicules hors d'usage ou de pièces en étant issu,

-2,5 millions de tonnes de produits électriques et électroniques,

Tous ne sont pas recyclés actuellement, puisque l'ADEME évalue à moins de 100000 les téléviseurs à tube cathodique traités annuellement alors qu'il en est mis sur le marché Français plus de 2 Millions, ce qui, même en considérant le multi-équipement et le stockage réalisés par les familles, laisse à penser que de nombreux équipements se retrouvent dans des décharges.

Le monde du recyclage a intégré, et développé, de nouvelles technologies permettant, pour ces produits en fin de vie mais également pour les chutes et rebuts de production, d'extraire, trier puis revaloriser les métaux. L'acier présente, par exemple, un taux de matière issue du recyclage avoisinant les 50 % de la production totale annuelle dans le monde. Tous les métaux n'atteignent pas cette performance et si le verre présente des résultats acceptables, grâce à la filière de collecte des emballages alimentaires, il n'en n'est pas de même pour les autres types de verre tels que ceux issus des vitrages ou des tubes cathodiques par exemple, sans parler des polymères et des composites, actuellement pratiquement intégralement mis en décharge.

Actuellement, le démantèlement d'un produit en fin de vie s'organise en une succession d'opérations de démontage, découpage ou cisailage, broyage et tri de façon à récupérer polluants, pièces réutilisables et matériaux à valoriser. L'ordre et le nombre de ces phases sont en général liés au type de produit, à ses dimensions globales et à son contexte socio- économique spécifique. A titre d'exemple, le démantèlement d'automobiles est réalisé par des industriels du broyage, qui broient directement le produit complet pour en extraire les matériaux métalliques, mais également par les «casses » qui opèrent par démontage pour en extraire des pièces à réutiliser.

Si nous laissons de côté l'approche démontage poussé, hors de notre problématique, nous pouvons en définitive représenter les différentes options de démantèlement et recyclage, en fonction des typologies de produits, de la façon suivante (fig. 1.1.).

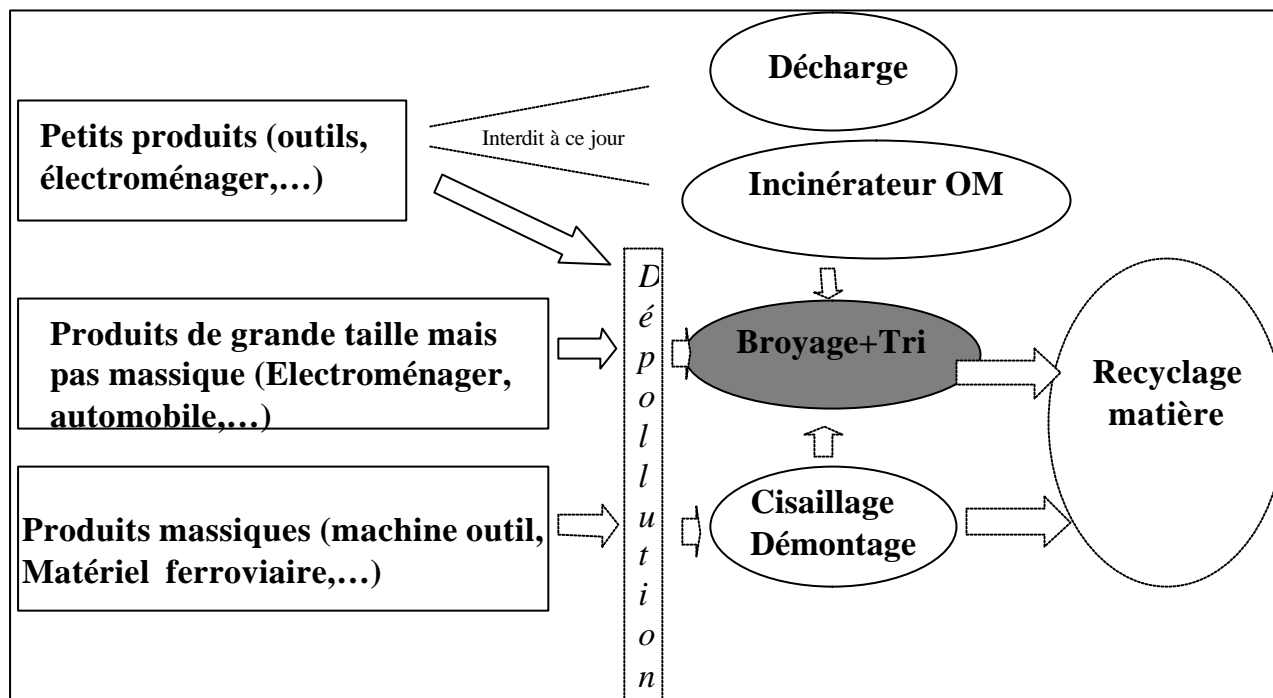


Fig.1.1.: présentation des différents scénarii de démantèlement et recyclage

## II. LES PROCÉDES DE DEMANTELEMENT ET RECYCLAGE

### II.1. Le démantèlement par démontage puis broyage de mono-matériaux

Les matériaux métalliques, cuivre, zinc, aluminium ou acier ont été les premiers collectés pour recyclage. La technique mise en œuvre est relativement simple puisque il est facile d'obtenir, par deuxième fusion, un nouveau matériau quasiment vierge, à quelques éléments d'apport près. De plus, l'énergie mise en œuvre, et les équipements nécessaires pour ce faire sont beaucoup plus réduits que pour produire un matériau de première fusion, ce qui est tout bénéfique pour les aspects économiques comme pour la plupart des impacts environnementaux associés à ces procédés :

La consommation d'énergie nécessaire à la fusion et à l'affinage d'un kg d'alliage d'aluminium s'élève par exemple à 8,36 MJ contre 54 MJ pour la seule opération d'électrolyse de l'aluminium de première fusion.

Une des principales contraintes est, outre la qualité du gisement assurée par un tri manuel lors de la collecte, de mettre en fusion des pièces de formes et dimensions différentes. Les cubilots ou fours électriques ont des ouvertures de chargement réduites, ce qui implique souvent de réaliser un broyage mécanique afin d'introduire dans les fours des morceaux calibrés.

### II.1.1. Principe et moyens utilisés

La forme la plus simple du recyclage consiste, après un démontage des pièces, à broyer ces dernières par familles de matériaux avant de les fondre et de les régénérer par addition d'éléments d'apport en adéquation avec les caractéristiques recherchées. Ceci permet d'obtenir un matériau de nuance normalisée de deuxième fusion que nous nommerons nouvelle « matière première secondaire ». On parlera alors d'applications de « pré-broyage ». Pour un produit hors d'usage, le principe du recyclage peut être représenté par la figure suivante (Fig.1.2.):

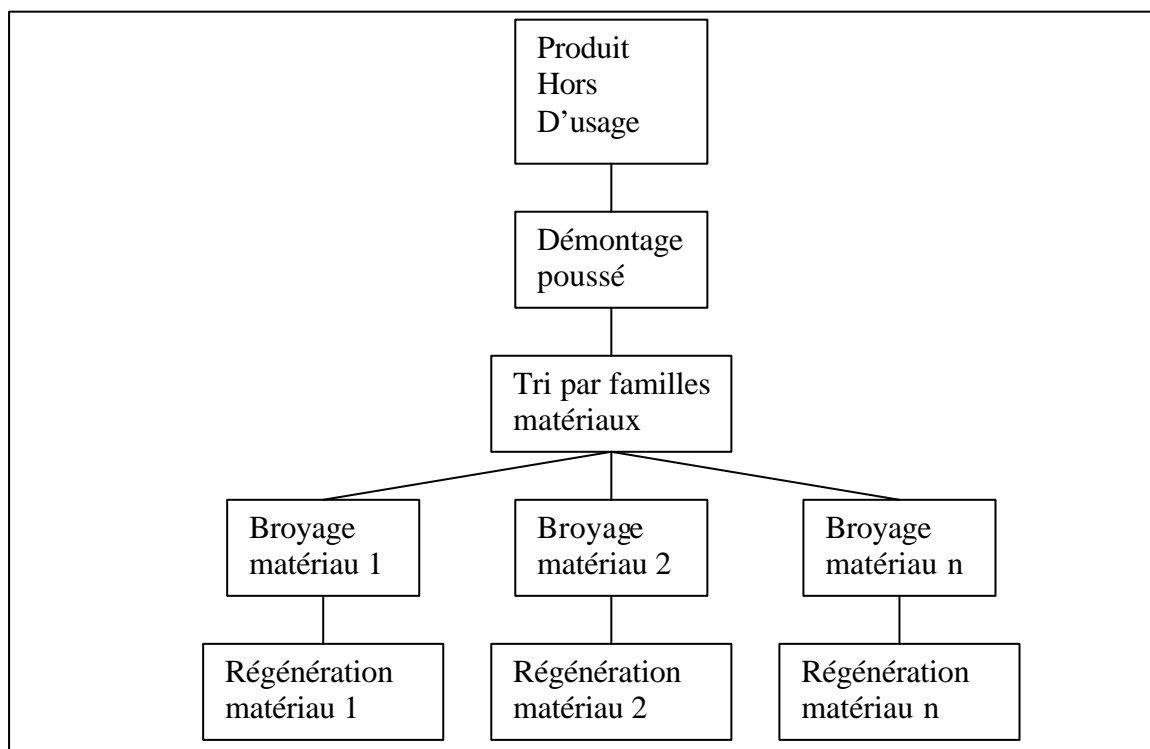


Fig. 1.2. : Principe du recyclage par pré-broyage

Les moyens utilisés sont, pour la partie broyage qui nous intéresse plus particulièrement ici, des unités dont les technologies varient selon les produits traités :

-broyeurs à marteaux ou à fléaux pour les matériaux à hautes caractéristiques mécaniques comme les alliages métalliques (Fig. 1 .3.),

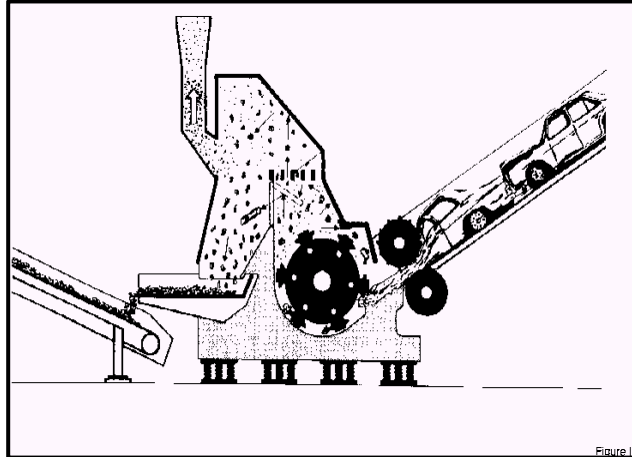


Fig.1.3.: broyeur à marteaux (document publicitaire société Lindemann)

Après une éventuelle mise à épaisseur constante pour les plus gros éléments, la pièce à traiter est exposée a une roue tournante sur laquelle sont accrochées des masses métalliques, qui vont, comme des fléaux, marteler la matière jusqu'à dépasser localement sa résistance maximale à la rupture. Ceci provoque par arrachement et écrasement l'apparition d'éléments libres de petites dimensions (entre 50 à 150 mm de coté selon l'équipement).

-Broyeurs à couteaux pour les matériaux plus tendres (polymères, composites, tôles de faibles épaisseur, ...) comme illustré sur la Fig.1.4.

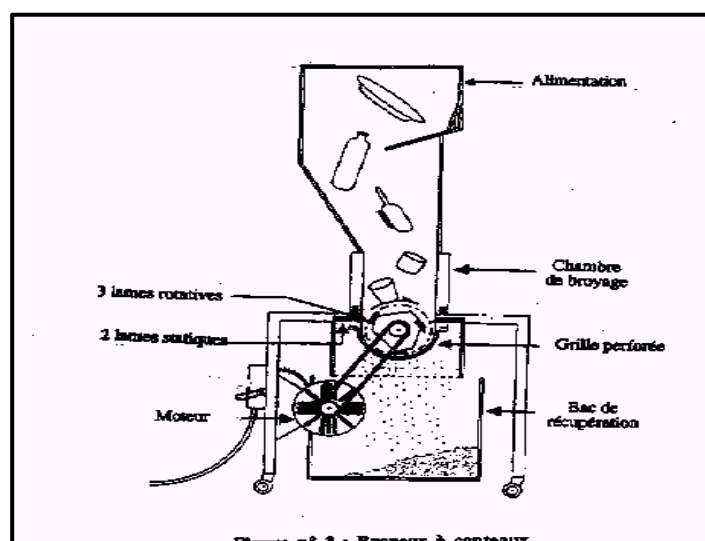


Fig.1.4. : broyeur à couteaux (document publicitaire société Lindemann)

La technologie employée dans ce cas consiste à utiliser un système de lames fixes et de lames montées sur un axe rotatif. Ces lames hachent la matière jusqu'à ce qu'elle soit suffisamment fine, au bout d'un certain nombre de cycles, pour passer au travers d'une grille perforée faisant office de crible.

### **II.1.2. Performances et limites :**

Les performances de ces systèmes ont évolué de façon spectaculaire lors des dernières décennies, profitant de la mécanisation de plus en plus poussée des procédés industriels, tant du point de vue motorisation que automatisation :

- Les broyeurs à marteaux, les plus robustes, permettent actuellement de traiter jusqu'à 80 tonnes par heure, en mettant en œuvre des puissances de 2500 kW.
- Les broyeurs à couteaux sont en général des équipements de plus faibles dimensions, permettant de traiter jusqu'à 8 tonnes par heure en mettant en jeu des puissances de l'ordre de 350 kW.

Les premiers cités sont quasiment indestructibles, en dehors de l'usure normale des composants mais les seconds sont des ensembles beaucoup plus fragiles, acceptant mal des éléments pour lesquels ils n'ont pas été dimensionnés. Il n'est alors pas rare de se trouver confronté à des ruptures de lames lorsque celles-ci rencontrent des éléments à broyer indésirables (inserts métalliques dans les plastiques par exemple), issus d'un mauvais tri en amont. Ce sont malgré tout des équipements performants, bien adaptés à ce genre d'activité.

Le traitement par matériau ou familles de matériaux d'un produit issu du démontage se heurte à deux obstacles majeurs :

- Des coûts élevés de démontage, liés aux charges salariales et sociales ainsi qu'à une complexité importante des produits modernes,
- L'imbrication, de plus en plus étroite, de matériaux différents dans une même pièce, rendant difficile, voir impossible, leur séparation.

De façon à résoudre ces deux problèmes, l'industrie du recyclage a développé et s'est dotée de systèmes de tri permettant d'isoler les matériaux après broyage. On parlera alors d'applications de broyage complet ou de « post-broyage ».



## II.2. Le démantèlement par broyage complet puis tri

### II.2.1. Principe et moyens utilisés

Pour traiter ces produits hors d'usage de plus en plus complexes, de par l'hétérogénéité de leur composition et de leur structure, le principe de recyclage retenu prend alors la forme suivante :

Le démontage est supprimé, à l'exception d'éventuelles opérations de dépollution, au profit d'un broyage complet du produit.

Les broyats ainsi obtenus sont alors triés par différents procédés mis en cascade de façon à récupérer un par un :

- les matériaux ferreux magnétiques,
- Les matériaux ferreux non magnétiques,
- les alliages cuivreux,
- les alliages légers,
- certains plastiques ...

Les autres matériaux, appelés résidus de broyage (RB) sont ensuite incinérés ou mis en décharge, selon leur constitution (pouvoir calorifique, risques de pollution, ...)

Nous représenterons ce mode de traitement par la figure suivante (Fig.1.5.) :

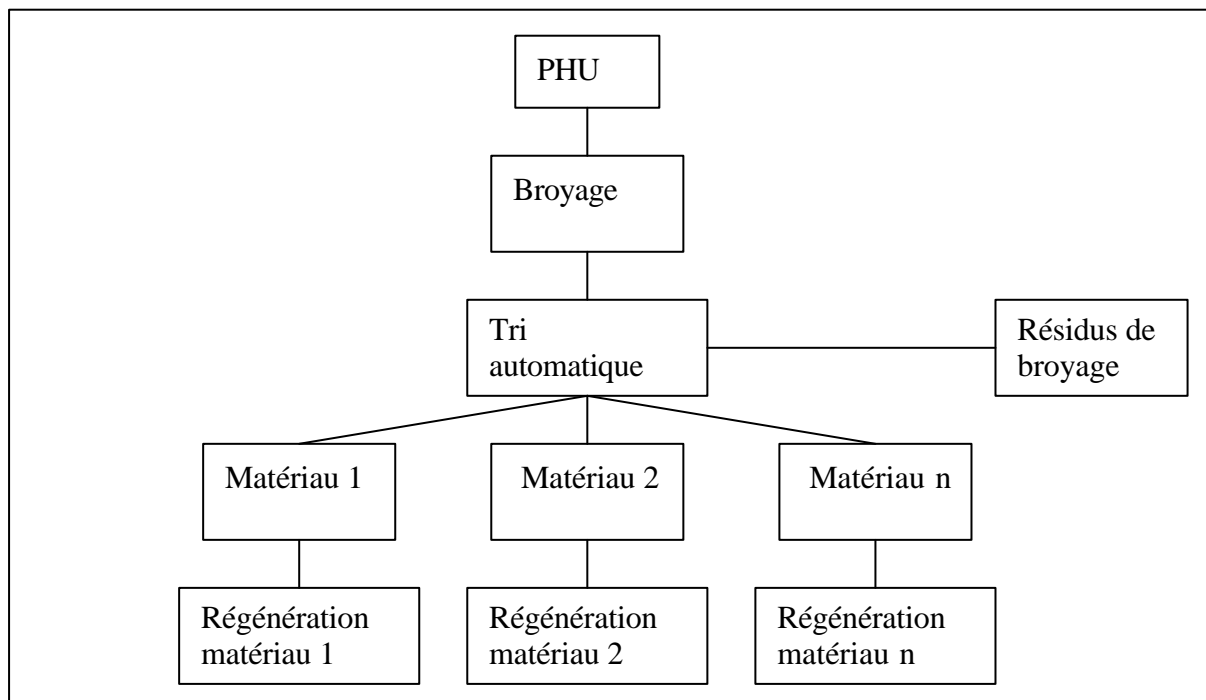


Fig. 1.5. : Principe du recyclage par post-broyage

Les systèmes de broyage restent dans ce cadre identiques, dans le principe, au cas précédent. Ceci entraîne l'utilisation plus fréquente de broyeurs à marteaux en entrée de ligne, mais ce sont les moyens de tri qui font l'objet de tous les développements et de toutes les attentions.

L'objectif est en effet de séparer, avec la plus grande finesse possible, les matériaux issus du broyage, de façon à obtenir :

-Des fractions extraites de la plus grande pureté possible (95 % voire 99 % pour certains plastiques), pour donner naissance après régénération à des matières premières secondaires de qualité. Il est possible par exemple de rechercher le taux de pollution des alliages ferreux par le cuivre le plus faible possible, ou la non présence dans le polypropylène à retraiter d'autres polymères tels que l'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) par exemple.

-Des résidus de broyage les plus réduits possibles en quantités et variétés, de façon à satisfaire, en particulier, aux objectifs économiques et législatifs relatifs aux taux de valorisation des produits en fin de vie (95% de taux de recyclabilité pour les véhicules automobiles dès 2015 et 50 à 80% pour les différentes familles de produits électriques et électroniques)

De nombreuses technologies existent. Les plus courantes sont :

- le tri magnétique,
- le tri par courant de Foucauld,
- le tri densimétrique ou par flottation,
- le tri inductif ou triboélectrique

Le recyclage d'un véhicule automobile, pour l'extraction des fractions métalliques, peut être schématisé de la façon représentée dans la figure suivante (Fig.1.6.).

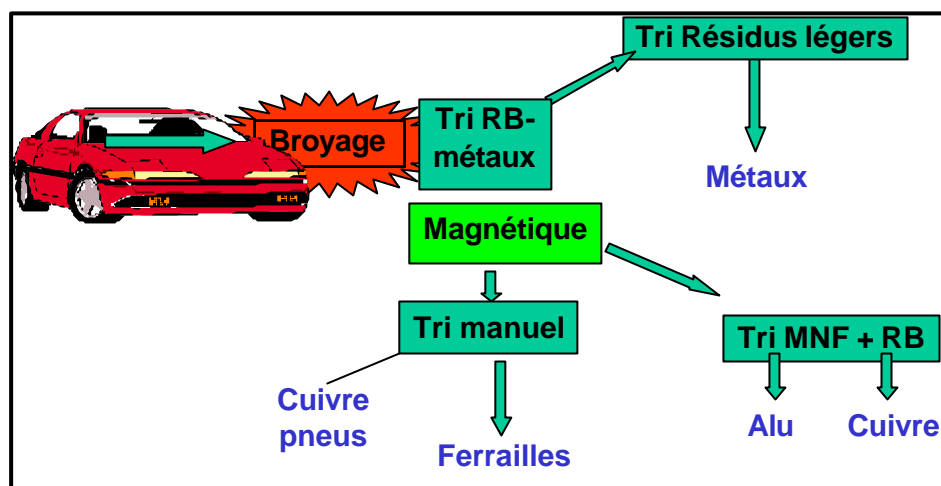


Fig. 1.6. : Extraction des métaux d'un véhicule automobile

A l'heure actuelle, le plus gros défi concerne le tri des polymères et des composites [Piet.(1994)], [Ehrig(1992)], de plus en plus présents dans les produits actuels, et jusqu'à un passé récent mis en décharge ou au mieux incinérés. Leurs caractéristiques physiques assez proche, en particulier leurs spectres densimétriques se recouvrant en fonction des charges qui y sont incluses, posent de véritables problèmes de séparation. De plus leur quasi incompatibilité deux à deux impose une finesse de tri difficile à atteindre.

Quelles que soient les performances atteintes par ces procédés, les matériaux doivent, pour être triés efficacement, être libérés les uns des autres, ce qui ne peut être obtenu que par un broyage suffisamment fin du produit. Dans la pratique, une dimension de broyat de l'ordre de 60 mm est retenue, pour des raisons le plus souvent économiques, ce qui n'est pas forcément satisfaisant techniquement pour tous les produits, comme le montre l'exemple présenté page suivante (Photo.1.1.).

Celui-ci présente, en sorti de broyeur automobile, un morceau de culasse en alliage d'aluminium dans lequel est resté emprisonnée une soupape à base ferreuse et son guide en alliage cuivreux. Ce mélange est catastrophique pour le recyclage, quel que soit l'option prise par le système automatique de tri : le broyage n'est dans ce cas pas assez fin pour libérer les éléments les uns des autres.

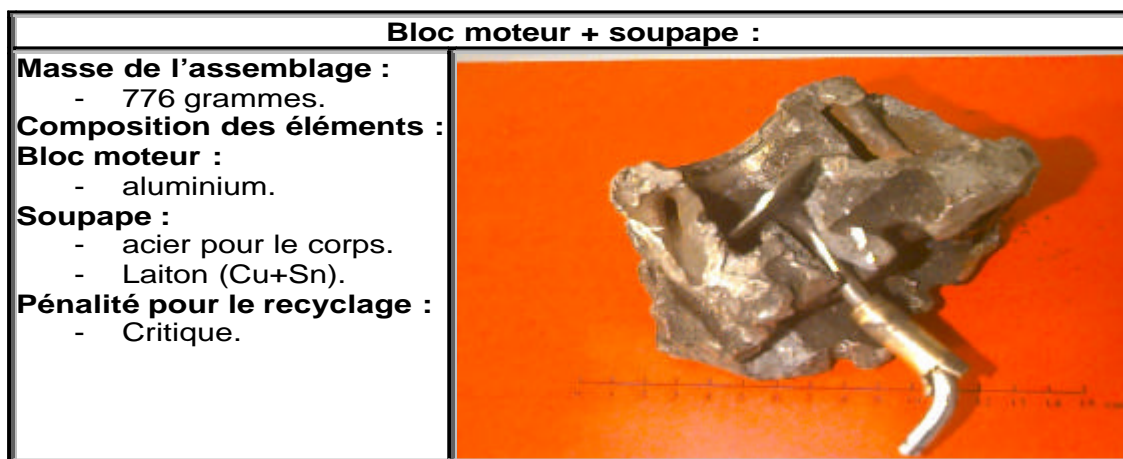


Photo.1.1.: Exemple de broyage trop grossier pour libérer les matériaux (document ENSAM)

## II.2.2. Travaux menés sur le broyage mécanique

Nous venons de voir que le principal problème du broyage mécanique, est la difficulté à obtenir, pour un coût acceptable, un broyage assez fin, permettant d'obtenir un broyat suffisamment fin pour que les différents matériaux constitutifs soient libérés les uns des autres.

De nombreux travaux sont menés, en France comme à l'étranger, pour les différents domaines industriels ayant à trier des matières :

Dans l'approche développée par l'I.R.S.I.D. pour la métallurgie, la fonction du broyage des ferrailles est envisagée comme procédé de préparation pour le recyclage. Etablir les paramètres optimaux du procédé permettant de rendre les ferrailles les plus propices au recyclage est ainsi l'objectif principal.

Les travaux menés, [Abo.(1999)], ont consisté à étudier expérimentalement et théoriquement :

-Pour l'industrie agro-alimentaire (boites, boisson) : la distribution granulométrique et les caractéristiques de forme du broyat, en fonction du temps de broyage, de certains paramètres du broyeur (distance marteau / enclume, vitesse de rotation, taux de charge) et de la nature et forme des matières entrantes,

-Pour l'industrie automobile : la distribution granulométrique après broyage des matériaux contenus dans un type de VHU (Véhicule Hors d'Usage).

Les études établissent des courbes de distribution granulométrique en fonction du temps de broyage. Des modélisations du broyage sont aussi disponibles et des solutions analytiques, telles que celles proposées par [Ber.(1996)] permettent d'exprimer la distribution de taille des particules en fonction du temps de broyage.

-Pour l'industrie électronique, les travaux menés au sein de l'Université Technologique de Lulea [Zhang(1997)] [Zhang(1999)], consistent à caractériser les flux de particules issues du broyage de produits électroniques afin de mieux les valoriser. La fonction du broyage envisagée est, dans cette approche, principalement la libération des matériaux de valeur économique importantes.

Les expériences menées permettent de caractériser la taille, le degré de libération et la forme des particules issues du broyage de produits électroniques.

Des travaux de broyage sont menés sur des cartes électroniques de type Print Card (PC) ou Print Card Board (PCB), où les distributions granulométriques des fractions sortantes sont étudiées. Ces dernières sont présentées dans la figure suivante (Fig.1.7.) :

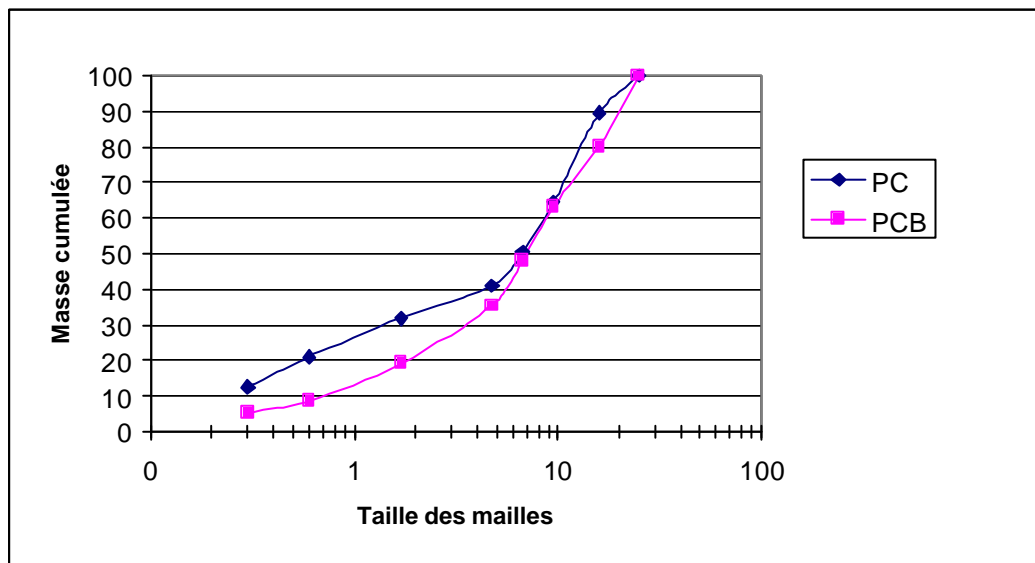


Fig. 1.7. : Distribution granulométrique de broyats d'ordinateur [Zhang(1997)].

Les degrés de libération des matériaux tels que les métaux ferreux, l'aluminium et le cuivre sont ensuite caractérisés, en fonction des différentes tailles de particules. Le degré de libération représente la part de particules entièrement homogènes, c'est-à-dire non liées à d'autres matériaux. Il est exprimé par la formule suivante [Zhang(1999)]:

$$LD = \sum_{i=1}^n \frac{N_{fi}}{N_{fi} + N_{li}} / n$$

avec :

$LD$ , le degré de libération du matériau envisagé,

$n$ , le nombre de d'échantillons analysés,

$N_{fi}$ , la part massique des particules libres de matériau envisagé,

$N_{li}$ , la part massique des particules non libres de matériau envisagé.

Les degrés de libération des particules de matériaux ferreux et cuivreux issus du broyage d'ordinateurs sont représentés dans la figure suivante (Fig.1.8.).

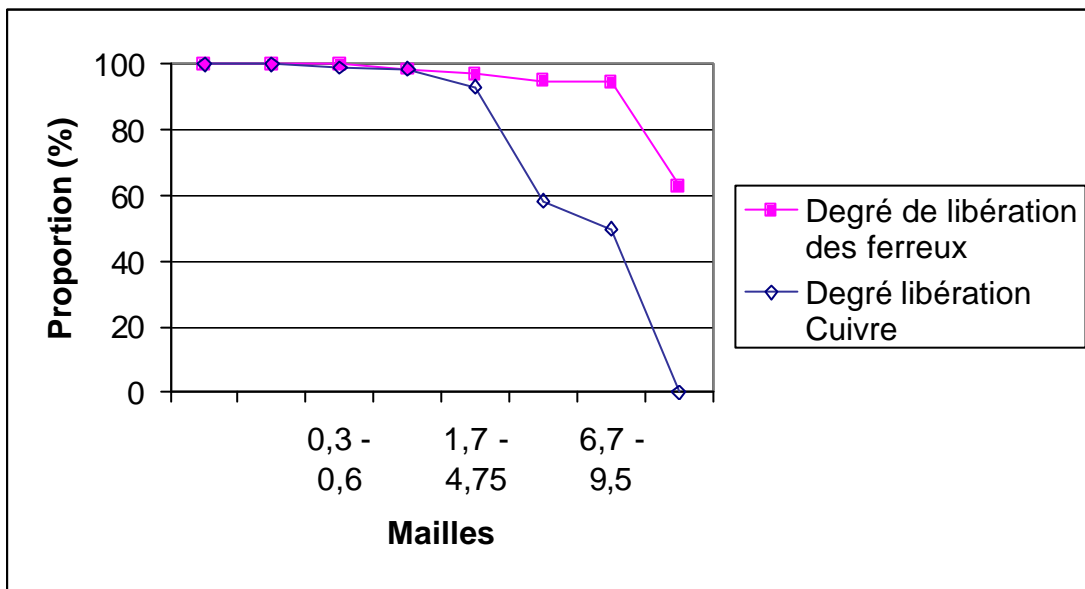


Fig.1.8. : Degré de libération des matériaux ferreux (■) et cuivreux (◆) dans des broyats d'ordinateurs [Zhang(1999)].

Des travaux concernant le broyage de composants électroniques, tels que des cartes électroniques (de type Printed Wiring Board, PWB) sont également menés au sein du National Institute for Resources and Environment au Japon. L'objectif du broyage est la libération des particules de cuivre. Le broyage de tels composants est comparé au broyage de plaques de cuivre.

Les cartes sont broyées par broyeur à marteaux.

Les travaux s'attachent à caractériser les tailles et les formes des particules issues du broyage.

La distribution granulométrique des particules issues du broyage de PWB, en fonction de différentes vitesses de marteaux, est comparée à celles issues du broyage de plaques de cuivre.

Pour ce qui est des matériaux plastiques, des travaux récents, conduits au sein de l'Université de Lulea (Suède), concernent le broyage par broyeur à couteaux. Ce broyage est destiné à la préparation des plastiques avant le tri (par flottation) [Shen(2001)]. Les distributions de granulométrie et les formes de particules sont ainsi étudiées.

Au regard de leur distribution granulométrique, les sept plastiques étudiés peuvent être classés en trois groupes :

- Le groupe 1 regroupe l'ABS, le Polycarbonate (PC) et le Polyéthylène téréphtalate (PET) : la distribution granulométrique est assez étroite et celle-ci compte peu de particules de taille inférieure à 1 mm ;
- Le groupe 2 regroupe le Polychlorure de Vinyle (PVC) et le Polystyrène (PS) et présente une distribution granulométrique et une part faible de particules de taille inférieure à 1 mm;
- Le groupe 3 compte le Polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et le Polyoxyméthylène (POM) : la distribution granulométrique est assez large et les particules de taille inférieure à 1 mm sont plus nombreuses.

L'étude de la forme des particules montre que les formes irrégulières sont plus nombreuses dans les particules de petite taille. Par ailleurs, les particules de PMMA semblent présenter une plus grande homogénéité dans leur forme.

La distribution de forme des particules varie largement à la fois au sein d'une même fraction et entre fractions. La distribution de forme des particules à la sortie du broyage interfère avec les performances des procédés aval de séparation, ce qui pénalise l'ensemble de la chaîne de recyclage. Il n'est donc pas possible de dissocier l'étude du broyage et celle du tri.

Ceci est illustré ci-après par le cas d'étude suivant concernant le tri par flottation

La flottation de particules est une technique largement utilisée dans le traitement des minerais naturels, et qui représente une technique émergente prometteuse pour le tri des plastiques en fin de vie en vue de leur recyclage [Shen.(1998)].

La flottation des plastiques permet de trier des plastiques de même densité. Ces plastiques, aux tensions de surface différentes les uns des autres, sont immergés dans un bain utilisant des surfactants, brassé en continu par de l'air comprimé. Ils vont réagir différemment dans ce bain en attirant plus ou moins les bulles d'air sur leur surface. Les plus réactives vont remonter à la surface, portées par ces bulles, ce qui va permettre de les collecter. Des recherches menées à l'Université de Lulea, portant sur la séparation de particules de plastiques par flottation sélective, identifient les paramètres permettant une séparation optimale [Shen.( 2001)].

Ainsi, il apparaît que la flottabilité de particules diminue lorsque la taille des particules augmente, comme l'illustre la figure suivante.

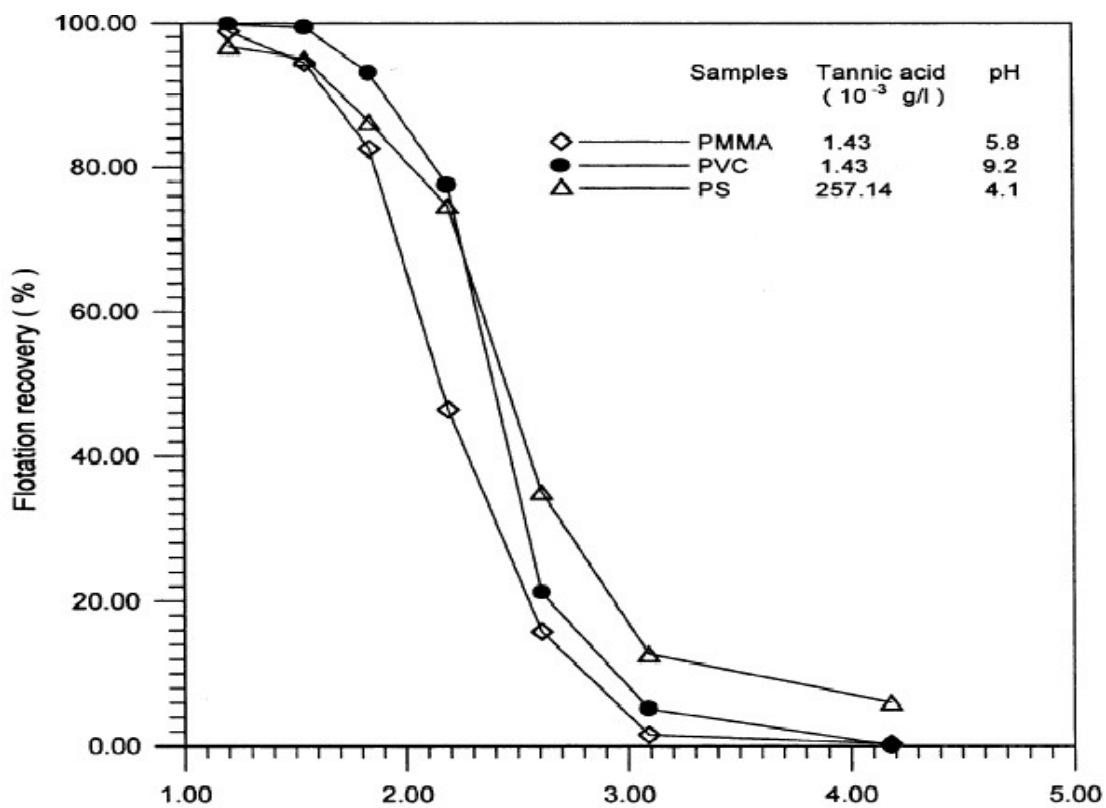


Fig. 1.9. : Influence de la taille des particules sur le taux de récupération de différents plastiques (SHEN 2001).

L'influence d'un environnement chimique variable est aussi étudiée sur la flottabilité des plastiques. Il apparaît que la flottabilité des particules s'effondre en présence d'acide tannique. Cet effondrement s'avère être beaucoup plus lent pour les particules de petites tailles. D'autres tests montrent que la taille des particules influence grandement le taux de flottation, c'est-à-dire la quantité de particules flottante en fonction du temps.



La forme des particules a aussi de l'importance.

### **II.3. Conclusion**

Il apparaît dans cette première revue bibliographique que le broyage mécanique présenté dans cette première partie de chapitre présente les contraintes suivantes :

-La taille du broyat obtenu est fondamentale pour la libération des différents matériaux constitutifs,

-La taille des particules broyées et leur géométrie ont une influence directe sur le procédé de tri immédiatement installé en aval.

Dans ce cadre, l'idée de développer un procédé permettant de faire un broyage sélectif du produit, en facilitant ainsi le tri de la matière extraite, semble intéressante pour certains produits, puisqu'elle permet de s'affranchir en grande partie de ces problèmes. Le jet d'eau haute pression, dont la technologie et les applications vont être présentées dans le paragraphe suivant, semble à cet égard, assez prometteuse.

## **III. LE DEMANTELEMENT PAR JET D'EAU HAUTE PRESSION**

### **III.1. Principe général du jet d'eau H.P.**

Le jet d'eau haute pression exploite la transformation de l'énergie potentielle de l'eau (pression) en énergie cinétique, par laminage au travers d'un trou calibré (buse), avant projection sur la pièce à traiter.

La variété des applications : découpe par jet d'eau pure, par jet chargé d'abrasif, décapage et hydrodémolition ont permis de créer une gamme importante et variée de générateurs H.P. Leurs caractéristiques de débit et pression sont, en effet, adaptées à l'application visée. Deux types de technologie sont disponibles dans ce domaine :

-Pompes à pistons : elle permettent des débits d'eau élevés, de plusieurs dizaines de litres par minute, mais sont limitées à 2800 bars. Ce sont des pompes utilisant le principe d'un système bielle-manivelle. Le ou les pistons sont ainsi animés d'un mouvement de translation alternatif dans un cylindre, le premier demi cycle permettant le remplissage du cylindre et le second la compression de l'eau, cette alternance étant assurée par le biais d'un jeu de clapets anti-retour.

-Pompes à intensifieurs : elles seules permettent d'atteindre 4000 bars mais elles ne délivrent que 2 à 10 litres par minute.

C'est ce dernier type d'équipement qui est utilisé en découpe par jet d'eau, que ce soit en eau pure ou en eau chargée.

L'eau, à la pression du réseau, est envoyée dans un amplificateur de pression constitué d'un piston alternatif à deux sections dont le rapport des surfaces est de l'ordre de 20. Une centrale oléo-hydraulique agit sur la plus grande section du piston qui, en se déplaçant, comprime l'eau au niveau de la plus petite section. Ces pistons plongeurs permettent de comprimer l'eau à une pression supérieure à 300 MPa à chaque alternance. Ce principe est illustré par le schéma suivant (Fig. 1.10).

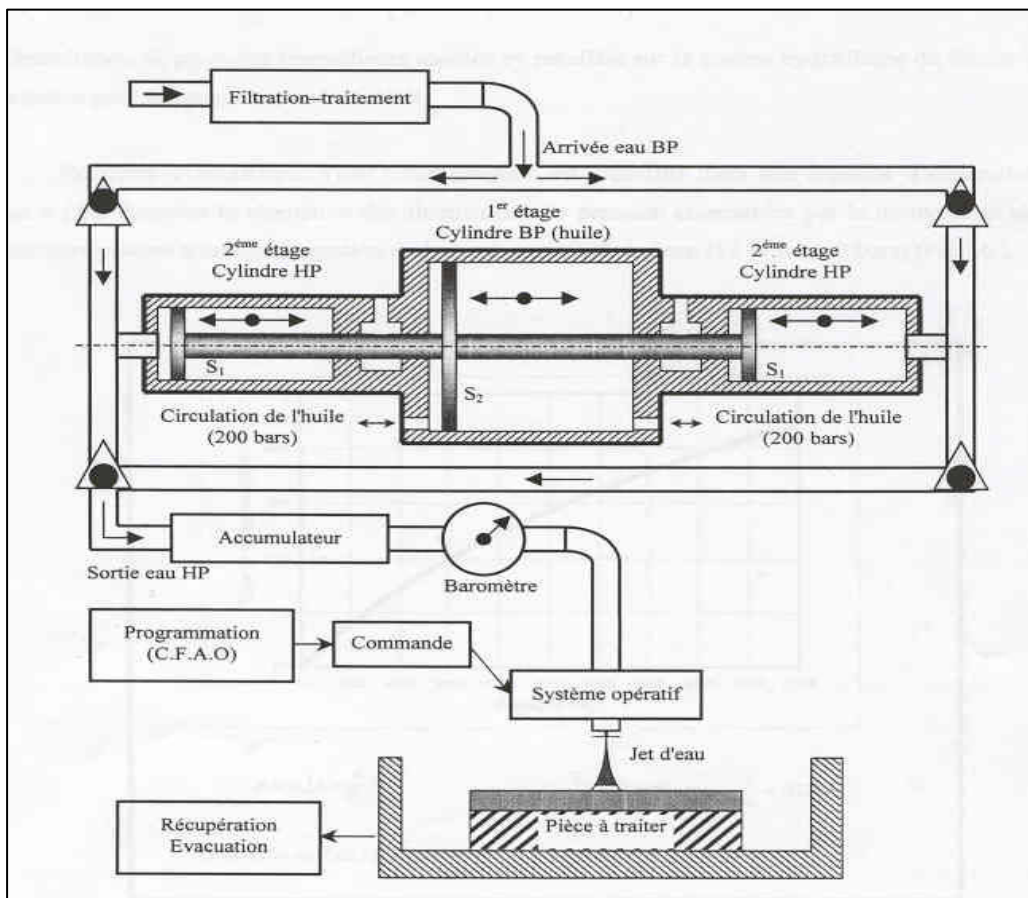


Fig.1.10. : Principe de fonctionnement d'une pompe à intensifieur (document ENSAM)

L'eau pressurisée est recueillie dans une capacité permettant de réduire les fluctuations de pression engendrées par le fonctionnement alternatif du système, puis elle est propulsée à une vitesse supersonique, au travers d'une buse en saphir, monocristal d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ , percée d'un trou calibré de 0,08 à 0,3 mm de diamètre.

Les buses les plus couramment utilisées, sont présentées dans la figure 1.11. Elles comportent au moins un convergent prolongé par une partie cylindrique rectiligne.

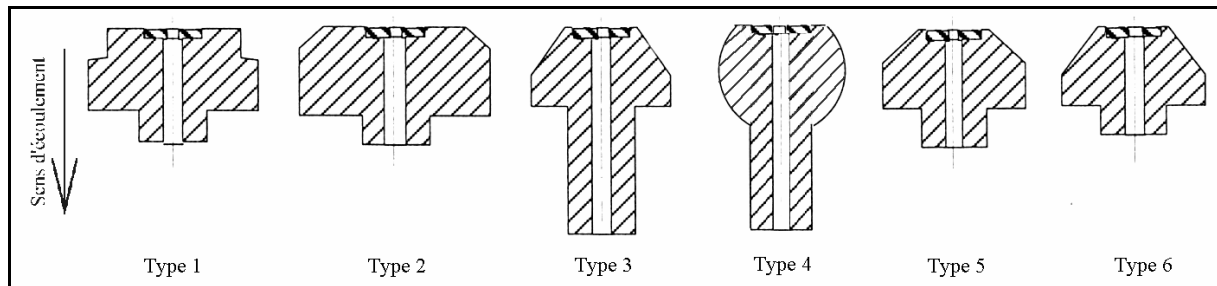


Fig. 1.11. : Buses de découpe

La vitesse,  $V_{e0}$ , d'éjection de l'eau peut être évaluée à partir de l'équation simplifiée de Bernoulli appliquée entre la pompe et la buse. L'application d'un coefficient correctif  $c_v$ , permet de prendre en compte la non uniformité du profil des vitesses en sortie de buse. Il varie entre 0,85 et 0,95 [Mom.Kov.(1998)]

$$V_{e0} = c_v \sqrt{\frac{2 p_{e0}}{\rho_e}} \quad (1.1)$$

Avec :

$p_{e0}$  : pression de l'eau en Pascal

$\rho_e$  : masse volumique de l'eau en  $\text{kg} / \text{m}^3$

En utilisant de l'eau et avec une pression de l'ordre de 4000 bars, on obtient ainsi une vitesse d'éjection proche de 900 m / s, et dans tous les cas très largement supersonique.

L'énergie, amenée localement sur la pièce, permet de découper des matériaux tendres tels que le cuir, des polymères, des matériaux d'isolation, des produits alimentaires, ...

La mise en place d'une chambre de mélange et d'un canon de focalisation en sortie de buse, pour l'obtention du mélange triphasique (1 % d'abrasif, 4 % d'eau et 95 % d'air) [Taz. (1996)], permet d'améliorer l'efficacité du jet pour la découpe de matériaux durs.

En sortie de buse, le jet, dont la vitesse avoisine les 800 m/s, pénètre alors dans la chambre de mélange reliée à un réservoir d'abrasif. Le frottement jet/air dans la chambre crée une zone de dépression autour du jet (effet Venturi) qui entraîne l'aspiration de l'abrasif.

L'énergie potentielle du jet pressurisé est transformée en énergie cinétique lors du passage dans la buse, puis transmise aux particules abrasives lors de l'accélération et de la focalisation du mélange eau/air/abrasif dans le canon (diamètre compris en général entre 0,8 et 1,2 mm).

Le principe de cet équipement est représenté dans la figure 1.12. suivante.

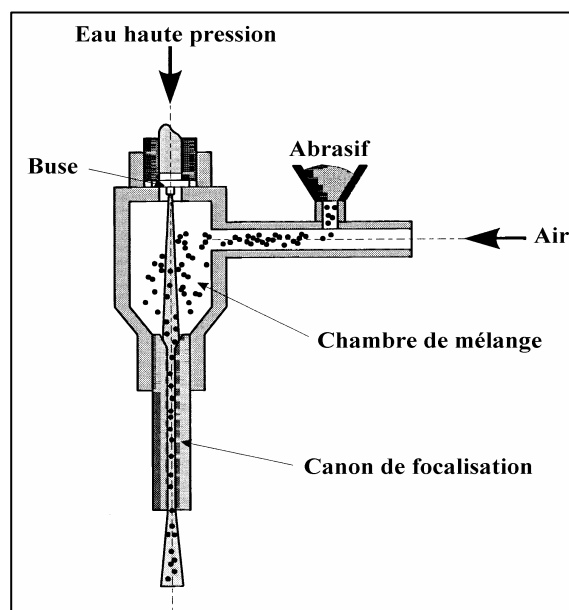


Fig.1.12. : principe d'une tête de mélange pour jet d'eau abrasif (source ENSAM)

Cette technique est peu élégante du point de vue rendement, puisque les vitesses d'éjection des particules sont de l'ordre de 400 m/s [Taz. Et al (1994)], à comparer à la vitesse de l'eau de 900 m/s à l'entrée de la chambre de mélange. C'est la seule réellement industrialisée à l'heure actuelle, si on laisse de côté la technologie dite « a injection directe » qui permet de comprimer directement le mélange eau + abrasif [Mill.(1994)], avant de l'éjecter au travers d'une buse de grosse section. Ce système est cantonné pour l'instant à de rares applications ou recherches, dans le domaine de l'exploitation pétrolière sous-marine, pour des raisons de fiabilité interdisant de travailler à haute pression.

L'impact du jet, mélange d'eau et d'abrasif, sur le matériau à usiner, cause des dommages qui entraînent un enlèvement de matière.

Le domaine de prédilection du jet chargé d'abrasif devient alors la découpe de matériaux à hautes caractéristiques, sur de fortes épaisseurs, et avec des formes complexes, tout en conservant une qualité des surfaces assez bonne. La découpe des alliages métalliques, du verre ou des minéraux, sur des épaisseurs supérieures à 100 mm est souvent réalisée industriellement, avec des avantages connexes tels que l'absence de Zone Affectée Thermiquement, due à l'absence de point chaud lors de l'opération.

## **III.2. De la découpe au démantèlement**

### **III.2.1 la découpe appliquée au démantèlement**

L'outil jet d'eau haute pression est souvent considéré, en découpe, comme un outil propre et peu impactant sur l'environnement. L'image de ce fluide dans l'esprit humain, les faibles débits d'eau utilisés, sa propreté naturelle dans les applications agroalimentaires (effet décontaminant de la haute pression et renouvellement constant de l'eau) et ses applications dans le domaine médical, bien que balbutiantes, ont conforté cette image. Dans la réalité, les fortes consommations énergétiques et un retraitement souvent négligé des effluents, pondèrent quelque peu ce bilan, même s'il n'existe pas, à notre connaissance, d'analyse du cycle de vie de ce procédé, comparé à ses concurrents.

Une des premières applications du point de vue environnemental, a été d'utiliser ce procédé pour démanteler par découpe des produits en fin de vie. Son intérêt relevait de sa capacité à découper, dans des ambiances hostiles, des produits de fortes épaisseurs et de haute dureté. Le démantèlement de plate-forme de forage off-shore, par découpe d'éléments immergés, depuis les années 1980 [Alb.Hash.Lil.(1994)], ou de têtes de puits de pétrole sur des sites présentant de forts risques d'incendie ou d'explosion, lors de la guerre du golfe en 1991, en sont des exemples caractéristiques (Voir illustration Photo 1.2. ci-après). Le procédé, par ses performances en découpe, a ainsi permis d'éviter le dynamitage et le coulage des plate-formes, ce qui était la pratique courante. De même, les têtes de puits ont ainsi pu être découpées sans risque humain, ni rejet dans l'atmosphère issus de possibles inflammations.



Photo.1.2. : découpe d'éléments de structure de puits de pétrole (document société Rivard)

L'industrie nucléaire, est également une forte utilisatrice du jet d'eau Haute pression, pour des applications de démantèlement, par découpe automatisée, d'équipements en zone irradiée, comme le présentent Brandt [Brandt et al.(1997)] et Louis [Louis et al.(2000)], dans leurs diverses études.

La littérature fait également apparaître de nombreux travaux, menés principalement aux USA, sur le démantèlement de munitions militaires ou de mines.[Fos. et al(1994)] [Gund. et al.(2000)]. Fossey et Gundiler ont mis en évidence l'intérêt du procédé pour ouvrir, en réduisant au maximum les risques d'explosion, ces différents équipements, de façon à ensuite séparer la matière explosive des enveloppes métalliques. Ces différents composants peuvent ensuite être valorisés dans les filières respectives des matériaux constitutifs.

Des applications de réparation existent par ailleurs, comme l'illustrent les travaux de Gadd [Gadd et al.(2000)] qui ont montré l'intérêt du jet d'eau comme outil de réparation de bateaux pétroliers (découpe de canalisations inter-cuves).

Plus récemment, la littérature fait apparaître de nouveaux développements, menés par Geskin, Goldenberg et Caudill. [Geskin et al (2002)], toujours en découpe au jet d'eau abrasif, sur des tubes cathodiques de vieux téléviseurs, de façon à séparer le verre du cône de celui de la dalle extérieure, de compositions différentes. Ce procédé se pose ainsi en alternative à d'autres procédés de séparation dalle / cône (fil chaud entre autres), avec en particulier un avantage de productivité, et la possibilité d'utiliser le jet fluide pour l'opération suivante de décapage des poudres luminophores de la dalle, très polluantes et donc à récupérer pour traitement.

Une approche plus globale des produits de grande consommation, comme ceux de l'électroménager, est menée actuellement de façon à aborder, d'un point de vue méthodologique, l'ensemble des potentialités du procédé pour ces domaines [Spath et Klimmek(1996)]. Ceci reste très exploratoire.

On retrouvera plus loin dans ce document, des applications au jet d'eau pur pour les mêmes secteurs industriels.

### **III.2.2 Le jet d'eau appliqué au décapage**

Le jet d'eau sans abrasif (jet d'eau pur) trouve depuis 10 ans un débouché touchant de près les problèmes environnementaux en temps qu'alternative à différents procédés de décapage, chimiques ou mécaniques.

Le développement des procédés de "traitement de surface" a grandement influencé, depuis quelques années, les performances et la durée de vie des produits manufacturés. Ces procédés confèrent aux pièces traitées de multiples qualités telles que :

- La résistance à l'abrasion,
- La résistance à la corrosion,
- La protection thermique,
- Des propriétés tribologiques,
- Des propriétés tactiles,
- Des qualités esthétiques.

Les solutions mises en oeuvre sont très variées et utilisent des traitements mécaniques, thermiques ou chimiques, mais également l'ensemble des techniques de protection (et de décoration) par revêtement, de la simple peinture au dépôt technique type PVD ou équivalent.

Les pièces ainsi réalisées sont souvent coûteuses car à haut degré de technicité. Ceci impose souvent, au cours de leur cycle de vie, certaines opérations de maintenance destinées à :

- Corriger des défauts de fabrication détectés après revêtement de surface,
- Réparer certaines zones endommagées en cours d'utilisation (dépôt ou substrat), Un exemple significatif concerne les réacteurs d'avion, pour lesquels la plupart des constructeurs imposent le jet d'eau comme outil de maintenance, pour élimination des revêtements tribologiques et thermiques des carters ou éléments tournants.

-Maintenir les fonctionnalités ou l'esthétique de la pièce (ébavurage, nettoyage de pièces après usinage pour l'industrie automobile par exemple),

-Modifier l'esthétique de la pièce (nouvelle peinture de protection du Centre Georges Pompidou à Paris, ...),

-Nettoyer les équipements industriels de traitement (chaînes de peinture, ...),

Ces applications de décapage sont éloignées de notre problématique, mais leurs développements ont donné naissance aux équipements jets d'eau maintenant utilisés pour le démantèlement (têtes multi-jets rotatives, buses jet plat). A ce titre, il est intéressant de les aborder.

Les principaux secteurs industriels déjà utilisateurs de ce procédé sont :

-L'industrie automobile, avec le nettoyage de cabines de peinture, caillebotis, chariots, convoyeurs,...

-Les cimenteries, avec l'élimination de revêtements réfractaires des structures internes de fours,

-L'industrie chimique, pour le nettoyage d'équipements de production: mélangeurs, canalisations,... [Men.Gens.(1996)]

-L'aéronautique, avec le décapage de barrières thermiques sur pièces mécaniques, entretien de turboréacteurs,...

-Le nucléaire et l'énergie, avec la décontamination de surfaces, d'équipements, nettoyage de cuves inox, le nettoyage et décapage de pales de turbine, de cuves et canalisations de grandes dimensions,... [Tieu et al.(2002)]

-Les services maritimes et fluviaux, avec le décapage de coques de navires, d'équipements et structures immergées (Photo.1.3.),



Photo.1.3. : Décapage de coque de navire (source société Rivard)



-Les services de génie civil, pour des ponts métalliques, de voirie, équipements d'aéroports, le décapage de graffitis, de peintures résiduelles, l'enlèvement de marquage routiers et de traces de pneus sur pistes d'atterrissage,... [Momber(1993)] (Photo.1.4.)



Photo.1.4. : Décapage de ponts métalliques(source société Rivard)

-L'industrie alimentaire, avec nettoyage et décontamination d'entrepôts frigorifiques, de conserveries,...

### III.2.3 Du décapage au démantèlement

Dès qu'il a été possible de traiter des surfaces importantes, il devenait en toute logique possible d'enlever de forts volumes de matière, tout simplement en adaptant les paramètres de tir (temps d'exposition en particulier).

Les premières applications ont touché le génie civil, dans le cadre de l'hydrodémolition sélective du béton armé [Remisz (1993)]. L'objectif était de proposer une alternative au marteau piqueur, permettant de :

- Enlever béton ou enduit abîmé, sans altérer le ferrailage ni le béton sain en sous couche (pas de fissuration),
- Générer des gravats de dimension réduite et maîtrisée,
- Réduire les nuisances sonores,
- Réduire la pénibilité du travail.

Des robots ont permis d'obtenir un travail très fin, par l'utilisation de têtes multi-jets oscillantes, tel que présenté dans la Photo.1.5. suivante.



Photo.1.5. : hydrodémolition sélective du béton (source société Rivard)

Depuis, d'autres applications ont vu le jour et se développent, dans des domaines très variés. Elles relèvent toutes de la même idée :

**Démanteler sélectivement un produit « composite multi-matériaux », en réduisant l'un des composants sous forme d'un granulat bien maîtrisé et le séparer du restant du produit sans que celui-ci ne soit altéré.** [Mom.Kov.(1995)]

Ce cas s'applique aux grands secteurs industriels évoqués précédemment :

-Industrie automobile, pour le démantèlement de volants de voiture rebutés ou de pneumatiques usagés. L'objectif est, dans ce cas, de séparer la mousse ou le caoutchouc surmoulés sur des éléments métalliques, sans toucher à l'intégrité de ces derniers [Corn.Froe.(2002)]. Un intérêt induit est de pouvoir obtenir de la poudre de fine granulométrie [Kik.et al.(2000)] [Fan.et al.(2001)]. D'autres applications sont envisageables, dans les nombreuses pièces surmoulées présentes dans un véhicule automobile. La présence de matériaux organiques accrochés aux alliages ferreux est en effet mal acceptée par les aciéristes, qui s'en trouve pénalisé par les taux de carbone induits, ainsi que par les rejets atmosphériques associés au procédés de fusion.

-Industrie papetière ou textile : Le jet d'eau, déjà utilisé comme procédé de « tissage », pour réaliser des feuilles de tissu à fibres végétales, permet également en fin de vie de ces produits, de les broyer sous forme de pulpe permettant un nouvel emploi [Gal. Et al.(1991)].

D'une manière assez similaire, l'approche fin de vie des revêtements du bâtiment, et plus particulièrement des moquettes, pose problème dans la mesure où ce produit ne peut être considéré comme un déchet ultime, alors que sa composition l'empêche d'être facilement valorisé. On trouve en effet souvent, sur une trame tissée en fibres de polypropylène, des fils en laine, polyamide 66 ou PP, selon le niveau de gamme du produit. Sur la face inférieure, c'est une couche de latex qui forme un matelas amortissant et insonorisant. Ce composite impose, pour être recyclé, une séparation de ces composants, et en particulier de s'affranchir du latex. Le jet d'eau haute pression permet ceci. Il est alors possible de récupérer le PP ou le PA pour les recycler. Des travaux sont menés dans cette direction [Weiss(1998)] [Weiss(2001)]. Un brevet a également été déposé en Allemagne à ce sujet [Kni. et al.(1998)]. Les performances de séparation sont assez spectaculaires, comme illustré sur la photo suivante (Photo.1.6.)



Photo1.6. : Elimination du latex sur une moquette usagée (source ENSAM)

-Industrie électronique : De nombreuses applications de démantèlement sont explorées actuellement, que ce soit pour le broyage de cartes électroniques [Cor.(2003)], ou pour le démantèlement de disc compacts [Wit.( 1998)]. L'idée est toujours la même : Profiter de la sélectivité du procédé pour séparer intelligemment les différents matériaux, et ainsi les valoriser au mieux.

-Industrie nucléaire et de l'énergie : Des travaux sont menés depuis plusieurs années sur des systèmes automatisés d'extraction de déchets de matériaux radioactifs solidifiés, sous forme compacte, dans des cuves de rétention.

L'utilisation de buses multi-jets rotatives permet de réduire cette matière, sous forme d'une bouillie à faible teneur en eau, qu'il est alors possible d'aspirer pour retraitement. [Bam.Ste.(1993)] [Gal.Sum.(1994)] [Sum.Gal.(1996)]

-Industrie militaire : On retrouve ici encore, comme pour les applications avec des jets chargés d'abrasif, des études menées sur l'extraction et la passivation d'obus et de mines. Les principaux travaux visent à utiliser le jet d'eau haute pression pour repérer les mines anti-personnelles ou anti-chars, par la modification des émissions acoustique émises par le jet lorsqu'il rencontre un objet métallique enfouie dans le sol. Une seconde étape consiste à dégager cet objet par un système de buses rotatives, réduisant la terre aux alentours en une boue immédiatement pompée et évacuée. L'intérêt principal du procédé est ici lié au fait que les faibles débits d'eau utilisés génèrent de très faibles efforts sur la mine, ce qui évite que les dispositifs de mise à feu ne soient activés. Ceci, associé à une absence d'effet thermique, limite fortement les risques d'explosion. La neutralisation est alors réalisée par découpe au jet abrasif classique [Fos.(2002)], ou par d'autres fluides (ammoniac), pour les mines dont les carters sont en composite [Has.Mil.(2000)], ou particules de glace, [Chu. et al.(2000)]. La séparation entre matériau explosif et enveloppe peut alors être réalisée. On revient alors à une opération de décapage [Fos. Sum.(1994)].

### **III.2.4 Premier bilan du démantèlement par jet d'eau**

Les travaux de démantèlement présentés ici sont pour la plupart menés par des laboratoires Américains, à un niveau le plus souvent exploratoires et de faisabilité. Ils visent à évaluer le potentiel de développement du jet d'eau H.P. Les efforts ont le plus souvent porté sur l'adaptation et la mise au point d'outillages, permettant d'exposer les produits à traiter au(x) jet(s) sur l'ensemble de leur surface, d'où des problèmes de géométrie et de cinématique spécifiques abordés au cas par cas. Rien ne semble avoir été fait quant à la compréhension profonde des modes d'enlèvement de matière, ce qui se conçoit dans la mesure où les matériaux traités sont, pour certains, assez peu couramment étudiés en mécanique. Il était de toute façon prématuré de positionner les recherches sur cet aspect. Le besoin de productivité est moins immédiat, pour des applications militaires ou nucléaires, mais c'est un volet à aborder, pour des applications de recyclage touchant des produits manufacturés plus courants, à traiter en grandes quantités.

Il est alors important de comprendre les mécanismes d'interaction mis en jeu, de façon à prévoir la performance du procédé, pour l'optimisation des outils de démantèlement encore émergent aujourd'hui.

### III.3. Outils de démantèlement et paramètres principaux

#### III.3.1. Têtes et buses jet d'eau

Les exemples présentés dans le paragraphe précédent font en général référence à deux types principaux de technologies. On appellera tête jet d'eau un ensemble mécanique, fixe ou animé de mouvements générés par la commande de la machine de traitement, portant une ou plusieurs buses d'éjection, éventuellement mobiles par rapport à la tête, selon une cinématique particulière.

##### *-Les têtes à « jet plat »*

Les têtes jet plat sont en général de simples pièces métalliques, supportant une et plus rarement plusieurs buses, avec leur système d'alimentation en eau. Ces buses sont différentes, du point de vue géométrie interne, de celles présentées dans le paragraphe III.1. Nous avons en général une fente de 2 à 3 mm de profondeur, inclinée dans les deux directions, débouchant directement sur l'extérieur ou sur un alésage de diamètre constant. On recherche dans ce cas non pas un jet cylindrique de faible diamètre, mais un jet de section oblongue, permettant un écoulement le plus stable possible et avec une répartition énergétique maîtrisée. Typiquement, l'objectif est d'obtenir une répartition Gaussienne sans effet de bord, comme le montre notre schéma suivant (Fig. 1.13.) :

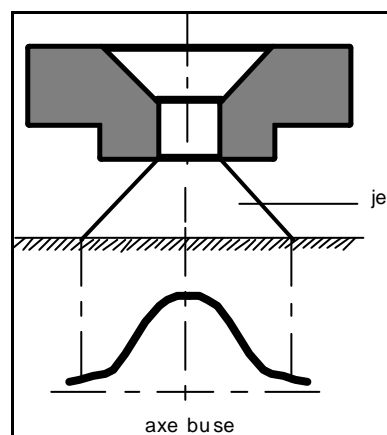


Fig. 1.13. : Répartition énergétique d'une buse à jet plat

La différence entre les jets issus d'une buse jet plat, par rapport à une buse cylindrique de découpe, est illustrée Fig.1 .14.

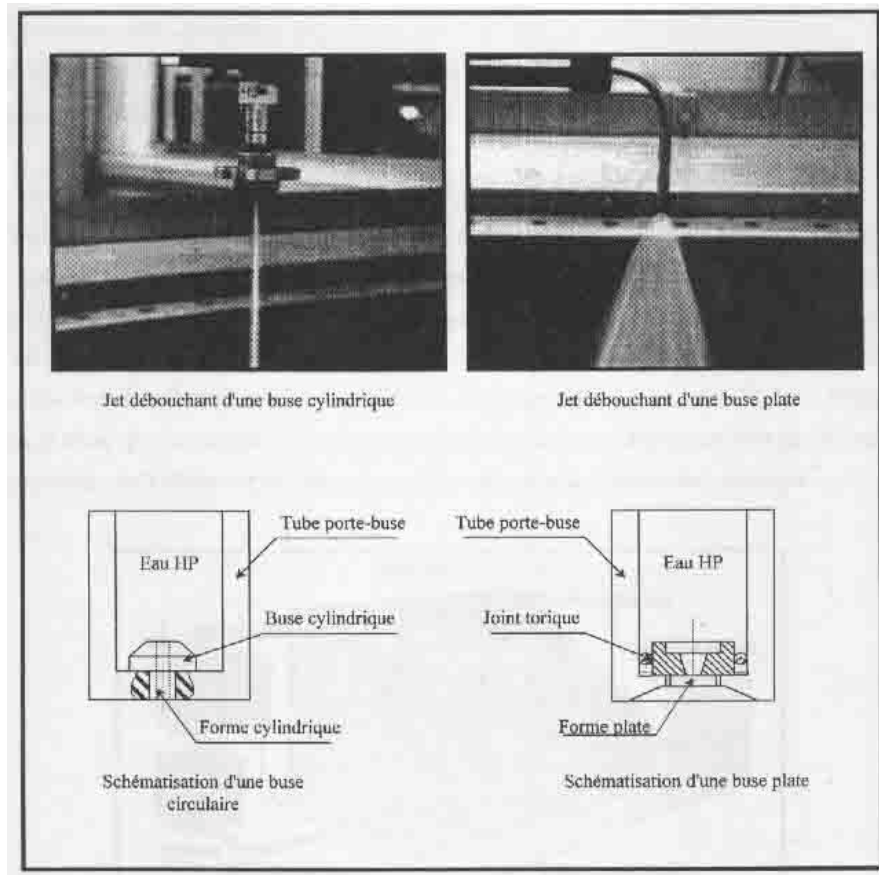


Fig.1.14. : Buses jet d'eau H.P. (document ENSAM)

### ***Les têtes multi-jets rotatives***

Elles utilisent en général des buses cylindriques identiques, ou très proches, de celles utilisées en découpe. Elles sont le plus souvent utilisées, car elles permettent de traiter de plus grandes surfaces, tout en s'adaptant à la morphologie de la pièce. Elles présentent en revanche l'inconvénient d'être encombrantes, de par la présence d'un système de joint tournant et d'une motorisation.

Il est possible de les caractériser comme étant des ensembles tournants, sur lesquels sont montées plusieurs buses cylindriques installées sur des diamètres différents, avec des inclinaisons différentes. L'objectif est d'optimiser la répartition cinétique des jets, en combinant mouvement de rotation de la tête et mouvement d'avance de l'ensemble. La variation des paramètres permet de contrôler l'uniformité de l'énergie hydraulique recue par la surface de la pièce [Knu.Bun.(1995)].

On voit par exemple, sur la figure suivante (Fig. 1.15), que pour le cas d'utilisation d'une seule buse, il y a concentration du nombre de passages du jet sur la pièce, pour les surfaces proches des bords de la tête (Zone b), au détriment de la zone située à l'aplomb du centre de la tête (zone a). Le traitement de la pièce (décapage ou profondeur d'enlèvement de matière par exemple), ne sera donc pas homogène dans ce cas.

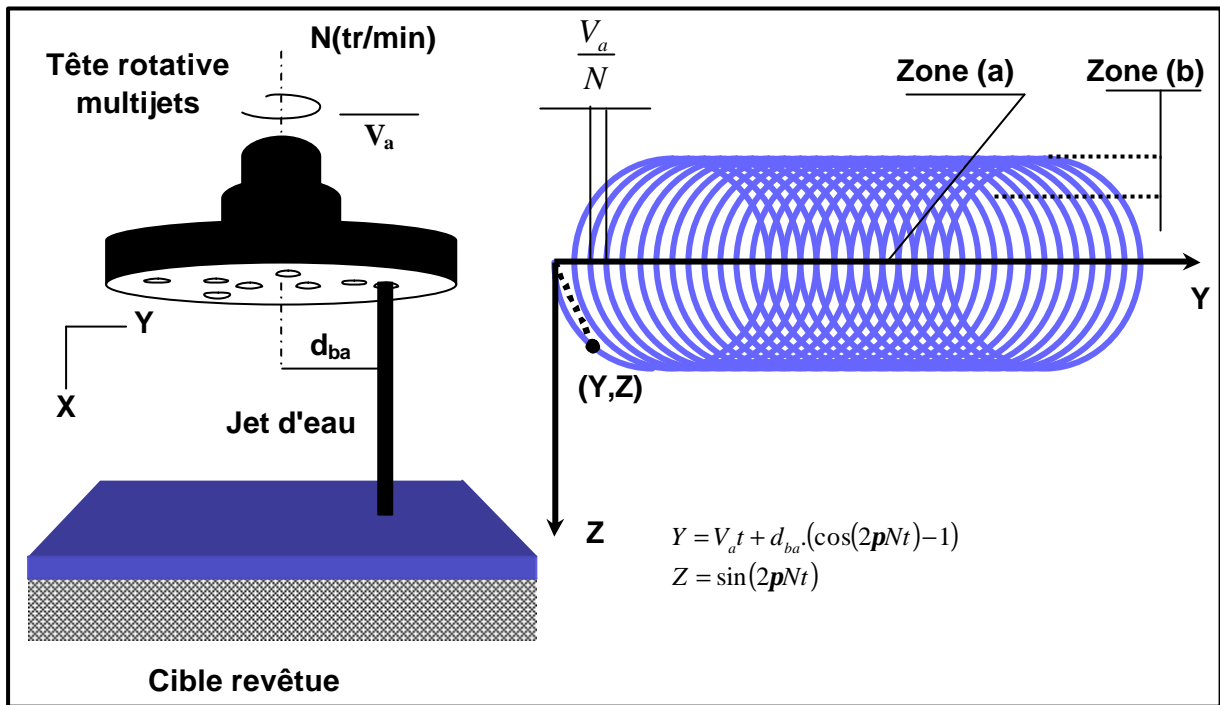


Fig. 1.15. : Composition du mouvement lors du décapage par une tête rotative mono-jet (document ENSAM)

Il est dans tous les cas très difficile d'obtenir une homogénéité parfaite au niveau de la surface traitée, au moins pour des cinématiques simples, comme celle présentée, la plus courante. D'autres cinématiques sont envisageables, mais se pose alors rapidement le problème de l'alimentation en eau des différentes buses. Ce problème sera abordé plus précisément dans les chapitres 3 et 4, puisqu'il sera au cœur de notre travail.

Une fois intégrés dans un process industriel, ces outils permettent de traiter des applications très variées, avec des machines dédiées, ou au contraire très flexibles comme le montre le schéma page suivante (fig. 1.16).

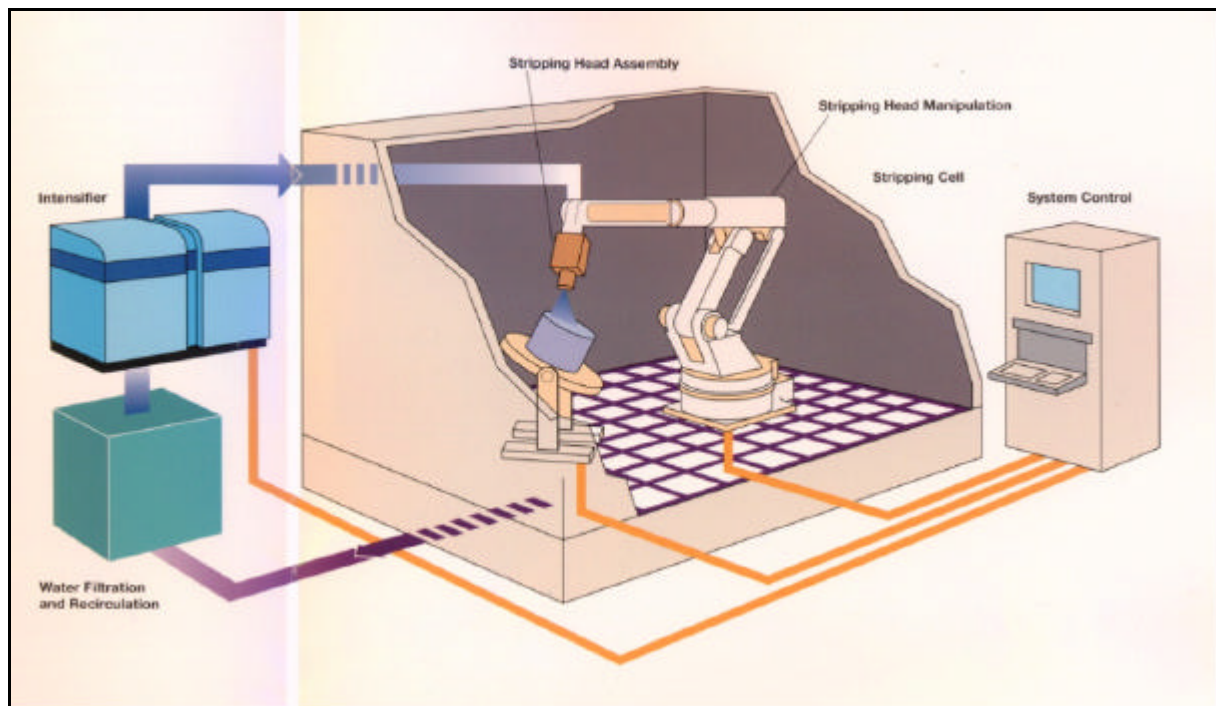


Fig. 1.16. : Installation robotisée de décapage ou de démantèlement par jet d'eau H.P.

(document Tafa)

### III.3.2. Paramètres du procédé

Ils sont très nombreux et pour certains difficilement maîtrisables, comme par exemple la géométrie interne des buses et ses disparités, sur lesquelles il est difficile d'intervenir.

Si l'on s'attache aux paramètres spécifiques aux têtes multi-jets rotatives, nous relevons :

- La pression ( 3800 bars maxi pour notre étude),
- Le diamètre des buses (0,05 à 0,5 mm),
- Le nombre de buses (13 au maximum),
- La vitesse de rotation de la tête (50 à 1200 tr / min),
- La distance de tir (supérieure à 10 mm),
- L'angle d'inclinaison des buses (0 à 45 °),
- La vitesse d'avance de la tête (inférieure à 2 m / min).

(les valeurs numériques indiquées correspondent aux choix effectués pour notre étude, en adéquation avec les valeurs utilisées industriellement)

Les jets sont continus, mais nous verrons dans le chapitre suivant que des chercheurs essayent de développer des applications avec des jets pulsés.



Ces paramètres ont une influence directe sur la performance du procédé. Ces performances sont :

- Pour la découpe, avec une seule buse, l'épaisseur découpée (ou la profondeur de saignée) ainsi que les qualités macro et micro-dimensionnelles des surfaces générées,
- Pour le décapage, le nombre de couches décapées, le taux de dépôt restant, l'homogénéité du traitement de la surface et la non altération du substrat,
- Pour l'usinage ou le démantèlement, cas nous intéressant ici plus particulièrement, le volume de matière enlevé par unité de temps, la géométrie des surfaces obtenues, la régularité de l'épaisseur de matière enlevée et la granulométrie des copeaux enlevés.

#### **IV. CONCLUSION**

Il ressort de l'ensemble de ce chapitre que les applications potentielles du jet d'eau comme outil de démantèlement, si elles restent marginales du point de vue marché en comparaison des applications de démontage et de broyage, présentent malgré tout un potentiel de développement intéressant. Comme nous l'avons vu au travers de différents exemples, le jet d'eau, si on excepte le démantèlement par découpe au jet abrasif, est surtout intéressant pour démanteler de façon sélective des produits « composites multi-matériaux », le plus simple étant évidemment un bi-matériaux, en réduisant l'un des composants sous forme d'un granulats bien maîtrisé et en le séparant du restant du produit sans que celui-ci ne soit altéré. Si on laisse, dans un premier temps, de côté les aspects liés à l'élimination complète du matériau « broyé » de la partie non altérée du produit (nettoyage de la matrice), spécifiques à la structure du produit traité, qui seront illustrés dans le chapitre 5, il est possible de simplifier notre problème en l'identifiant à un usinage de matière, à l'image du fraisage de poches par exemple.

Les outils utilisés sont des têtes multi-jets rotatives. Il est nécessaire d'appréhender les modes d'action d'un jet sur la matière, avant de généraliser au cas d'une exposition de la surface à plusieurs jets, selon une fréquence de passage maîtrisée. Notre objectif sera donc le suivant : Mettre en place un modèle d'enlèvement de matière, pour une buse multi-jet rotative, permettant, sur une largeur d'usinage ( $L$ ), d'enlever de la matière sur une profondeur ( $b$ ) alors que l'action d'un seul passage d'un seul jet génère une saignée de profondeur ( $a$ ) très inférieure à ( $b$ ) (Fig. 1.17).

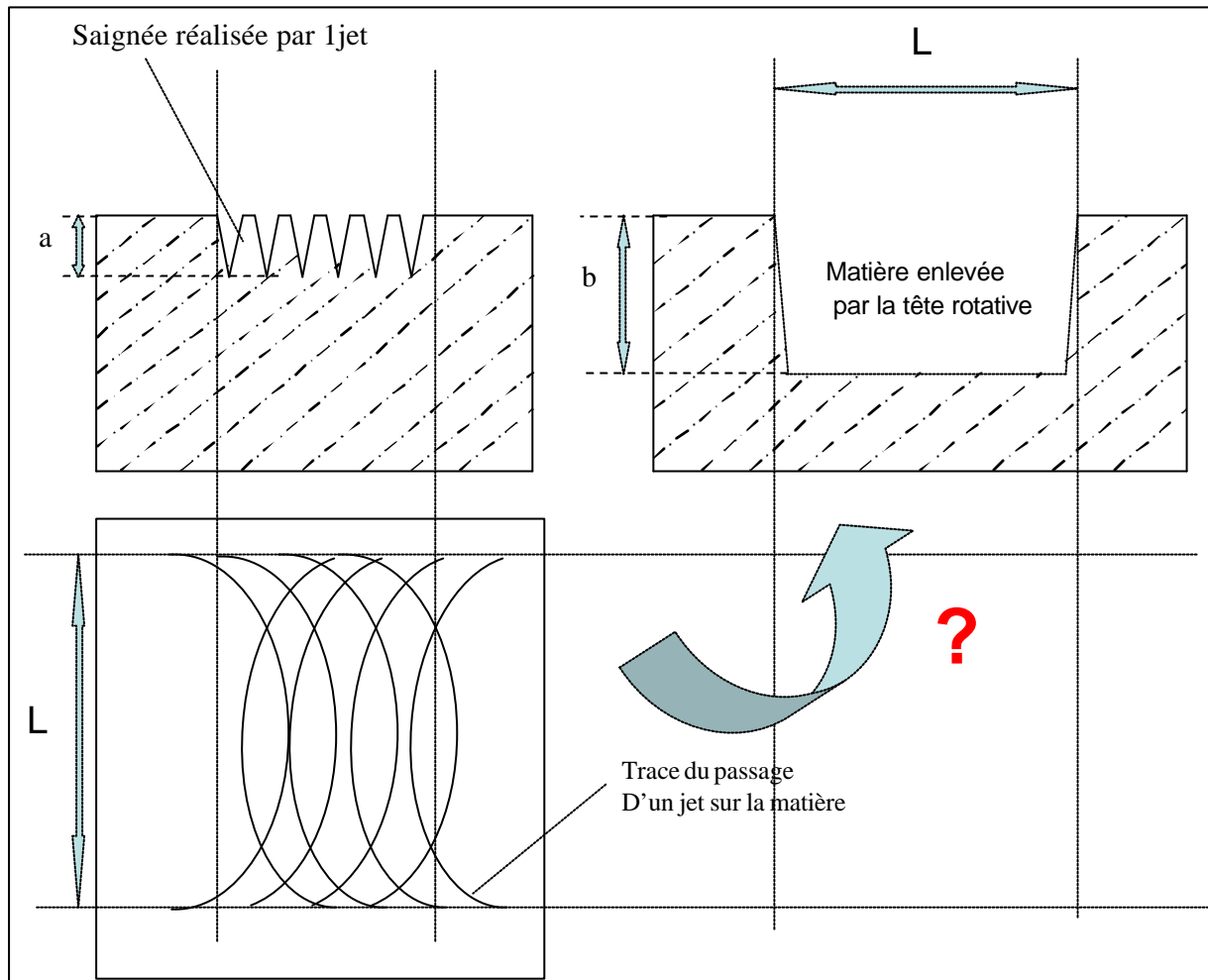


Fig.1.17. : Représentation schématique de notre problématique

La connaissance des modes d'interaction jet / matière nous conduira, dans le chapitre suivant, à présenter brièvement les acteurs de la recherche dans le monde du jet d'eau, l'avancement des travaux dans la connaissance des écoulements dans l'air de fluides à grande vitesse, mais surtout leur action mécanique lorsqu'ils viennent frapper la matière, en découpe comme en traitement de surface. Les principaux modèles de découpe et de décapage seront présentés. C'est un préalable nécessaire à la réflexion quant aux pistes de travail à explorer pour modéliser l'enlèvement de matière en usinage. Ceci permettra en corollaire de prévoir le débit de matière réalisé et l'optimisation des outillages.

## **CHAPITRE 2. ENLEVEMENT DE MATIERE PAR JET D'EAU H.P.**

### **I.INTRODUCTION**

Nous venons de voir l'importante variété des applications potentielles des jets fluides H.P., en temps qu'outil de démantèlement, au travers de nombreuses publications. Ces travaux, souvent préliminaires et exploratoires, font appel principalement à une approche expérimentale, tant du point de vue de la conception des outillages que de celui de l'analyse des paramètres influents. On trouve par contre peu d'étude visant, en s'appuyant sur l'analyse des phénomènes physiques mis en jeu lors de l'impact des jets sur la matière, à optimiser les têtes de projection, et par voie de conséquence, l'optimisation de l'enlèvement de matière. La démarche retenue nous amène donc à s'intéresser aux jets (création, écoulement dans l'air), et tout particulièrement à leur interaction avec le matériau à détruire.

La littérature est abondante pour le jet d'eau abrasif et son action sur la matière, elle est beaucoup plus réduite en ce qui concerne le jet d'eau pure :

Quelques actions sont menées dans le cadre du décapage, avec la recherche de modèles prédictifs d'enlèvement de dépôts sur un substrat. Ils s'appuient directement sur les études d'impact d'un jet (ou d'une goutte) sur une cible fixe. Cette notion d'impact est abordée dans de nombreuses études, très éloignées des applications de notre procédé : impact de la pluie sur un pare-brise d'avion par exemple. Nous verrons qu'il est difficilement envisageable d'y adapter notre démarche, car les phénomènes physiques, qui découlent de ces impacts sur une cible revêtue, sont assez différents de ceux de la découpe.

Les travaux concernant l'élaboration de modèles d'enlèvement de matière, sont peu nombreux et assez sectorisés. Ceci est probablement dû au fait que le procédé, développé pour la découpe, est appliqué à des produits dont les matériaux constitutifs sont très peu étudiés du point de vue de leurs caractéristiques mécaniques. Les applications classiques du jet fluide sont en effet liées à :

- des produits agroalimentaires frais ou surgelés,
- des matériaux d'isolation (laine de verre, polystyrène expansé, ...),
- des matériaux d'habillement (cuir, textiles,...),
- des matériaux d'habillage (dans l'automobile) de faible épaisseur,
- ...

Ces matériaux rentrent assez rarement dans le périmètre de réflexion des mécaniciens. Le domaine industriel, qui s'est le plus intéressé à ces phénomènes d'interaction, est le secteur minier, qui a décelé certains potentiels du procédé pour l'extraction de pierres. Les modèles mis en place sont dans ce cas développés pour des matériaux fragiles, assez éloignés de ceux constituant notre cible en démantèlement. Les polymères, les élastomères,... se caractérisent plutôt par leur ductilité. Il existent malgré tout quelques modèles, suffisamment généralistes et parfois même spécifiquement mis en place pour des matériaux relevant de notre problématique, susceptibles de servir de base de travail pour notre modélisation de l'usinage dans la masse. Ils seront présentés de manière plus détaillée.

## II. LA RECHERCHE EN JET D'EAU H.P. DANS LE MONDE

Le jet d'eau H.P., procédé relativement jeune au regard d'autres procédés tel l'usinage à l'outil coupant, s'est développé sur des niches d'applications relativement étroites. Il est normal dans ce cadre que les activités de recherche soient également peu nombreuses rapportées au procédé précédemment évoqué.

Ont trouve malgré tout, en petit nombre des laboratoires industriels et universitaires sur tous les continents, particulièrement aux U.S.A. mais également au Japon, en Chine, en Russie et en Europe bien évidemment. Les pays les plus actifs y sont l'Allemagne, l'Angleterre et l'Italie, la France est peu représentée, à notre connaissance, seule l'ENSAM développe des travaux.

Il est possible de discerner trois champs principaux de travail :

- Les travaux ayant pour vocation l'étude de la création du jet (buses et têtes de jet d'eau)
- Les travaux concernant l'écoulement des jets dans l'air,
- Les travaux relatifs aux interactions matériau / procédé.

Ces trois champs thématiques sont illustrés par la figure suivante (Fig. 2.1.)

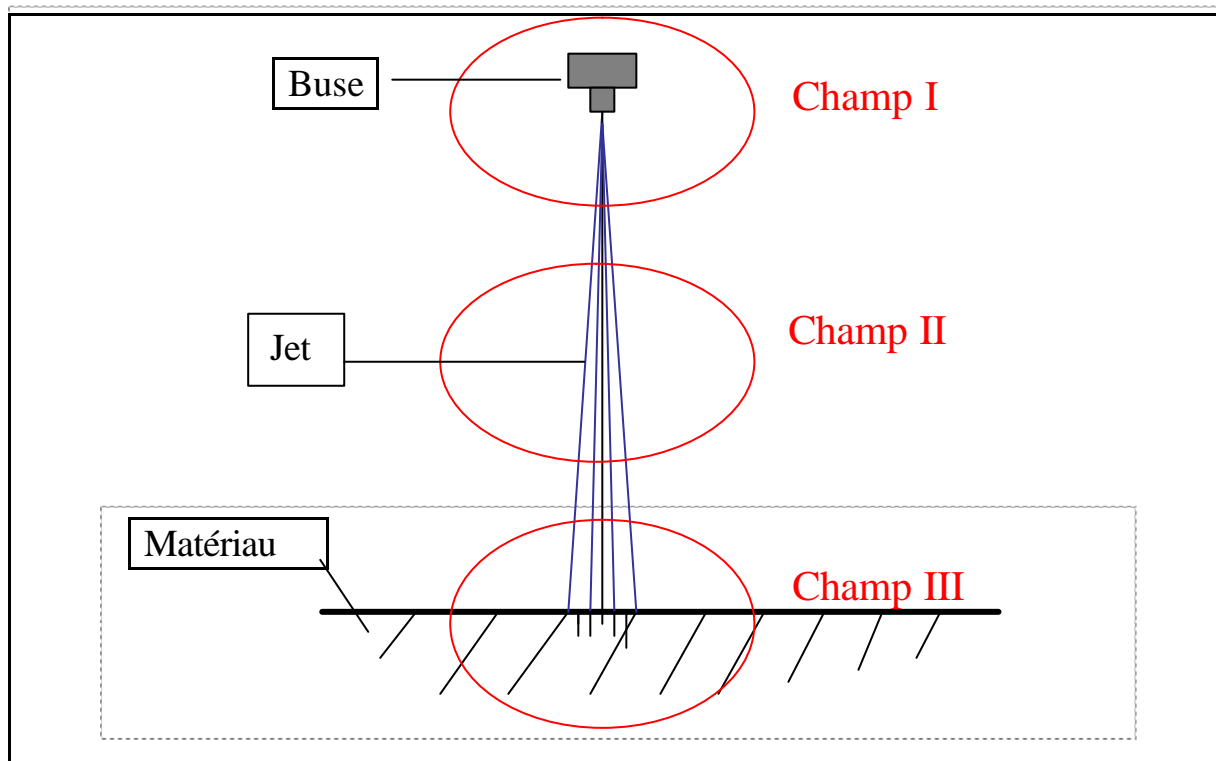


Fig.2.1. : Illustration des champs thématiques de recherche

Pour chacun de ces champs, les travaux peuvent se regrouper en deux grandes familles :

- Travaux concernant les jets d'eau pure,
- Travaux dédiés aux jets chargés d'abrasif.

## **II.1. Création d'un jet fluide**

Les développements menés sur la géométrie interne des buses font l'objet de fort peu de publications. Ils sont pour la plupart réalisés par des entreprises, qui préfèrent garder confidentielles ces données et les informations concernant les moyens de fabrication.

On trouve par contre des études relatives aux têtes de découpe par jet d'eau abrasif, sur les différentes options de systèmes de mélange :

- injection de l'abrasif après la création du jet d'eau pure, (système dit «à chambre de mélange »),
- Mise en pression puis accélération d'une émulsion au travers d'une buse (système dit «à injection directe »),

Ces derniers travaux sont menés principalement par le BHR Group en Angleterre. [Mill.et al.(1994)], [Mill.(2000)],

L'enjeu principal est d'améliorer le transfert d'énergie aux particules de façon à augmenter le rendement du procédé. Le développement de têtes de micro découpe, permettant de générer des jets chargés d'abrasif de faible dimension (diamètre inférieur à 0,4 mm) est également un objectif important des chercheurs.

Par ailleurs, des études sont menées au niveau de la création de jets non continus, pulsés, ou cavitants de façon à augmenter le niveau d'agressivité des jets d'eau pure sur les matériaux à découper.

## **II.2. Ecoulement dans l'air**

Les travaux sur ce point ne sont pas très développés pour des applications spécifiques au procédé. Des développements existent surtout pour d'autres types d'applications, tels que l'injection de carburant dans les moteurs à explosion par exemple. Les études spécifiques au jet d'eau sont assez anciennes [Yan.(1974)] et [Yan.et al.(1978)].

Les plus récentes concernent les effets du jet circulant dans la chambre de mélange [Osm.(1999)]. L'injection de l'abrasif dans le jet pur n'est réalisable que grâce à la diffusion du jet dans l'air, au cours de son passage dans la chambre de mélange.

### **II.3. interaction matériau / procédé**

C'est le domaine de loin le plus abordé dans la littérature scientifique, plus particulièrement en jet d'eau abrasif, ou de nombreux modèles d'enlèvement de matière existent. [Fin.(1958)] [Bitt(1963)a] [Bitt(1963)b] [Hash.(1987)],...

La plupart concernent la découpe, qui est l'application la plus couramment explorée, sur divers domaines industriels (fabrication mécanique, exploitation minière, ...). Quelques explorations sont menées en usinage par l'ENSAM [Cor.et al.(1992)], mais surtout par le BHR Group [Mill.(2002)], qui essaye d'exploiter un système d'injection directe en tournage et fraisage.

Des aspects liés à la sécurité des personnes sont abordés par ce biais, avec des études médicales relatives aux blessures par jet d'eau pur ou chargé d'abrasif.

Tous ces phénomènes d'interaction Matériaux / Procédé seront plus particulièrement détaillés dans la suite de ce chapitre.

### **II.4. Bilan de l'activité internationale**

Les travaux menés par les différents chercheurs sont pour la plupart décrits dans les proceedings des trois principaux congrès Internationaux, qui alternent régulièrement, à concurrence de 1 à 2 par an :

- Le congrès Américain,
- le congrès Européen,
- Le Congrès du Pacifique.

Des résultats sont également présentés dans les principaux journaux de mécanique ou d'hydraulique, en particulier ceux proposant un volet « procédés de production ». Le CIRP et la revue *Wear* présentent régulièrement des articles sur ces sujets.

Il est ainsi possible de représenter l'activité scientifique internationale sous la forme suivante (Tab..2.1.)

Regroupements thématiques	Type de travaux	Acteurs
Génération des jets développement buses	-Ecoulement dans l'air -Jets pulsés ultrasoniques -Mélange eau / abrasif	-National Research Council (Can.) -University of Missouri (USA) -New Jersey Institute of Technology (USA) -University of Nottingham(GB)
Interaction matériaux / procédés	-Enlèvement de matière par eau pure -Enlèvement de matière par jet chargé d'abrasif	-Institute of Géonics (Czech Republic) -University of Kentucky (USA) -Lulea University of Technology (Suede) -Polytechnico di Milano (I) -ENSAM (F)
Exploitation minière	-Applications d'extraction, -Forage assisté par jet d'eau -Modèles de découpe eau pure	-University of Calgary (I) -University fo Leeds (GB) -Ecole des mines (F) -University of Petrovni (Rou.)
Sécurité et santé	-Blessures par jet eau pure ou chargée -Equipements de protection	-University of Hannover (D) -University of Missouri (USA)
Production industrielle	-Applications de découpe, -Application de perçage, -Micro-découpe ou perçage -Usinage dans la masse en jet abrasif	-BHG Group (GB) -Quest Inbtegrated (USA) -Chalmers University of Technology (Suede) -New Jersey Institute of Technology (USA) -Polytechnico di Milano (I) -University of Kentucky (USA) -University of Hannover (D) -ENSAM (F)
Nouvelles applications	-Décapage -Démantèlement -applications sous-marines -Pétrochimie	University of Rhode Island (USA) -Huainan Minig Institute (Chine) -University of Missouri (USA) -University of Kentucky (USA)

Tab. 2.1. : Panorama de l'activité internationale de recherche

Remarquons que, si la recherche est active sur la modélisation de l'enlèvement de matière en découpe, ainsi que sur l'exploration de nouvelles applications telles le décapage ou le démantèlement, il existe peu de travaux relatifs à l'usinage, tel que nous l'avons défini précédemment, et relatifs à sa modélisation.



### III. CREATION D'UN JET ET ECOULEMENT A L'AIR LIBRE

#### III.1. Création d'un jet fluide

La création de jets fluides à haute vitesse est issue de la transformation de l'énergie potentielle de l'eau (pression) en énergie cinétique au travers d'une buse d'éjection.

La vitesse,  $V_{e0}$ , évaluée à partir de l'équation simplifiée de Bernoulli appliquée entre la pompe et la buse s'écrit de la façon suivante :

$$V_{e0} = c_v \sqrt{\frac{2 p_{e0}}{\rho_e}} \quad (2.1)$$

Neusen et al. [Neusen et al(1994)] ont mesuré la vitesse du jet, en sortie d'une buse de 0,33 mm de diamètre, grâce à un système de vélocimétrie Laser (LVD). Les mesures obtenues font apparaître une différence de 7% environ avec la formule de Bernoulli. Cet écart est dû à deux raisons :

-La compressibilité du liquide induit la perte d'une partie de l'énergie qui est consommée par la compression de l'eau, d'où une vitesse réelle inférieure à la vitesse calculée. Le coefficient de compressibilité de l'eau étant de  $1 / 2000$  MPa, un accroissement de 2 Mpa de la pression du fluide amène une diminution de volume de 0,1 %. Ceci conduit, pour les pressions couramment utilisées en jet d'eau, à une différence entre pression réelle et pression calculée de 8 %.

-La vitesse du jet n'est pas uniforme dans la buse, comme cela avait déjà été indiqué dans le premier chapitre. Elle est maximale au centre, et plus faible vers les parois, à cause de la viscosité du fluide qui provoque un frottement. La vitesse moyenne sur le diamètre de la veine fluide est donc inférieure à la vitesse obtenue par l'application de la formule (2.1). Ceci est pris en générale en compte par l'application d'un coefficient de correction  $c_v$ , variant entre 0,85 et 0,95. [Neusen et al(1994)]

Dans la plupart des cas d'études, le fluide est considéré comme incompressible et non visqueux, ce qui permet de négliger le frottement et de considérer une distribution uniforme de la vitesse.

La formule (2.1) suffit alors.

Par ailleurs, la section réelle du jet dans la buse est en général inférieure à la section géométrique, du fait de l'apparition de zones de turbulence qui perturbent l'écoulement. Cette diminution est prise en compte par un coefficient de correction appelé « coefficient de contraction ».

Pour ce qui est du débit massique du jet, il est calculé à partir de la formule suivante :

$$q_m = C_d \frac{\rho d_0^2}{4} \sqrt{\frac{2P_0}{\rho}} \rho = C_d \frac{\rho d_0^2}{4} u_0 \rho \quad (2.2)$$

Avec :

$d_0$  = diamètre d'éjection de la buse

$P_0$  = Pression de l'eau

$\rho$  = masse volumique de l'eau

$u_0$  = vitesse d'éjection de l'eau

$C_d$  est le coefficient de débit, qui regroupe le coefficient de vitesse et le coefficient de contraction. La valeur du coefficient de débit dépend de la conception de la buse, et varie entre 0,6 et 1.

Ceci amène une quantité de mouvement réelle du jet inférieure à la valeur théorique. Cet écart est représenté par un coefficient d'efficacité de la buse, variant entre 0,6 et 0,9.

Ces coefficients illustrent les importantes disparités de comportement que l'on rencontre avec différentes buses, en fonction de leur conception mais également de leur fabrication. La réalisation de formes intérieures de si petites tailles, dans des matériaux très difficiles à usiner (perçage laser), induit la génération de jets très différents d'une buse à l'autre, pour une même série de produits. Ceci est très sensible, même pour des produits hauts de gamme. De plus, la brusque détente de l'eau lors de son passage dans la buse est susceptible de provoquer une précipitation des minéraux en solution, qui modifie l'écoulement et les caractéristiques énergétiques du jet. En pratique, la maîtrise du jet est très difficile à obtenir. Il s'agit donc d'un paramètre induisant des variations de résultats expérimentaux non négligeables, à ne pas oublier dans la suite de notre travail.

## III.2. Ecoulement d'un jet à l'air libre

### III.2.1. Approche expérimentale

Plusieurs études ont été menées afin de déterminer le comportement d'un jet d'eau pure à l'air libre.

Yanaida, [Yan.(1974)] et [Yan. et al.(1978)] ont montré, par une approche expérimentale, qu'un jet d'eau peut se décomposer en différentes régions (Fig.2.1.). La transition entre chaque région est alors définie par une abscisse  $X$  correspondant à la distance entre la sortie de buse,  $d_s$ , et un diamètre  $D$ . Il distingue ainsi 3 grandes régions phasiques :

- une région à flux continu où l'écoulement peut être considéré comme monophasique. Elle débute en sortie de buse et est caractérisée par une longueur  $X_b$  et un diamètre  $D_b$  (variable).
- une région à flux en gouttelettes, caractérisée par une longueur  $X_v$  et un diamètre  $D_v$  (variable). En début de région, il n'y a pas de transfert de quantité de mouvement entre le jet fluide et le milieu environnant (air). La continuité du liquide ne permet pas de mélange de l'air dans le jet. Au fur et à mesure de l'éloignement de la buse, un échange eau-air s'installe (dès la sortie de la buse). Des gouttes sont arrachées à la surface du jet et apparaissent en périphérie. La pénétration de l'air dans le jet réduisant la proportion de la phase continue, un mélange eau-air apparaît.
- une région à flux diffus où l'écoulement est diphasique. Les gouttelettes très fines forment un brouillard à faible énergie dans la phase gazeuse (air), dominante.

De même, Yanaida met en évidence trois grandes régions cinétiques :

- une région initiale où la vitesse axiale est constante. Cette région est divisée en 2 zones :
  - la **région à cœur potentiel**, où la pression dynamique est constante, caractérisée par une longueur  $X_p$  et un diamètre  $D_p$  (variable) ;
  - la **région de transition**, où la pression dynamique diminue lentement, caractérisée par une longueur  $X_c$  et un diamètre  $D_c$  (variable).
- une région principale, où la vitesse axiale diminue lentement, définie par  **$X_c$ , point d'éclatement du jet**. En réalité, la vitesse diminue dès la fin de la région à cœur potentiel.

- une région finale de grande diffusion où le jet, composé d'un brouillard (mélange eau / air), perd toute son énergie cinétique.

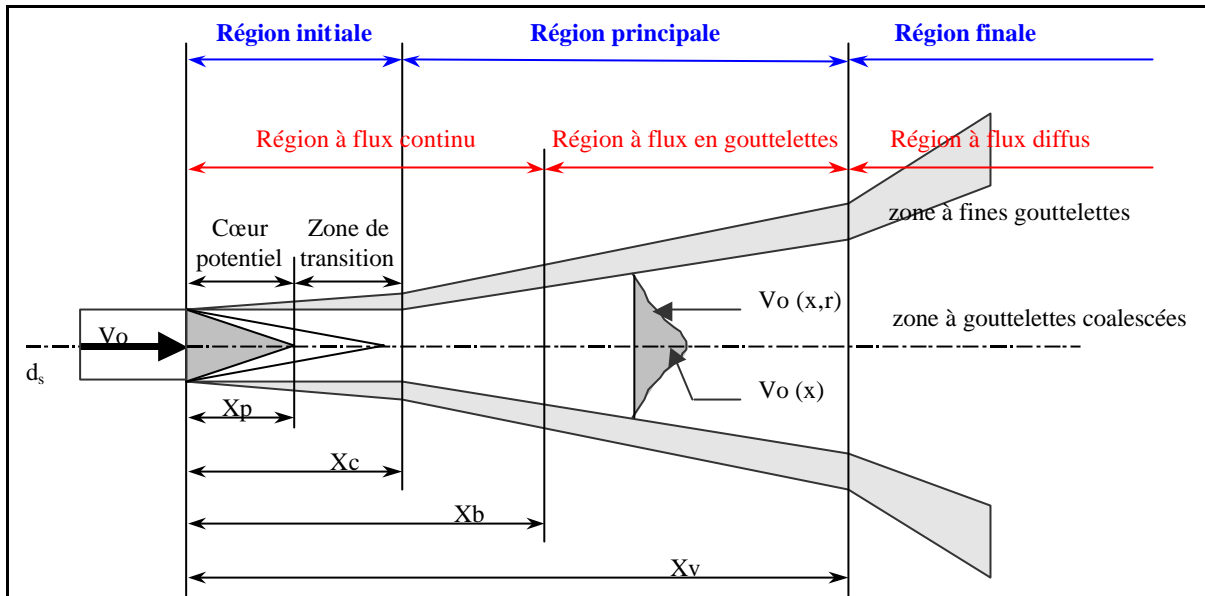


Figure 2.1 : Régions d'écoulement d'un jet dans l'air

Comme le montre la Fig.2.1., quelle que soit la région considérée, on trouve une zone de grande densité d'eau, au centre du jet, et une zone de brouillard d'eau, en périphérie, où la densité de gouttelettes d'eau dans l'air diminue quand on s'éloigne de l'axe du jet.

Pour des pressions inférieures à 100 MPa, domaine expérimental retenu, Yanaida, [Yan.(1974)] et [Yan. et al.(1978)], ont étudié le comportement des jets ainsi générés dans l'air. Il a ainsi été montré que :

- le diamètre du jet est quasiment constant dans la région du cœur potentiel et équivaut au diamètre de la buse.
- la longueur de cohérence  $X_c$  est fonction de quatre paramètres qui sont :
  - l'angle du convergent de la buse,
  - le rapport du diamètre et de la longueur de la buse,
  - le nombre de Weber,
  - le nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement. Le nombre de Reynolds n'intervient plus s'il est supérieur à 460 000.

- l'évasement du jet, soit la variation de section de la phase eau / air, dans la région principale, en fonction de la distance axiale à la buse s'exprime selon une loi parabolique :

$$R = k\sqrt{X} \quad (2.3)$$

avec  $k = 0,335$

- L'angle d'évasement du jet,  $\alpha$ , est tel que  $\tan \alpha = 0,03$  soit environ la valeur de  $1,7^\circ$ .
- les longueurs  $X_b$  et  $X_v$  sont liées au diamètre de buse par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} X_b = 480 d_s \\ X_v = 1191 d_s \end{cases} \quad (2.4)$$

Ces travaux ont été confirmés et affinés par d'autres chercheurs, notamment Ranz [Ran.(1958)] et Wu [Wu. et al.(1986)], pour des valeurs de pression de l'ordre de 300 MPa, utilisées en découpe à l'eau pure.

Un jet d'eau à l'air libre présente donc une zone cohérente et une zone diffuse, reliées par une zone de transition. La longueur de chacune des zones dépend de la géométrie de la buse. Le pouvoir de cisaillement du jet peut être utilisé, à condition toutefois que l'impact avec la matière se fasse au niveau de la région initiale, où l'écoulement a une vitesse axiale constante et peut-être considéré comme monophasique.

### III.2.2. Approche théorique

Les études expérimentales ont amené Yanaida et Ohashi [Yan.Oha.(1978)] à proposer une approche analytique de la répartition cinétique du jet dans les différentes régions.

Les hypothèses suivantes ont été retenues :

- pas de mélange entre le jet et l'air,
- pas de frottement entre le jet et l'air,
- pression statique constante dans le jet (pression atmosphérique),
- pas de force externe sur le jet,
- écoulement uniforme du jet en sortie de buse.

Ceci permet de définir la quantité de mouvement totale, qui est conservée sur la longueur du jet, sous la forme suivante :

$$2\rho r_0 \int_0^b U^2 r dr = \rho r_0 U_0^2 r_0^2 = cste \quad (2.5)$$

On obtient ensuite, en utilisant (2.3) :

$$\left( \frac{P_a}{P_0} \right) = \frac{1}{2k_1^2 X} \cdot \frac{r_0^2}{\int_0^1 \left( \frac{P}{P_a} \right) \mathbf{v} d\mathbf{v}} \quad (2.6)$$

Avec  $P = \frac{1}{2}U^2$  ,  $P_a = \frac{1}{2}U_a^2$  ,  $P_0 = \frac{1}{2}U_0^2$  et  $\mathbf{v} = r/R$

Ces valeurs de pression hydrodynamique sont relatives à un point de la section du jet, au centre de cette même section et à la sortie de la buse.

Yanaida et Ohashi [Yan.Oha.(1978)] ont montré par ailleurs que la pression hydrodynamique sur l'axe du jet demeure constante jusqu'à la fin de la région initiale. Ceci amène, à partir de (2.6) l'expression suivante :

$$2k_1^2 X_c \int_0^1 f(\mathbf{v})_{X=X_c} \mathbf{v} d\mathbf{v} = r_0^2 \quad (2.7)$$

Lorsque  $P_0 = P_{a(X=X_c)}$

En remplaçant cette dernière équation dans (2.6) on obtient :

$$\left( \frac{P_a}{P_0} \right) = \frac{X_c}{X} \cdot \frac{\int_0^1 f(\mathbf{v})_{X=X_c} \mathbf{v} d\mathbf{v}}{\int_0^1 f(\mathbf{v})_{X=X} \mathbf{v} d\mathbf{v}} \quad (2.8)$$

Si l'on considère que la pression hydrostatique est similaire dans toutes les sections du jet, il est possible d'écrire :

$$\int_0^1 f(\mathbf{v})_{X=X_c} \mathbf{v} d\mathbf{v} = \int_0^1 f(\mathbf{v})_{X=X} \mathbf{v} d\mathbf{v} \quad (2.9)$$

La variation de la pression hydrodynamique sur l'axe du jet devient alors :

$$\left( \frac{P_a}{P_0} \right) = \frac{X_c}{X} \quad (2.10)$$

Ce qui permet d'écrire, en utilisant l'équation (2.6) :

$$X_c = 0,97 \left( \frac{d_0}{k_1} \right)^2 \quad (2.11)$$

Avec  $\int_0^1 f(\mathbf{v}) d\mathbf{v} = \frac{9}{10}$

Yanaida [Yan.(1974)] a montré que la longueur de la zone cohérente du jet (zone initiale) est liée au diamètre de la buse (2.3) et (2.4) par l'équation :

$$\frac{X_c}{d_0} = cste \quad (2.12)$$

Comme évoqué dans le paragraphe précédent, cette valeur varie selon Yanaida entre 73 et 135, mais d'autres auteurs [Prandtl(1940)] proposent une plage de variation plus étendue.

### III.3. Conclusion

Cette courte présentation des travaux menés quant à la structure d'un jet HP ne se veut pas exhaustive mais elle permet de montrer les contraintes spécifiques de l'outil jet d'eau, dont la géométrie est variable, contrairement à un outil de coupe classique (au problème de l'usure près).

Nous sommes, confronté, pour notre usinage, à l'utilisation d'un outil dont la géométrie et les caractéristiques énergétiques varient avec :

- La distance de tir,
- La qualité géométrique et microgéométrique initiale de la buse,
- La variation dans le temps de cette qualité (usure buse).

Ceci ne sera pas sans conséquences sur la performance d'usinage (débit de matière en particulier). En effet, le maintien par exemple de la distance de tir n'est pas forcément réalisable, lorsque la géométrie de la pièce à usiner varie, le long du mouvement d'avance d'une tête multi-jets rotative, d'une façon excluant la correction de ce paramètre au niveau de la machine :

- Le profil de la pièce, dans le sens perpendiculaire au sens du mouvement d'avance, variable, alors que les buses tournent dans un plan fixe,
- L'encombrement de la tête incompatible avec la géométrie de la surface de la pièce (collisions).

Cette analyse des écoulements de jet réalisée, il est possible d'aborder l'étape suivante de notre analyse bibliographique, à savoir l'action de ces jets sur un matériau. Après une rapide description des mécanismes d'interaction pour les jets chargés d'abrasif, de façon à lever toute interrogation quant à la compatibilité de nos travaux avec une application d'usinage dans des matériaux nécessitant l'utilisation d'abrasif, nous aborderons le jet d'eau pur par une approche «simplifiée » goutte / cible avant de présenter les principaux travaux menés en décapage et en découpe.

## **IV. Etude des interactions entre jet d'eau HP et matériaux**

### **IV.1. Interaction Matériau / procédé en jet d'eau abrasif**

#### **IV.1.1. Phénoménologie**

Nous avons brièvement décrit dans le premier chapitre le mode de création d'un jet d'eau chargé d'abrasif. Le mélange ainsi obtenu est propulsé à une vitesse de l'ordre de 400 m/s sur la pièce, ou les particules éliminent par abrasion de la matière.

L'abrasion mécanique se caractérise par la superposition de deux modes :



-L'enlèvement de matière par coupe (ou érosion).

Il apparaît pour de faibles angles d'impact. Si lors de l'impact, la composante verticale de la vitesse de la particule est suffisante, le matériau se déforme plastiquement, et la composante horizontale de la vitesse induit une contrainte de cisaillement sur une surface égale à la section verticale de la particule ayant pénétré dans la matière. Si la contrainte dans cette section est supérieure à la contrainte de cisaillement du matériau, le matériau est endommagé. Ceci revient à générer un copeau, à l'image d'un micro-outil de coupe. Ce mode d'enlèvement de matière apparaît de manière prépondérante pour des matériaux ductiles. Ceci est illustré par le schéma suivant (Fig.2.2.).

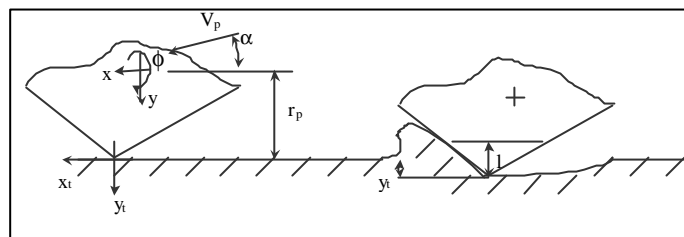


Fig.2.2. : Enlèvement de matière par érosion (Finnie 1958)

-L'enlèvement de matière par déformation plastique.

Il apparaît pour des angles d'impact élevés. Au moment de l'impact d'un grain, le plus souvent assimilée à une sphère, sur un plan, la contrainte maximale dans le matériau est obtenue à une profondeur équivalant à deux fois le rayon de la surface de contact projetée.

L'impact est considéré comme élastique si la contrainte maximale à l'impact ne dépasse pas la limite élastique du matériau. Dans le cas contraire, les impacts répétés entraînent une déformation plastique de la surface. Cette déformation influe sur la valeur de la limite élastique du matériau, qui augmente jusqu'à atteindre la valeur de contrainte à la rupture. La surface endommagée s'enlève alors par fragments.

L'enlèvement de matière par jet d'eau abrasif, en découpe, relève de ces deux modes. Hashish, [Has.1995], décrit le processus de coupe comme un processus cyclique d'enlèvement de matière. Sa décomposition (Fig.2.3.), est basée sur l'observation du processus de coupe, dans des matériaux transparents (plexiglas, verre). Les particules abrasives heurtent la surface avec de faibles angles d'impact et cisailent la matière sous forme de copeaux. Cette action induit une dissipation énergétique : les particules sont ralenties puis déviées sous les efforts de réaction du matériau.

On observe alors une courbure du jet, caractérisée par son angle de déflexion. Cette courbure augmente quand le volume de matière enlevé augmente et devient maximale ( $\sim 90^\circ$ ) pour la hauteur de coupe finale  $h_T$ .

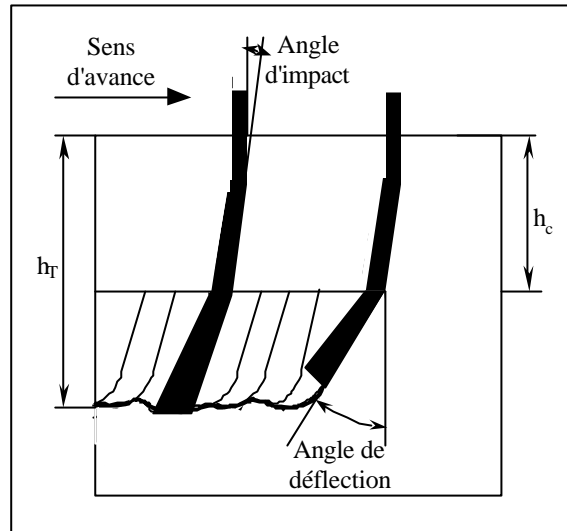


Fig.2.3. : Phénoménologie de la coupe (Ferrendier)

L'arrachement de matière, engendré par les particules abrasives localisées sur le front incurvé du jet, entraîne la formation d'une petite marche. La partie du jet située au-dessus de la marche ( $h_c$ ) continue à avancer avec le déplacement du jet, tandis que la partie inférieure du jet reste attachée à la marche. La marche avance, et la courbure de la partie inférieure du jet augmente, jusqu'à une taille de marche limite, au-delà de laquelle le jet est dévié. Avec l'avance du jet dans la matière, débute le processus de formation de la marche suivante. Ce changement de mode d'enlèvement de matière est caractérisé par l'apparition de stries sur la face de coupe, dont la profondeur est liée à l'angle de déflexion du jet.

#### IV.1.2. Modélisation de la découpe par jet d'eau abrasif

Le jet d'eau abrasif fait l'objet des travaux les plus nombreux de la communauté scientifique du jet d'eau. La modélisation de la découpe est également abordée, part des approches expérimentales et mathématiques. Elle vise à prévoir la profondeur de saignée, réalisée par le jet, ainsi que la qualité géométrique et micro-géométrique des surfaces obtenues.

Le modèle le plus connu est celui de Hashish [Has.(1987)] [Has.(1989)] pour lequel nous avons par ailleurs proposé à l'ENSAM des évolutions avec Latif [Lat.(1998)] et Ferrendier [Fer.(2001)], en y introduisant la composante évolutive de la granulométrie de l'abrasif.

Le modèle de Hashish s'appuie sur la théorie de Finnie [Fin.(1958)], qui a réalisé la première modélisation du mécanisme d'érosion des matériaux ductiles par impact de particules. Ce modèle a été repris par Bitter [Bit.(1963)], à l'occasion de travaux relatifs à l'étude de la détérioration de conduites industrielles. Il a fait évoluer le modèle de Finnie en intégrant le deuxième mode d'enlèvement de matière : la déformation plastique.

Son modèle prend en compte les caractéristiques physiques et géométriques de l'abrasif dans le calcul de la hauteur de coupe.

La décomposition du volume unitaire sous la forme d'une profondeur de pénétration et d'un déplacement lui permet de déterminer la profondeur de coupe pour chacun des modes d'enlèvement de matière (coupe  $h_c$  et déformation  $h_d$ ), comme représenté sur la figure suivante (Fig.2.4.).

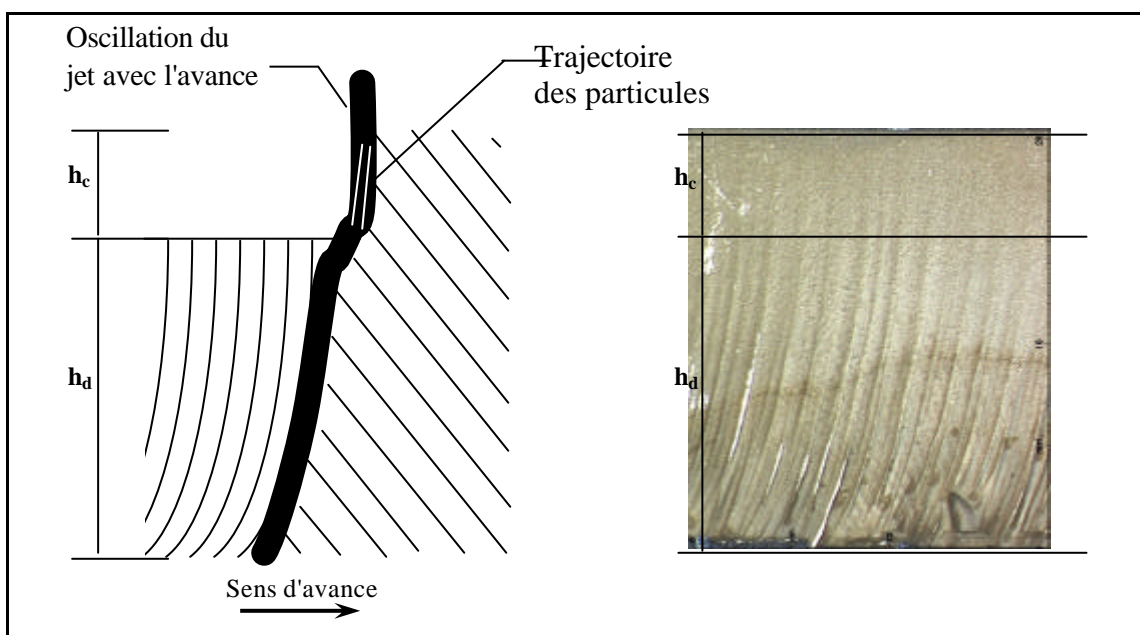


Fig.2.4. : Zones d'érosion correspondant aux modes de découpe(Ferrendier)

Le mode d'érosion par coupe apparaît pour de faibles angles d'impact.

Il s'agit d'un état stationnaire du jet, où le taux d'enlèvement de matière correspond au taux d'avancement du jet dans le matériau. La trajectoire du jet est sensiblement verticale jusqu'à une profondeur de coupe  $h_c$ .

Les faces de coupe ne présentent pas d'irrégularités de surface.

Le mode d'érosion par déformation apparaît pour des angles d'impact élevés.

Il s'agit d'un état instable du jet. Le jet oscille entre une verticale et une parallèle à la surface de la pièce jusqu'à une profondeur  $h_d$ . Le taux d'enlèvement de matière diminue avec la profondeur de pénétration jusqu'à devenir nul pour  $h_d$ .

Le diamètre du jet varie, provoque des instabilités, et favorise l'apparition de stries sur les faces de coupe caractéristiques de ce mode de découpe.

### **IV.1.3. Conclusion**

Les quelques éléments présentés ici permettent d'appréhender, de façon certes superficielle, les phénomènes physiques mis en œuvre lors d'un impact de particules abrasives sur une pièce, particules mises en vitesse et portées par un jet fluide. Les travaux de modélisation ont permis de décrire mathématiquement ces phénomènes, et de prévoir la profondeur de saignée, ce qui reste un résultat assez éloigné d'une application industrielle, puisque les opérations de découpe sont, par définition, débouchantes dans l'immense majorité des cas. Par contre, pour une opération d'usinage telle que nous l'avons décrite dans le premier chapitre, cette notion de profondeur de coupe retrouve toute sa signification.

Nous allons maintenant nous attacher, dans la suite de ce chapitre, à montrer que les phénomènes hydrauliques et mécaniques mis en jeu, lors de l'impact d'un jet fluide sur une surface, non pris en compte en jet d'eau abrasif car d'une influence très relative sur les matériaux concernés, sont complexes. Pour ce faire, nous présenterons les bases de ces phénomènes, en décrivant les travaux menés sur les interactions goutte / cible. De nombreuses études existent en effet sur ce thème. Elles sont liées à des situations rencontrées lors du décollage d'avions par temps de pluie, sur des aubes de turbomachines exposées aux intempéries ou encore lors de l'injection de carburant dans des moteurs à explosion. Les résultats obtenus se transposent malgré tout, de façon correcte, au cas d'un jet continu.

## IV.2. Phénoménologie de l'impact fluide

L'impact d'un fluide, dans notre cas liquide, sur un ensemble mécanique rigide, induit des phénomènes physiques complexes, en particulier liés aux grandes déformations qui en découlent.

Les premiers travaux semblent remonter à 1898, où le problème des impacts fluidiques a été posé par Joukowski, comme le relatent Rouse et Simon [Rou.Sim.(1963)]. Il a découvert le phénomène de surpression généré par des collisions fluidiques. La notion de « coup de bélier » est née à cette occasion. Cook [Cook(1928)] a repris ces travaux, en développant l'analyse de l'onde de compression produite lors de l'impact, génératrice du coup de bélier. Les bases jetées à cette occasion ont été approfondies beaucoup plus tard, par Bowden et Field [Bow.Fie.(1964)], puis par l'équipe de Brunton à plusieurs reprises [Bru.Cam.(1970)] [Bru.Roc.(1972)] [Bru.Roc.(1979)]. L'approche expérimentale mise en œuvre, en utilisant des caméras ultra rapides et des techniques d'analyse d'image, leur ont permis de visualiser l'évolution de la morphologie de la goutte de fluide. Ils n'ont pas directement étudié la déformation d'une goutte projetée sur une surface fixe, mais astucieusement inversé le problème en filmant les réactions d'une goutte de gel prise entre deux lames de verre, et soumise à l'impact latéral d'une pièce métallique (Fig. 2.5). L'objectif était de mettre en évidence le phénomène de cavitation à l'intérieur de la goutte. Il a également été possible d'observer à cette occasion le phénomène de « jetting », correspondant au premier écoulement latéral du jet, qui présente la spécificité d'avoir une vitesse supérieure à la vitesse d'impact. Cette vitesse varie avec la forme de la goutte, et correspond à une détente supersonique du fluide. Les limites de cette approche sont liées à la méthode expérimentale retenue, les 2 lames de verre limitant les phénomènes à un système bidimensionnel.

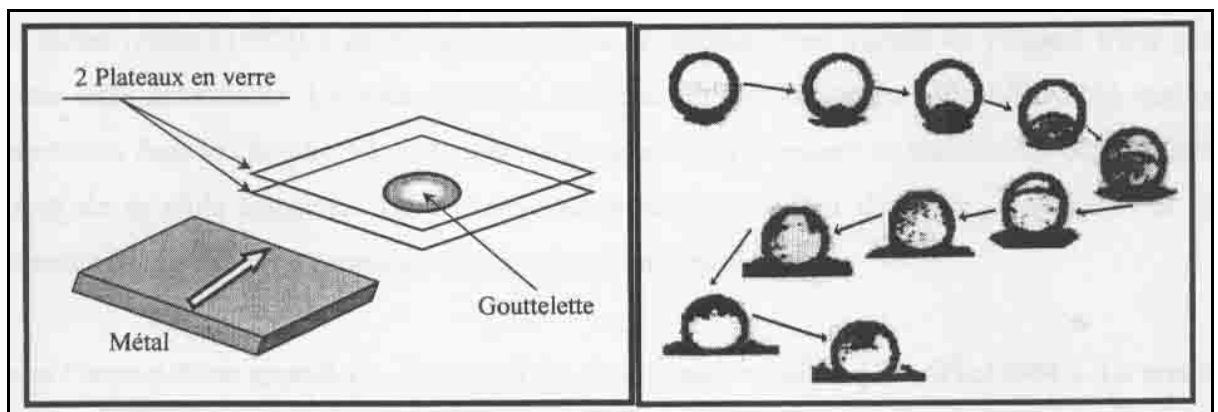


Fig. 2.5. Visualisation du phénomène de «jetting » [Men.Leu(1996)]

Les premiers travaux de modélisation d'impacts goutte / cible remontent à la même époque, lorsque Huang et al. [Hua.al.(1973)] ont simulé la collision d'un fluide sur un matériau rigide, en se basant sur une approche bi-dimensionnelle de la mécanique des fluides. Les hypothèses retenues étaient :

- Prise en compte de la compressibilité du fluide,
- Non formation de gaz ou de vapeur lors du choc,
- Forces liées au volume et de viscosité négligées,
- Tension de surface négligée.

Les résultats obtenus ont permis de faire apparaître le phénomène de cavitation dans la goutte (pressions inférieures à la pression atmosphérique), et d'évaluer la vitesse de « jetting » à 2 ou 3 fois la vitesse de l'impact.

Lesser [Less.(1981)] a développé un modèle géométrique acoustique pour calculer la pression liée à la détente supersonique.

La principale hypothèse retenue est la non variabilité de la vitesse des ondes de choc, ce qui induit l'absence de prise en compte de la compressibilité du fluide, nécessaire pour appliquer la théorie.

Les résultats de ce travail ont permis à Lesser de calculer la pression provoquée par une goutte, lors de son impact, sur une cible rigide mais aussi élastique.

Le Modèle tri-dimensionnel d'un choc goutte / cible déformable de Adler [Adler.(1995)] est beaucoup plus ambitieux, car il profite des méthodes de calcul de mécanique par éléments finis. Il a ainsi pu définir, de façon beaucoup plus précise que les auteurs précédents, la distribution des contraintes dans le matériau de la cible.

Tous ces travaux permettent d'affirmer que l'impact d'une goutte sur une cible se réalise en trois étapes bien distinctes [Bow.Fie.(1964)]. Ces trois étapes sont représentées Fig.2.6 :

-Etape 1 :

La goutte a un comportement compressible, ou la vitesse de l'interface liquide-solide progresse en se déplaçant à un régime supersonique. L'onde de choc se propage dans le liquide, mais il n'y a pas d'écoulement. La surpression engendrée à cette occasion s'écrit sous la forme suivante :

$$P = \rho_{0(f)} C_{0(f)} U_{0(f)} \quad (2.13)$$

Avec  $U_{0(f)}$  représentant la vitesse du fluide,  $C_{0(f)}$  la vitesse du son dans le fluide et  $\rho_{0(f)}$  la densité du fluide.

La vitesse périphérique de la goutte diminue ensuite et devient inférieure à la vitesse de propagation de l'onde de compression. L'évolution du rayon de l'interface liquide / solide, liée à cette réduction de vitesse, s'écrit d'après Bowden et Field [Bow.Fie.(1964)] :

$$R_s = \frac{U_{0(f)}}{C_{0(f)}} r_0 \quad (2.14)$$

avec  $r_0$  rayon initial du jet

Sa durée est :

$$t_s = \frac{R_s}{2C_{0(f)}} \quad (2.15)$$

-Etape 2 :

Le phénomène de «jetting» débute à la fin de la surpression. Une onde de détente, issue de l'interface goutte / cible, se propage vers le centre de l'impact, ce qui ramène la valeur de la pression derrière le front d'onde à un niveau dit de stagnation. Le temps de détente correspondant à cette période s'écrit alors :

$$t_d = \frac{R_s}{C_0} = 2t_s \quad (2.16)$$

La durée totale de mise en charge hydraulique est donc  $t_{sd} = 3t_s$

-Etape 3 :

Apparition du phénomène de cavitation dans la goutte.

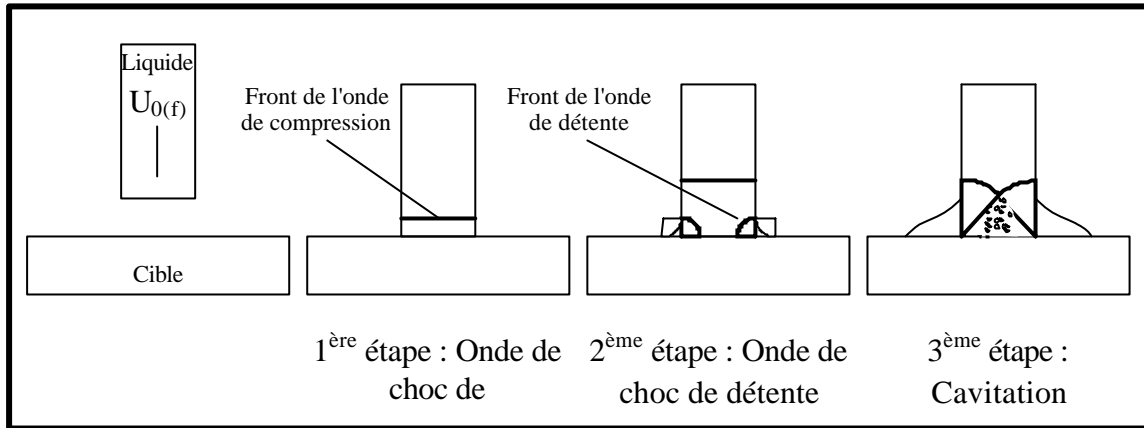


Fig.2.6.. Etapes de l'impact fluide [Bow.Fie.(1964)]

Du point de vue mécanique, Bowden et Field [Bow.Fie.(1964)] mettent en évidence la génération de trois types d'ondes :

-Onde surfacique dite de Rayleigh : Elle prend naissance à la périphérie de l'aire de contact avec le liquide, et se propage à la surface de la cible. Elle est très brutale et son effet est très destructeur. Nous verrons plus loin qu'elle est d'une grande importance dans les applications de décapage.

-Onde longitudinale dite de compression: Elle est peu destructive et prend naissance au niveau de la surface de contact avec le liquide et se propage dans la matière.

-Onde transversale. C'est une onde de cisaillement, également très intéressante pour le décapage.

Les ondes de Rayleigh et les ondes transversales, sont très proches du point de vue de leur développement (elles se déplacent pratiquement dans le même plan). De plus, leur vitesse de propagation est proche, puisque les auteurs considèrent que leur rapport  $\frac{V_R}{V_T}$  varie entre 0,8743 et 0,9554. Il est donc très difficile de les différencier dans leur action.

Bowden et Field [Bow.Fie.(1964)] ont montré expérimentalement que l'effet des ondes de Rayleigh se manifestait à l'extérieur de la surface impactée, par l'apparition de fissures circonférentielles, en particulier dans les matériaux fragiles.

La plupart de ces travaux ont été menés, non pas pour développer une modélisation de l'enlèvement de matière par projection de fluide, mais plutôt pour essayer de comprendre les phénomènes d'érosion rencontrés dans des systèmes mécaniques, phénomènes non voulus en l'occurrence. Cette érosion, provoquée par l'impact de gouttes ou par de la cavitation, a été abordée expérimentalement par de nombreux chercheurs.



La plupart d'entre eux ont utilisé le système expérimental de Brunton [Bow.Brun.(1961)], dont le principe est présenté ci-après Fig. 2.7 : l'eau est stockée dans un cylindre muni d'un piston. Ce piston est accéléré par la projection d'une masse sur sa surface. Il transfère ainsi à la masse liquide une quantité de mouvement qui génère alors l'éjection de l'eau du cylindre, sous forme d'un jet à haute énergie cinétique, qui va impacter à son tour la cible.

Il est possible de citer les travaux de Field et al. [Field et al.(1974)], Field et al. [Field. Et al.(1979)], Obara et al. [Obara. Et al.(1995)] et de Shi et Field [Shi.Field.(1997)] sur ce sujet.

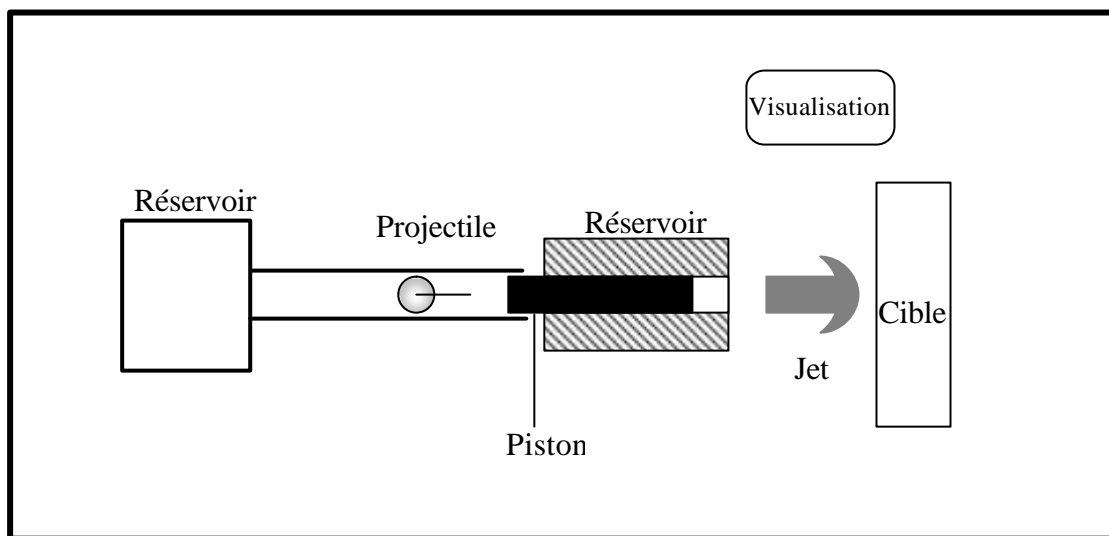


Fig.2.7. : Principe du système expérimental de Brunton

Field et al. [Field et al.(1974)] ont cherché à étudier la morphologie du jet juste avant l'impact, en utilisant le système présenté précédemment. Le jet, issu d'une buse de 0,8 mm, est projeté sur la cible. Il est entouré de micro-gouttelettes, sans action sur l'endommagement de la matière. La forme du front, globalement sphérique, permet aux auteurs de faire l'analogie avec l'action d'une goutte présentée précédemment. La distance de tir est de 10 mm, de façon à travailler avec une vitesse d'impact égale à la vitesse d'éjection, celle-ci diminuant rapidement au bout de 30 mm avec ce type de montage expérimental.

L'impact du jet de 1,6 mm de diamètre, projeté sur une plaque de Polyméthyl-Métacrylate (PMMA) à 750 m / s, est filmé grâce à une technique ombroscopique permettant d'obtenir un cliché toutes les microsecondes. Le résultat visualisé (Fig. 2.8.), permet de mettre en évidence différentes zones sollicitées par la charge hydrodynamique, avec leurs délimitations :

- zone  $a$  : secteur perturbé par le choc généré par l'air entraîné,
- zone  $s$  : front de cisaillement,
- zone  $d$  : secteur de cisaillement.

Il apparaît une fissuration annulaire principale en  $o$  et il est possible de distinguer :

- $r$  l'onde choc réfléchi par l'air,
- $c$  l'impulsion de contrainte principale de largeur  $w$
- $h$  l'onde de compression.

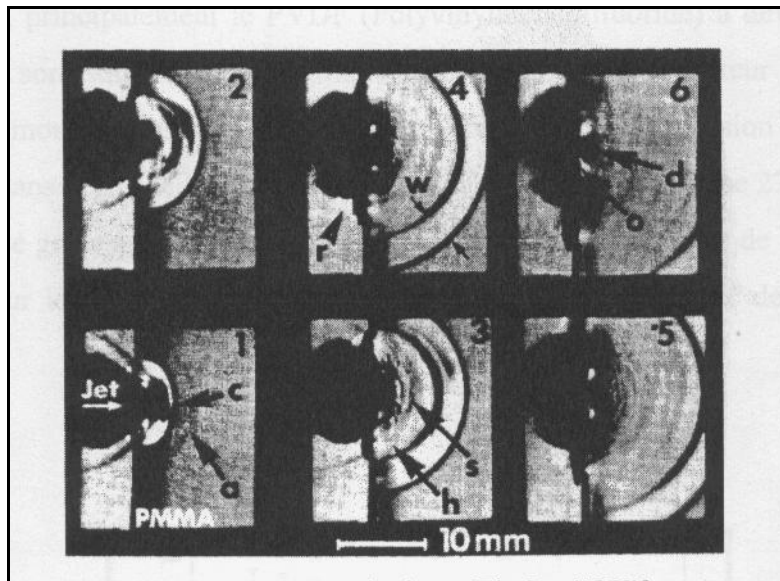


Fig. 2.8 : Photographie d'impact jet / plaque PMMA [Field.Gor..(1979)]

Shi et al [Shi.et al.(1995)] ont utilisé une autre méthode de visualisation de l'impact, en utilisant les propriétés de certains matériaux plastiques, comme le Polyvinilidenedifluoride (PVDF) qui se charge électriquement, lorsqu'ils sont soumis à des contraintes mécaniques. Ce capteur de pression est placé sur un montage expérimental de type « Brunton », et est soumis à l'impact d'une colonne d'eau de diamètre 2,8 mm projetée à 270 m / s. Il a ainsi été possible de mesurer l'évolution de la pression d'impact en fonction de la distance de tir. Les résultats obtenus sont représentés Fig. 2.9. page suivante.

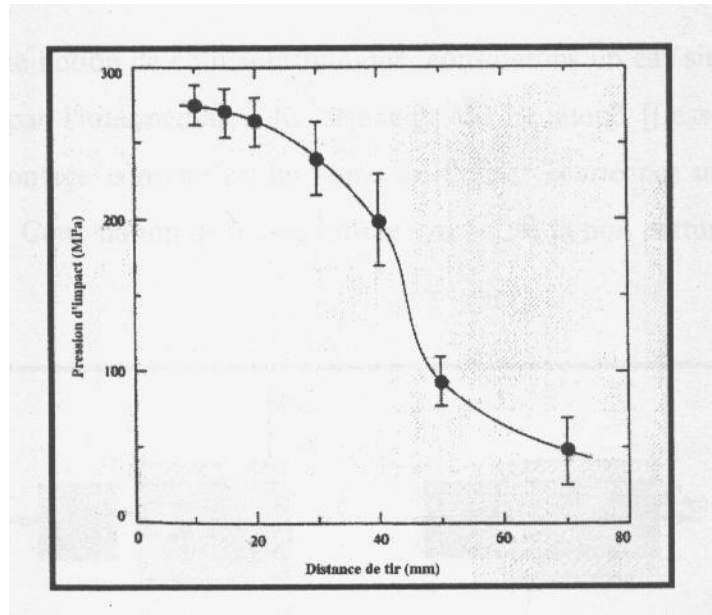


Fig. 2.9. : Variation de la pression d'impact en fonction de la distance de tir  
[Shi.Tak.(1995)]

Il apparaît assez clairement, à la vue de cette rapide revue bibliographique, que l'action d'un jet fluide sur une cible est complexe et évolutive dans le temps. Il ressort en effet de tous les travaux, que les premiers instants de l'impact sont très importants, car les surpressions mises en jeu et la propagation du train d'ondes (de Rayleigh en particulier), qui en découlent, ont un effet d'initialisation de l'endommagement de la matière fondamentale pour la suite de sa destruction. Il apparaît, dans ce cas, judicieux d'exploiter ceci dans nos applications, en proposant des temps d'interaction très courts entre le jet et une surface élémentaire de notre pièce, d'où l'intérêt de têtes rotatives à grande vitesse de rotation.

Des travaux, avec pour objectif l'optimisation d'application de décapage d'un dépôt sur un substrat, ont été menés en reprenant la phénoménologie présentée précédemment. La présentation des résultats obtenus fait l'objet du paragraphe suivant.

### IV.3. Modélisation des interactions jet fluide / cible

Nous avons vu, dans le cadre du chapitre I, que les applications de démantèlement, et plus généralement d'enlèvement de matière, objets de notre travail, utilisaient souvent les mêmes outils que ceux du décapage, en particulier des têtes multi-jets rotatives à buses cylindriques. Il est donc logique de s'intéresser aux divers travaux menés en décapage.

Ceux-ci ne sont en réalité pas très nombreux et tous très récents, dans la mesure où le décapage est une application nouvelle du jet d'eau. Leu et al. [Leu. Men.(1998)], ainsi que Men. et al. [Men. Ges.(1998)], ont développé des modèles d'enlèvement de matière. Ils seront présentés dans notre document, de même que ceux de Mabrouki [Mab.(2000)] qui a développé une approche originale du décapage par voie expérimentale, puis une modélisation de l'érosion fluide de l'ensemble dépôt / substrat par éléments finis.

Il est possible de citer par ailleurs les travaux de Wu et Kim [Wu. Kim.(1995)], ainsi que ceux de Louis et Schikorr [Lou. Sch.(1982)], qui ont mené des approches expérimentales et phénoménologiques, de façon à évaluer l'influence des différents paramètres du procédé.

#### IV.3.1. Modèle de Leu et al.

Ce premier modèle, développé par Leu et al. [Leu. Men.(1998)], est issu d'une étude expérimentale et analytique du décapage par un jet d'eau immobile (pas de déplacement de la buse H.P.). Il prend comme base, du point de vue écoulement fluide, les résultats des travaux de Yanaida et Ohashi [Yan. Oha.(1978)] déjà présentés précédemment. La représentation de l'action du fluide sur le système substrat + dépôt, appliqué au cas du décapage, se schématise alors de la façon suivante (fig.2.10.) :

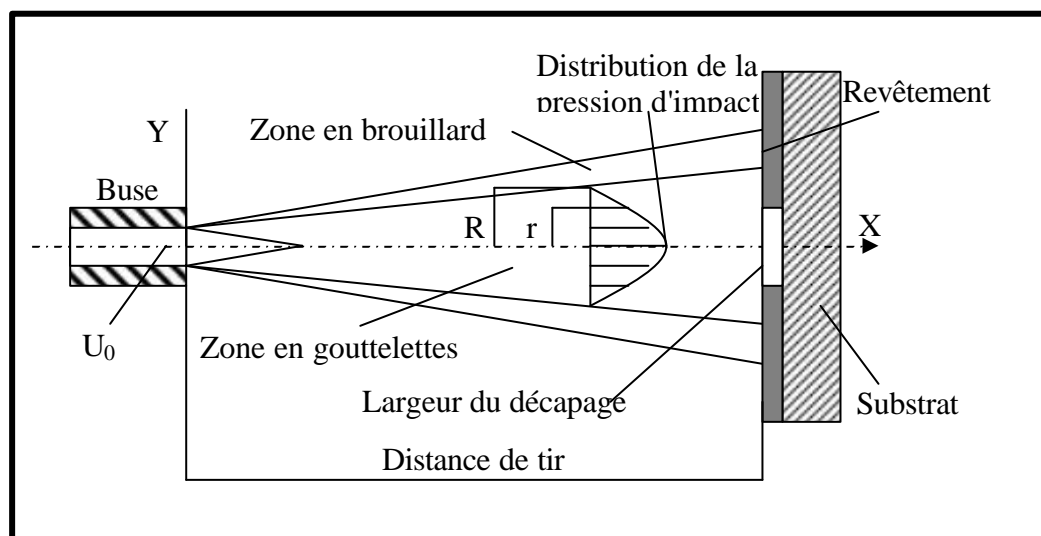


Fig.2.10.. Représentation de l'action d'un jet fluide sur une pièce

En utilisant l'équation formulée par Abramovich [Abra.(1963)], il est possible d'écrire le débit massique de l'eau dans la zone eau/ air (gouttelettes), de la façon suivante :

$$\frac{\dot{m}}{\dot{m}_m} = (1 - \mathbf{v}^{1,5})^3 \quad \text{où} \quad \mathbf{v} = \frac{r}{R} \quad (2.17)$$

Avec :

$\dot{m}$  : Débit massique (gouttelettes) en un point d'une section du jet,

$\dot{m}_m$  : Débit massique (gouttelettes) dans une section considérée du jet,

$\mathbf{v}$  : Distance (grandeur adimensionnelle),

$r$  : Distance entre le centre du jet et le point considéré de la section du jet,

$R$  : Rayon de la zone air / eau du jet

En appliquant le principe de la conservation des masses dans chaque section du jet, les auteurs obtiennent :

$$\dot{m}_0 \mathbf{p} r_0^2 = 2\mathbf{p} \int_0^r \dot{m} r dr = 2\mathbf{p} \dot{m}_m \int_0^{\frac{r}{R}} \frac{\dot{m}}{\dot{m}_m} r dr \quad (2.18)$$

Avec :

$\dot{m}_0 = \mathbf{r}_0 U_0$  : débit massique à la sortie de la buse,

$\mathbf{r}_0$  : masse volumique de l'eau,

$r_0$  : rayon de la buse.

Leu et al. écrivent alors la variation radiale du débit massique, dans une section de la partie bi-phasique du jet (gouttelettes), sous la forme suivante :

$$\dot{m}_m = 5,62 \dot{m}_0 \left( \frac{r_0^2}{R^2} \right) \quad (2.19)$$

Les essais de décapage menés à l'occasion de leur étude, ont permis à Leu et al. de mettre en évidence que deux paramètres principaux avaient une influence sur la largeur d'action du jet, lorsque l'on faisait varier la distance de tir :

- La structure du jet (liée à la buse), qui croît linéairement avec la distance de tir,
- La pression d'impact, qui décroît avec la distance.

Ceci corrobore bien les premiers travaux menés en 1996 [Men.Leu.(1996)], où il avait été montré qu'il existe une distance critique, à partir de laquelle la pression d'impact est trop faible pour que le matériau soit endommagé. Pour calculer cette distance critique, les auteurs ont repris les résultats d'études présentés dans le paragraphe précédent, en identifiant le jet à un ensemble de gouttes heurtant une cible fixe. La surpression ainsi générée s'écrit

$$P = r_{0(f)} C_{0(f)} U_{0(f)}$$

Cette écriture de la surpression correspond à des cibles mono-matériau. Pour intégrer la notion de décapage d'un ensemble dépôt+substrat, Leu et al. utilisent l'approche de Springer [Sprin.(1976)] qui amène dans l'équation un coefficient correcteur  $I_{c_0}$  qui dépend de :

- La dimension de la goutte,
- L'épaisseur du revêtement,
- Les densités des matériaux et du fluide,
- Les vitesses du son dans chacun de ces éléments.

L'hypothèse retenue, quant au processus d'enlèvement de matière, est celle d'une mise en contrainte du matériau par impacts dynamiques successifs. Le phénomène de fatigue, qui en découle, induit après «quelques » cycles la destruction de la cible au niveau de sa surface impactée.

La théorie de la fatigue en flexion et torsion a été retenue pour le calcul d'un tel endommagement par Thiruvengadam [Thiru.(1967)] et Springer [Sprin.(1976)]. Men et al. l'utilisent pour l'écriture de leur modèle de calcul de la largeur décapée par un jet stationnaire. Ils considèrent que le revêtement est détruit lorsque la contrainte dynamique obtenue est supérieure à la contrainte limite de résistance à la rupture du dépôt, ce qui s'écrit :

$$I_{c_0} \dot{m} C_0 \geq R_r \tag{2.20}$$

Où :

$R_r$  : contrainte limite de rupture du revêtement,

$\dot{m}$  : débit massique de goutte par unité de surface.

On notera que la prise en compte de l'aspect bi-matériaux n'est réalisée que par le biais d'un coefficient expérimental  $I_{c_0}$ , dépendant de la dimension de la goutte, de l'épaisseur du revêtement, des masses volumiques et des vitesses respectives de propagation du son de chacun des matériaux.

En aucun cas les mécanismes d'endommagement n'intègrent cette composante, et la contrainte limite de rupture retenue est celle du revêtement seul. Les liaisons mécaniques inter-faciales substrat / revêtement ne sont pas du tout abordées.

Men et al. Calculent alors assez facilement la distance de tir critique, à partir de laquelle il n'y a plus de décapage, ainsi que la largeur décapée en fonction de cette même distance de tir.

La distance de tir critique s'écrit alors avec (2.1), (2.13), (2.19), 2.20)

$$d_c = 2,82 \left( \frac{I_{c0} C_0 k_p}{R_r} \right)^{0,5} \left( \frac{r_0}{c_{ev}} \right) (P_0 r_0)^{0,25} \quad (2.21)$$

Avec :

$k_p$  : Coefficient de perte de charge [Mon.Kov. (1998)]

$c_{ev}$  : Coefficient d'évasement du jet [Yan.Oha.(1978)]

Pour une distance de tir inférieure à cette distance critique, la largeur de décapage vérifie l'équation suivante, en utilisant (2.17), (2.19), (2.20) :

$$\left( 1 - \left( \frac{w}{2c_{ev} X} \right)^{1,5} \right)^3 \frac{U_0 r_0^2}{c_{ev}^2 X^2} = \frac{R_r}{5,62 I_{c0} r_0 C_0} \quad (2.22)$$

Avec  $r = \frac{w}{2}$ ,  $w$  étant la largeur de l'empreinte du jet sur le dépôt,

$X$  étant la distance de tir.

D'autres auteurs, Meng et al. [Meng.Ges.(1998)] ont repris par la suite les travaux de Leu et al., qui traitent d'un jet stationnaire, pour y intégrer une composante déplacement de la tête de décapage, représentée par une vitesse d'avance  $Va$ . Le jet d'eau est toujours assimilé à un jet de gouttelettes. Dans cette approche, comme pour le modèle précédent, l'aspect « bi-matériau » de la cible n'est pas directement pris en compte puisque les auteurs retiennent comme seuil de destruction du dépôt sa seule résistance limite à la rupture par fatigue, sans intégrer les forces de liaison inter-matériaux.

### IV.3.2. Modèle de Mabrouki

Les travaux de Mabrouki [Mab.(2000)] ont eu pour objectif de :

- Intégrer la composante «bi-matériau» de l'ensemble dépôt +substrat en explorant de façon expérimentale les phénomènes de décapage au niveau de la liaison inter-matériau,
- Mettre en place une modélisation numérique par élément finis de l'interaction jet fluide / cible revêtue, par l'intermédiaire du code de calcul LS-DYNA.

L'approche expérimentale a été menée avec deux types de peintures :

- une résine époxydique déposée sur un substrat acier,
- une peinture aéronautique (Primaire P 99 (9  $\mu\text{m}$ ), PAC33(24 $\mu\text{m}$ )),a base de polyuréthane, déposée sur un alliage d'aluminium 2024 T3 d'épaisseur 1 mm, ayant préalablement subi une oxydation anodique chromique de protection.

Le montage expérimental, qui sera présenté au chapitre III car il a été repris pour notre étude, nous a permis d'étudier l'action d'un jet, fixe ou mobile, par rapport à la pièce, avec différents temps d'interaction avec la cible.

Les résultats obtenus permettent de bien mettre en évidence la zone de stagnation de l'eau, lors de son impact sur une pièce, comme déjà présenté auparavant, puisque l'on voit apparaître un bossage au centre de l'impact, comme illustré sur la photo suivante (Fig.2.11).

Ce bossage se détruit au fur et à mesure que le temps d'exposition augmente. L'érosion circulaire est due à l'important effort tangentiel de cisaillement provoqué par le jet.

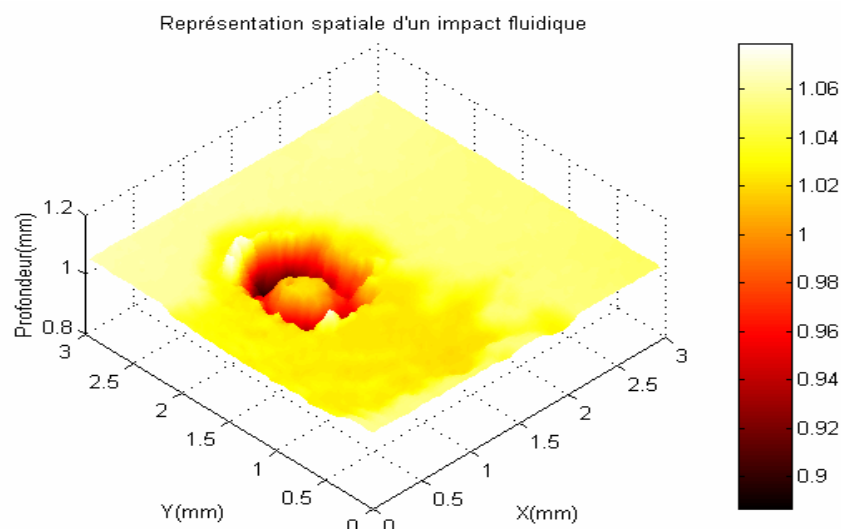


Fig.2.11. : Relevé tridimensionnel d'un impact sur un substrat 2024T3 revêtu [Mab.(2000)]



Ces essais, statiques comme dynamiques, ont également permis de faire apparaître dans le revêtement des fissures radiales par rapport à l'axe du jet. Celles-ci sont probablement dues :

- A l'onde de choc qui apparaît au moment du premier impact,
- A l'évacuation latérale du fluide en régime permanent, qui crée des tensions radiales favorisant le développement des fissures initiées lors du premier choc. (Fig.2.12) et (Fig.2.13).

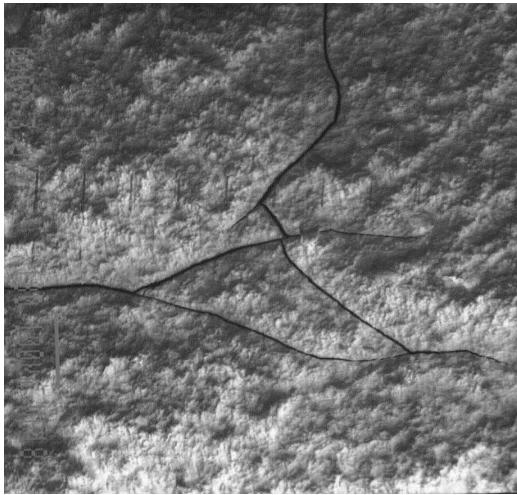


Fig.2.12. : fissuration radiale en statique  
(thèse Mabrouki)

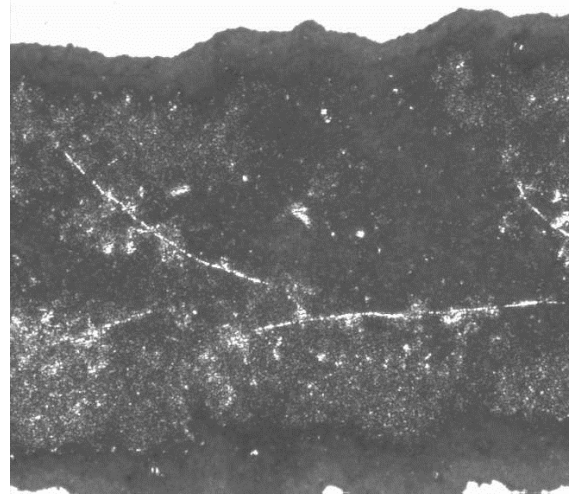


Fig.2.13. Fissuration radiale en dynamique  
(thèse Mabrouki)

Dans certains cas, des bourrelets apparaissent sur les bords de la surface impactée, résultats de la déformation plastique de matériaux ductiles sous l'action du jet [Mab.Cor.(2000)].

Les travaux de modélisation, effectués sous LS-DYNA, ont permis d'aboutir aux mêmes types de résultats, malgré les diverses hypothèses restrictives utilisées :

- Interface parfaite,
- Pas de modèle de turbulence du jet,
- Enlèvement de la matière basé sur un critère d'allongement à la rupture des mailles.

Au niveau de l'impact, l'enlèvement de matière est réalisé par déformation plastique du revêtement, évidemment lié aux caractéristiques de l'interface. L'écoulement latéral crée ensuite un effet de tension radiale, qui provoque l'endommagement du dépôt. Une pénétration hydraulique (micro-jets) de l'eau, dans les fissures ainsi générées, favorise alors le décollement de la matière.

Les résultats obtenus sont illustrés dans les schémas suivants (Fig. 2.12.).

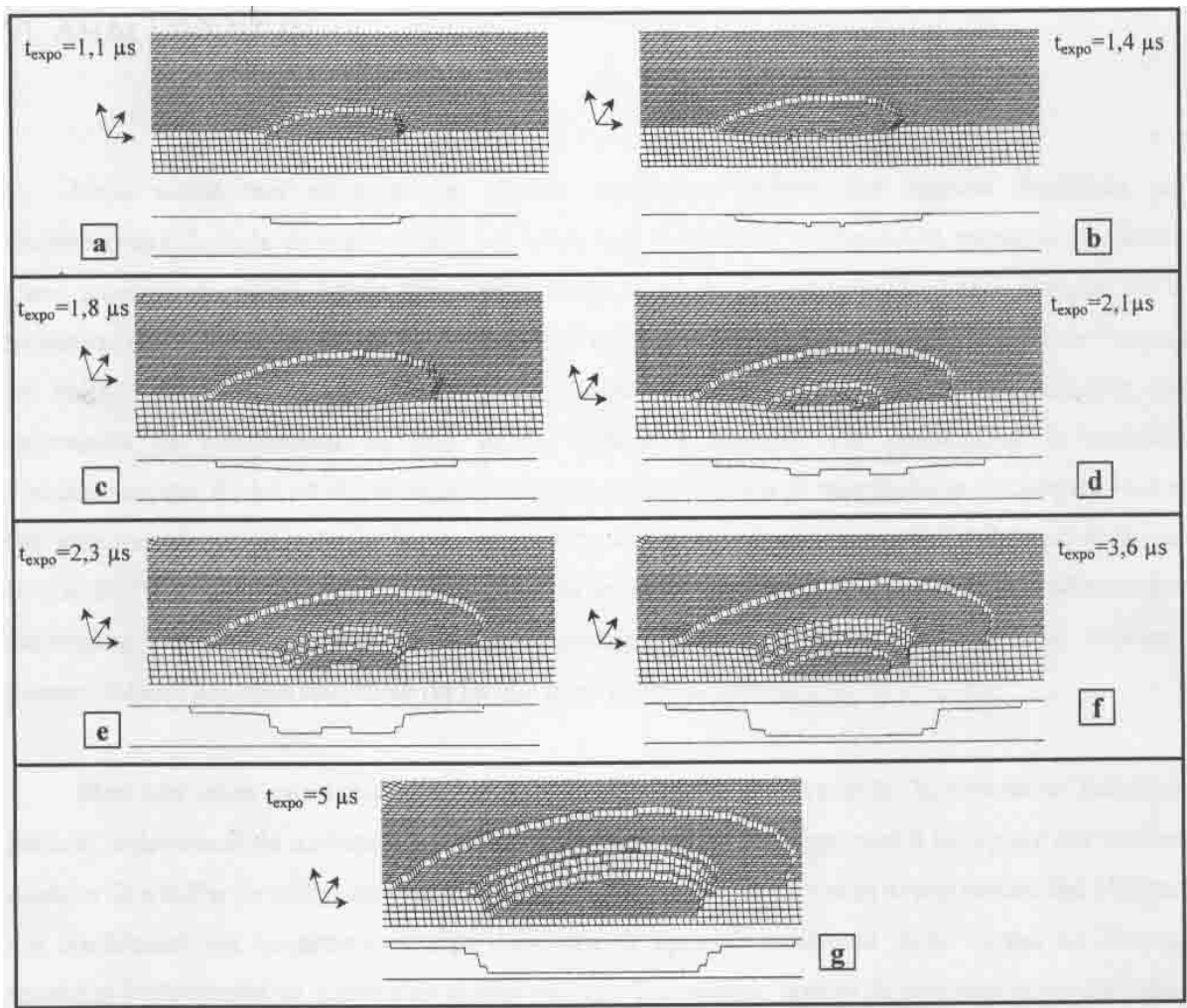


Fig.2.12. Evolution morphologique d'un impact sous l'action d'un jet d'eau [Mab.(2000)]

### IV.3.3. Conclusion intermédiaire

Les travaux, présentés dans la première partie de ce chapitre, montrent la spécificité des écoulements fluides et de leur action sur une cible lors de l'impact. Les études menées ont permis d'établir nos connaissances sur la structure de ces jets, ainsi que sur les mécanismes d'érosion qu'ils entraînent sur la matière. Elles restent par contre positionnées au niveau des mécanismes de base de l'interaction matériau / procédé. Certaines avancées se dessinent quant à leur utilisation pour la compréhension de la phénoménologie du décapage.

La découpe de matériaux épais, application de base du jet d'eau, relève de ces mêmes mécanismes, mais à une échelle plus « macroscopique ». Les travaux, présentés dans le paragraphe suivant, vont permettre de faire le point sur les connaissances développées à ce sujet, et sur la transcription qui peut en être faite pour les opérations d'usinage.

#### IV.4. Etude de la découpe par jet d'eau pure

Bien que le procédé ait été développé à l'origine dans cette configuration, l'injection d'abrasif n'apparaissant que 10 à 15 ans plus tard, les travaux concernant l'eau pure sont moins nombreux que pour l'autre cas. Certaines études existent tout de même, dans le secteur minier entre autres. Elles ont permis de mettre en place un certain nombre de modèles prédictifs. Ils vont être, pour certains d'entre eux, détaillés dans la suite de ce paragraphe.

##### IV.4.1. Principe de la découpe à l'eau pure

Le jet, pour une application de découpe, est généralement positionné verticalement, et dirigé sur la surface de la pièce à découper. La buse générant ce jet est animée d'un mouvement d'avance, de vitesse  $U$ , ce qui nous permet de creuser une saignée de profondeur et de largeur variant avec les paramètres machine, vitesse d'avance, pression et diamètre de la buse principalement. Le front de coupe se présente sous la forme d'une surface en arc de cercle, le jet s'inclinant vers l'arrière dans la matière, suivant un angle de plus en plus marqué lorsqu'il s'enfonce dans le matériau (Fig. 2.13.).

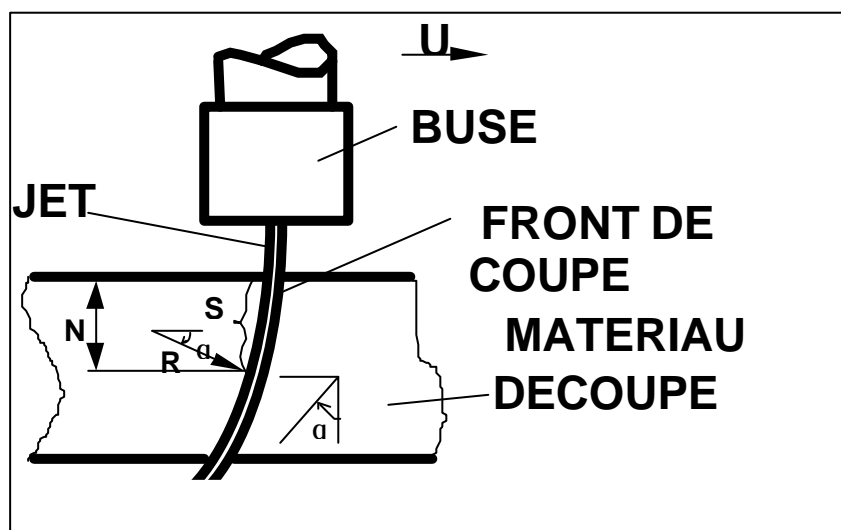


Fig.2.13. : Principe de la découpe par jet d'eau pure

Le résultat obtenu après découpe, pour la paroi de la saignée, est une surface comportant des stries inclinées, plus ou moins marquées et inclinées, selon la sévérité des conditions de coupe. Ceci est illustré dans la photo 2.1., pour une pièce en caoutchouc découpée en deux, sur toute son épaisseur, et présentée comme « un livre ouvert » pour les besoins de l'illustration. La découpe « débouchante » présentée ici est le cas industriel le plus classique, car elle permet la meilleure qualité de surface des pièces découpées. Les cas de coupes non débouchantes n'existent que pour l'extraction minière, mais l'usinage, tel que nous le décrivons ici, s'en rapproche sensiblement.

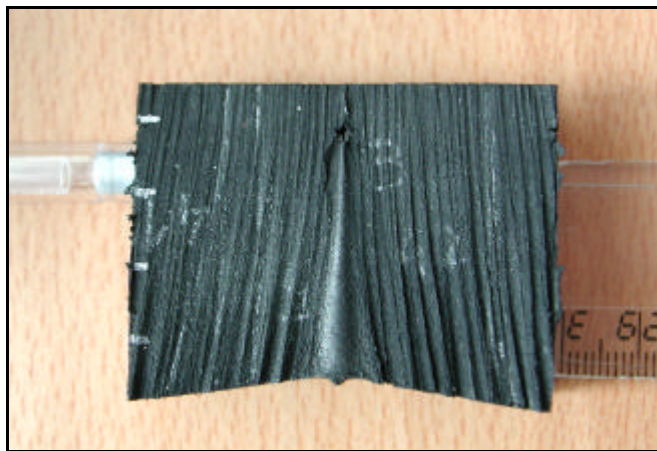


Photo.2.1. : surface découpée par jet d'eau H.P.

De nombreuses études expérimentales ont permis, en particulier dans l'industrie minière, de mettre en place des modèles empiriques de calcul de la profondeur de saignée. Nous pouvons noter au passage ceux de Zelenin et al. [Zel.et al.(1958)], Hood et al.[Hood.(1990)], ainsi que Summers [Sum.(1990)]. Tous ont tenté de calculer la profondeur découpée en fonction de la pression, du débit d'eau ou du diamètre de buse, de la vitesse d'avance et des caractéristiques du matériau. Ces modèles intègrent le plus souvent de nombreux coefficients expérimentaux.

L'objectif des travaux présentés ci-après a été de mettre en place des modèles prédictifs théoriques de profondeur de découpe. Ces modèles peuvent être classés en deux grandes familles [Gor.(1997)], qui se différencient par les hypothèses retenues pour la géométrie du front de découpe et son évolution au cours de la découpe, évolution génératrice des stries présentées juste au dessus.

#### IV.4.2. Première famille de modèles

Les hypothèses retenues pour le développement de ces modèles, au niveau du front de coupe, sont liées à la représentation de celui-ci par une succession de paliers perpendiculaires à l'axe du jet, tel que représenté Fig. 2.14.

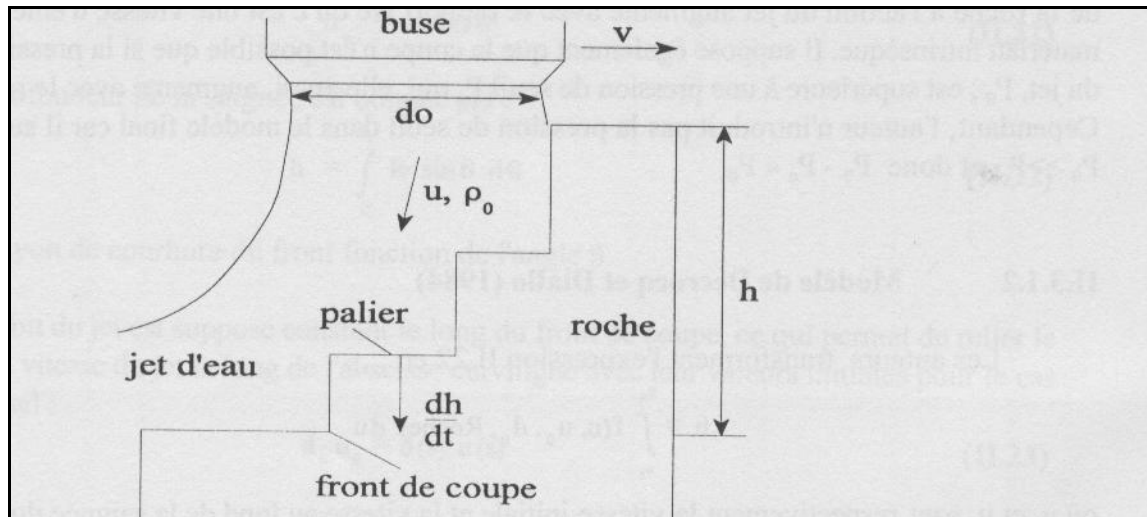


Fig.2.14. : Hypothèses de représentation du front de coupe [Gor.(1997)]

##### IV.4.2.1. Modèle de Rehbinder

Rehbinder [Rehb.(1976)] et [Rehb.(1977)], par une approche expérimentale, propose une loi de variation de la pression dynamique du jet en fonction de la profondeur atteinte. Celle-ci s'écrit :

$$P(h) = P_0 e^{-\beta \frac{h}{D}} \quad (2.23)$$

Avec  $D$  largeur de saignée et  $\beta$  un coefficient expérimental.

L'auteur considère que le creusement de la saignée se produit tant que la pression du jet est supérieure à une certaine pression de seuil  $P_s$  spécifique au matériau, ce qui donne :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{kP(h)}{f\mu g} \quad \text{si } P(h) > P_s \quad (2.24)$$

Avec  $k$  et  $f$  perméabilité et porosité du matériau,  $\mu$  viscosité dynamique de l'eau et  $g$  le diamètre moyen des grains. Il s'agit donc d'un modèle totalement dédié à l'étude des roches.

Hlavac et Vasek [Hlav.Vas.(1992)] proposent une approche énergétique en exprimant la profondeur découpée comme étant le rapport entre l'énergie dépensée par le jet, notée  $E_d$  par unité de surface de la saignée et la résistance de la roche  $s$ . Ceci prend alors la forme :

$$h = \frac{E_d}{lvt} \cdot \frac{1}{s} \quad (2.25)$$

Avec  $l$  largeur de saignée,  $v$  vitesse d'avance et  $t$  temps de découpe.

En introduisant un coefficient de perte d'énergie, supposé constant, pour un matériau et un jet donné, afin de calculer l'énergie résiduelle à fur et à mesure du creusement de la saignée, et en considérant que la vitesse du jet libre décroît avec la distance de la buse selon une fonction exponentielle, on obtient la profondeur finale de découpe comme étant proportionnelle à la vitesse initiale du jet  $V^3$ . Cette profondeur s'écrit, de façon simplifiée et pour un fluide considéré comme incompressible :

$$h = K \frac{\rho^{1/2} r_0 u_0^3}{4 s} T_{\text{exp}} \quad (2.26)$$

Où  $K$  est un coefficient constant,  $s$  la résistance du matériau et  $T_{\text{exp}}$ . Le temps d'exposition.

Ce temps d'exposition est défini à partir d'une fonction liant le diamètre de la buse et sa vitesse d'avance, intégrant de multiples coefficients empiriques.

Ces deux modèles, présentés très succinctement, sont dédiés aux matériaux minéraux et donc peu applicables à la problématique qui nous intéresse ici. Le modèle suivant est plus généraliste.

#### IV.4.2.2. Modèle de Hashish

Hashish [Has.(1977)] [Has.(1979)] a retenu la même démarche pour la modélisation du front de coupe, avec comme hypothèse que la vitesse de creusement de la matière est proportionnelle à la contrainte normale  $s_{n(h)}$  appliquée par le jet sur le front de coupe. Contrairement aux deux modèles précédents, il introduit une notion de seuil en dessous duquel le jet n'a pas d'action. Ce seuil correspond à la résistance à la rupture en compression du matériau.

La relation entre profondeur atteinte et contrainte s'écrit donc :

$$\frac{dh}{dt} = \frac{1}{h} (\mathbf{s}_n(h) - R_c) \text{ lorsque } \mathbf{s}_n(h) > R_c \quad (2.27)$$

Avec :

- $R_c$  la résistance à la rupture en compression
- $h$  un coefficient d'amortissement du matériau.

L'hypothèse de décroissance linéaire de la contrainte normale en fonction de la profondeur atteinte, à cause du frottement de l'eau sur les bords de la saignée, nécessite le calcul de cette contrainte. Ceci est réalisé en modélisant l'effort appliqué par le jet par une force constante appliquée sur une plaque. A cette force on soustrait la composante de frottement, qui s'accroît avec la profondeur.

$$F_{mech} = rA_1V_0^2 - C_f \sqrt{A_c} hV_0^2 \quad (2.28)$$

Où

- $A_1 = 2pr_0h$  surface de la zone de frottement jet / matière en entrée de découpe
- $A_c = pr_c^2$  surface de coupe au niveau du palier

Il est alors possible de calculer la contrainte, en rapportant la force résultante à l'aire de la section du contact horizontal entre le jet et la matière ( $A_c$ ), section que Hashish considère comme indépendante de la profondeur et égale à la surface de la section de la buse. Cette hypothèse amène comme particularité dans les calculs que la contrainte normale initiale est deux fois plus élevée que la pression initiale du jet.

La contrainte s'écrit alors :

$$\mathbf{s}_n(h) = 2P_0 \left( 1 - \frac{2C_f}{\sqrt{p}d_0} h \right) \quad (2.29)$$

Avec :

- $P_0$  pression initiale du jet,
- $C_f$  Coefficient de frottement déterminé expérimentalement,
- $d_0$  diamètre de la buse.

Les hypothèses, considérées par l'auteur, permettent de montrer que la contrainte normale sur le front de coupe, et donc par la même occasion la vitesse de creusement  $\dot{h}$  de la matière, sont directement proportionnels à la vitesse du jet  $u$ , qui décroît comme déjà évoqué avec la profondeur de saignée  $h$ , soit :

$$F_{mech} - s_n A_c = h A_c \dot{h} \quad (2.30)$$

Or nous avons :

$$s_n(h) = r_0 u_0 u(h) \quad (2.31)$$

En utilisant (2.28), (2.31) et en résolvant (2.30), il est possible d'obtenir :

$$h = \frac{r A_1 V_1^2 - s_n A_1}{\frac{\sqrt{p}}{2} C_f r d_0 V_0^2} \left[ 1 - e^{-(2C_f r V_0^2 / h \sqrt{p} d_0) t} \right] \quad (2.32)$$

En considérant que  $t = d_0 / u$

Nous obtenons finalement :

$$h = \frac{\sqrt{p}}{2} \frac{d_0}{C_f} \left( 1 - \frac{R_c}{2P_0} \right) \left( 1 - e^{-\frac{4C_f P_0}{\sqrt{p} h v}} \right) \quad (2.33)$$

#### IV.4.3. Deuxième famille de modèles

Les hypothèses retenues pour le développement de ces modèles, au niveau du front de coupe, sont liées à la représentation de celui-ci par une courbe curviligne et stationnaire par rapport à la buse, tel que représenté Fig. 2.15.



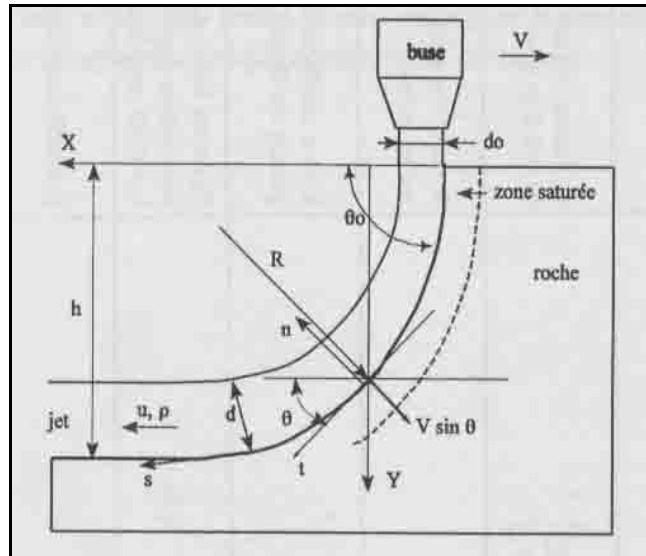


Fig.2.15. : Hypothèses de représentation du front de coupe [Gor.(1997)]

La vitesse de déplacement horizontal de chaque point du front est donc, dans notre cas, égale à la vitesse de translation de la buse. La vitesse d'enlèvement du matériau est donnée par la composante de la vitesse de translation  $v$ , normale à la surface du front au point considéré, soit  $u_m = v \sin q$

La profondeur de la saignée s'écrit :

$$h = \int_0^{q_0} R \sin q dq \quad (2.34)$$

Avec  $R$  rayon de courbure du front en fonction de  $q$

Si l'on admet que le débit du jet est constant sur tout le front de coupe, il est possible de mettre en relation le diamètre et la vitesse du jet le long de l'abscisse curviligne avec leurs valeurs initiales. Ceci donne :

$$d_0 u_0 = d(s) u(s) \quad (2.35)$$

Plusieurs modèles tels que ceux de Crow [Crow(1973)] [Crow(1974)], ou celui de Decroq et Diallo [Dec.Dia.(1984)] proposent une mise en équation de la profondeur de saignée, en fonction des paramètres procédé et matériau. Ils sont le plus souvent dédiés à des applications de découpe dans les roches et minéraux et donc assez éloignés de notre problématique.

Celui de Wilkins et Graham [Wil.Gra.(1993)] est plus intéressant pour nous, car plus généraliste dans son approche, et appliqué lors de son développement au néoprène. Ce cas se rapproche du domaine du démantèlement de pneumatiques automobiles (caoutchouc). Il est également basé sur une représentation curviligne du front de coupe.

#### IV.4.3.1. Modèle de Wilkins et Graham

Le modèle de mécanisme de découpe est illustré dans les figures 2.16. et 2.17. Le jet, en n'importe quel point, se déplace à travers une trajectoire déviée. Le rayon varie avec la distance parcourue  $S$ .

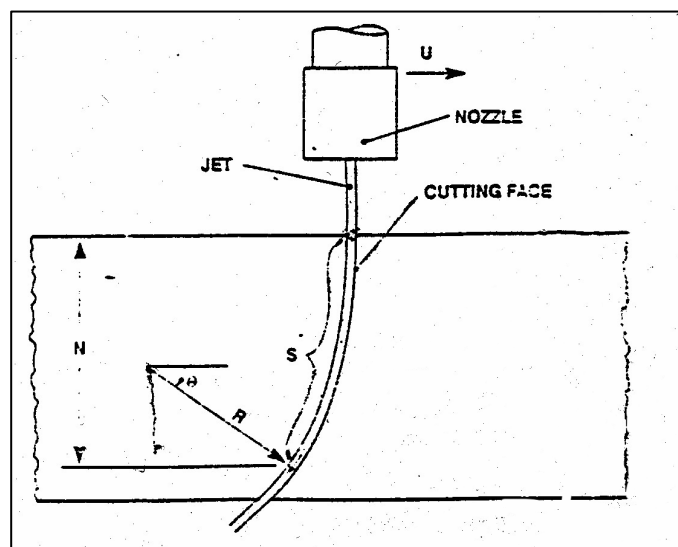


Fig. 2.16. : Schématisation du processus de coupe [Wil.Gra.(1993)]

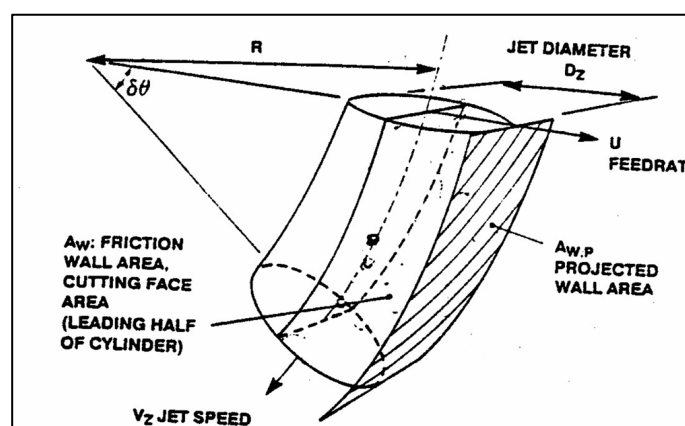


Fig.2.17. : Représentation de l'action de l'élément fluide dans le processus de découpe [Wil.Gra.(1993)]

Wilkins et Graham formulent mathématiquement leur modélisation de la façon suivante en écrivant la force de friction F sous la forme :

$$F = -C_f A_w \left(\frac{1}{2}\right) \rho V_z^2 \quad (2.36)$$

avec :

- $C_f$  : Coefficient de frottement à déterminer expérimentalement,
- $V_z$  : Vitesse du jet,
- $A_w$  : Surface de frottement (surface de coupe par rapport à un élément fluide).

$A_w$  s'écrit :

$$A_w = \frac{\rho D_z}{2} R(dq) \quad (2.37)$$

La masse de l'élément fluide considéré s'exprime de la façon suivante :

$$m = \frac{\rho D_z^2 R(dq) r}{4} \quad (2.38)$$

En remplaçant dans l'équation (2.36) et en appliquant le principe fondamental de la dynamique on trouve :

$$\frac{-C_f \rho D_z}{2} \frac{R(dq) r V_z^2}{2} = \frac{\rho D_z^2 R(dq) r}{4} \frac{dV_z}{dt} \quad (2.39)$$

Il en découle :

$$\frac{-dV_z}{dt} = C_f \frac{V_z^2}{D_z} \quad (2.40)$$

La masse étant supposée constante, elle est définie par l'équation (2.38) qui aboutie à une constante comme résultat.

En appliquant le principe de la conservation du flux entre la sortie de la buse et le matériau on a :  $V_0 A_0 = V_z A_z$  ce qui permet d'écrire :

Avec  $V_0$  vitesse initiale du jet,  $A_0$  section initiale du jet et  $A_z$  section du jet au point considéré.

$$V_0 D_0^2 = V_z D_z^2 \quad (2.41)$$

On obtient alors :

$$D_z = \left( \frac{V_0}{V_z} \right)^{1/2} D_0 \quad (2.42)$$

En remplaçant dans l'équation (2.39) on obtient :

$$-\frac{dV_z}{dt} = \frac{C_f V_z^2}{D_0} \left( \frac{V_0}{V_z} \right)^{-1/2} \quad (2.43)$$

La résolution de cette équation différentielle avec  $V=V_0$  et  $s=0$ , permet d'obtenir :

$$V_z = V_0 \left( \frac{C_f s}{2D_0} + 1 \right)^{-2} \quad (2.44)$$

La projection de la surface  $A_w$  est donnée par :

$$A_{w,p} = R(dq) D_z \quad (2.45)$$

Utilisant l'équation d'un mouvement circulaire, on peut déduire la force vue dans la face de coupe (force normale) :

$$F_{w,p} = \frac{m V_z^2}{R} = \frac{\rho D_z^2 r V_z^2}{4R} \quad (2.46)$$

En considérant l'élément de fluide retenu, il est possible de déterminer la contrainte locale appliquée sur la matière :

$$s = \frac{F_{w,p}}{A_{w,p}} = \frac{m V_z^2}{A_{w,p} R} = \frac{\rho D_z r V_z^2}{4R} \quad (2.47)$$

Il est nécessaire de caractériser la relation entre temps et déformation du matériau. Le modèle est basé sur la proportionnalité entre la contrainte normale, le rayon d'érosion sur la face de coupe et la vitesse locale du jet. Puisque la contrainte est normale à la face de coupe en n'importe quel point, la déformation dans la direction des contraintes est donnée par le ratio  $\frac{dR}{dt}$ .

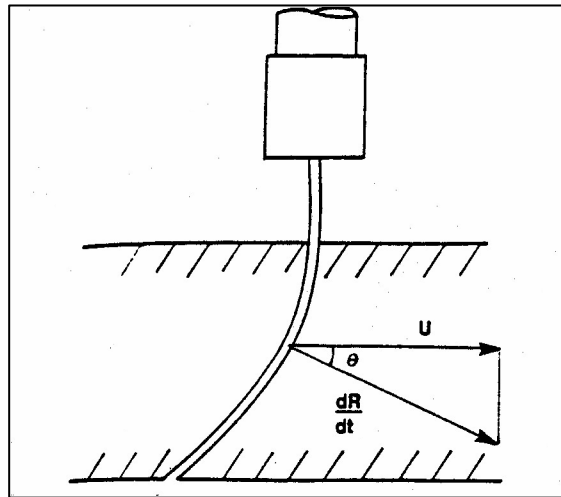


Fig.2.18. : relation entre l'angle de déviation et le rayon de courbure

A  $q=0^\circ$  la contrainte est maximale.

A  $q = 90^\circ$  la contrainte est minimale.

La contrainte est liée à la déformation par l'équation suivante :

$$\frac{dR}{dt} = \frac{sV_z}{x} \tag{2.48}$$

Avec :

$x$ : constante empirique liant le niveau de contrainte de déformation de la surface coupée à la vitesse du fluide(  $Nm^{-2}$  ) et :

$$\frac{u}{\cos q} = \frac{sV_z}{x} \tag{2.49}$$

En substituant (2.38), (2.42), et (2.46) dans (2.45) on obtient :

$$\frac{xu}{\cos q} - \frac{pD_0 rV_0^3}{4R} \left( \frac{1}{\frac{C_f s}{2D_0} + 1} \right)^5 \quad (2.50)$$

Le rayon de courbure s'exprimant sous la forme  $\frac{ds}{dq}$  avec  $q$  en radians, l'équation précédente devient :

$$\frac{4(C_f s + 1)^5}{2D_0} \frac{xuds}{\cos q} = pD_0 rV_0^3 dq \quad (2.51)$$

En intégrant cette équation différentielle entre 0 et  $q$  puis entre 0 et  $s$ , on trouve finalement :

$$\sin q = \frac{4xu}{3prV_0^3 C_f} \left( \frac{C_f s}{2D_0} + 1 \right)^6 \quad (2.52)$$

Ce qui permet d'obtenir la profondeur de saignée pour  $\alpha=90^\circ$

$$S = \frac{2D_0}{C_f} \frac{3pV_0^3 C_f \cos \alpha^3}{4xu} - 1 \quad (2.53)$$

#### IV.4.4. Discussion

Les modèles de découpe présentés sont tous fondés sur quelques hypothèses principales relatives à :

- La cinématique du front de coupe et la prise en compte du temps d'exposition,
- La vitesse d'enlèvement du matériau et la prise en compte d'une valeur de seuil,
- La contrainte de frottement sur la surface du front.

Les auteurs envisagent deux cinématiques d'évolution du front différentes :

-La première où chaque point du front se déplace dans le sens du mouvement d'avance de la buse avec la même vitesse. Le temps d'exposition est alors défini par la loi d'évolution de la vitesse du jet, mais n'apparaît pas explicitement,

-La seconde où chaque point se déplace dans le sens perpendiculaire au mouvement d'avance, avec une vitesse décroissant avec la profondeur. Le temps d'exposition est alors défini explicitement.

Dans tous les cas, la vitesse d'enlèvement de la matière, en un point donné, varie avec la vitesse du jet et la pression de seuil caractéristique du matériau.

La plupart des modèles développés en eau pure l'on été pour des applications dans le secteur minier (extraction de roches), soit pour des matériaux fragiles, assez éloignés, du point de vue caractéristiques mécaniques, de ceux, ductiles, envisagés pour nos développements. De plus, ces modèles font appel le plus souvent à des coefficients expérimentaux obtenus pour ces matériaux. Il est donc à craindre que ces modèles soient inadaptés à notre champ d'application. Seul le modèle de Graham et Wilkins semble envisageable directement pour notre étude, car il présente l'avantage d'avoir été développé à partir de travaux menés dans du néoprène, proche du caoutchouc des pneumatiques, support industriel de notre projet. Nous retiendrons donc, en premier choix, ce modèle, sous réserve qu'il soit validé, lors de nos premières expérimentations. Cette validation sera abordée dans le chapitre suivant.

## **V. CONCLUSION GENERALE**

Cette revue bibliographique, assez large, a permis de dresser dans le chapitre précédent un panorama des travaux menés dans le domaine du démantèlement, et plus généralement de l'enlèvement de matière par jet d'eau, que ce soit par le biais de la découpe, du décapage ou en destruction de volumes importants de matière. Dans les deux derniers cas, il est utilisé le plus souvent des têtes multi-jets rotatives. Nous avons ainsi pu identifier un certain nombre d'applications, et constater que les études menées sont le plus souvent préliminaires, et réalisées à titre exploratoire par voie expérimentale. Il n'existe pas de modèles d'enlèvement de matière en usinage par jet d'eau pure, d'où l'intérêt de poursuivre notre étude dans ce sens.

Il devient ainsi nécessaire d'analyser les différentes actions menées en jet d'eau HP permettant de :

- Comprendre les mécanismes d'interaction eau / Matière,
- Analyser les études menées en décapage en vue de la modélisation, les modèles s'appuyant directement sur les mécanismes cités précédemment
- Etudier les modèles prédictifs d'enlèvement de matière développés pour la découpe.

Nous avons pu nous rendre compte que les travaux ne sont pas très nombreux dans ce domaine, bien que notre bibliographie ne revendique pas d'être totalement exhaustive. Il apparaît malgré tout, au travers de cette étude, deux voies possibles d'exploration :

- Utiliser les démarches mises en place en décapage pour les généraliser au traitement de surfaces importantes sur de grandes profondeurs,
- Utiliser un modèle de découpe et l'appliquer au démantèlement en considérant, pour une tête rotative, que l'enlèvement de matière est issu d'une multitude d'opérations de découpe, réalisées avec des buses dont les trajectoires se couvrent et se recoupent avec des pas suffisamment fins pour que la matière puisse se séparer de la structure de la pièce sous forme de fins copeaux.

La première approche pose à priori de nombreux problèmes, car passer de l'impact d'une goutte à celle d'un jet continu fixe puis mobile, selon différentes trajectoires, semble être très voire trop ambitieux. Les travaux les plus avancés sont ceux de Mabrouki, mais l'utilisation de méthodes de calcul par éléments finis se heurte aux limites de puissance actuelles des ordinateurs. Plusieurs heures de calcul informatique étaient déjà nécessaires pour calculer l'érosion d'une surface exposée pendant une fraction de seconde. De plus, la prise en compte dans ce cadre de l'évolution de la surface lors du passage suivant du jet, ajoute encore à la complexité du travail.

La deuxième approche, en utilisant un modèle de calcul analytique, comme support de développement semble plus réaliste, sous réserve de :



-Vérifier jusqu'à quel point ce sont réellement des mécanismes de découpe qui sont mis en jeu,

-Identifier le mode de séparation des copeaux générés par les découpes successives de la structure du produit traité.

Le chapitre suivant est dédié à la présentation de l'approche expérimentale retenue pour explorer cette problématique et amener des éléments de réponse aux deux interrogations mentionnées ci-dessus.

## **CHAPITRE 3. APPROCHE EXPERIMENTALE DU DEMANTELEMENT PAR JET D'EAU H.P.**

### **I. INTRODUCTION**

Le jet d'eau permet, comme nous l'avons vu, de broyer sélectivement des produits en fin de vie, en particulier ceux comportant au moins deux matériaux intimement liés, tels que béton armé, pièces métalliques surmoulées par polymères,... Dans ce cadre, l'application du procédé au broyage de pneumatiques automobiles paraît tout à fait envisageable mais nous avons vu qu'il convient de dissocier la problématique «enlèvement de matière » de celle, spécifique à l'application, de «séparation» des deux constituants (Cf. Introduction du mémoire). Nous aborderons donc, dans ce chapitre, uniquement le premier volet, avec pour objectif de :

-Présenter les résultats exploratoires obtenus pour l'usinage par tête multi-jets rotative. L'objectif applicatif industriel étant le broyage de pneumatique, afin de fabriquer de la poudre de caoutchouc, nous avons fait le choix de travailler sur des échantillons de caoutchouc naturel noir, tirés d'une plaque de 1 m<sup>2</sup>, d'épaisseur 25 mm et de dureté 65 Shores. La vocation de cette première étape sera de cerner l'influence des paramètres de réglage (pression, débit d'eau, avance, ...) sur le débit de matière obtenu et le profil usiné, ainsi que d'essayer d'appréhender les phénomènes conduisant à un enlèvement de matière sur une forte section. Une étude approfondie de l'application pneus sera par ailleurs présentée dans le chapitre 5.

-Mettre en place une démarche expérimentale permettant d'étudier, de manière fine, l'action d'un jet d'eau sur ce caoutchouc naturel, de façon à comprendre les mécanismes mis en jeu, lors de l'exposition du matériau à l'action d'une buse multi-jets rotative. Ceci est une étape importante avant la modélisation de l'enlèvement de matière.

## **II. ETUDE EXPLORATOIRE**

### **II.1. Installation utilisée**

Les moyens mis en œuvre sont une pompe 4000 bars - 4,5l/min, originellement dédiée à des applications de découpe. Elle alimente une tête rotative permettant de tourner jusqu'à 1300 tr/min, équipée de buses de diamètre 0.15mm à 0.5mm, dont le nombre varie de 4 à 7, selon les équipements disponibles au laboratoire (Photo.3.1).

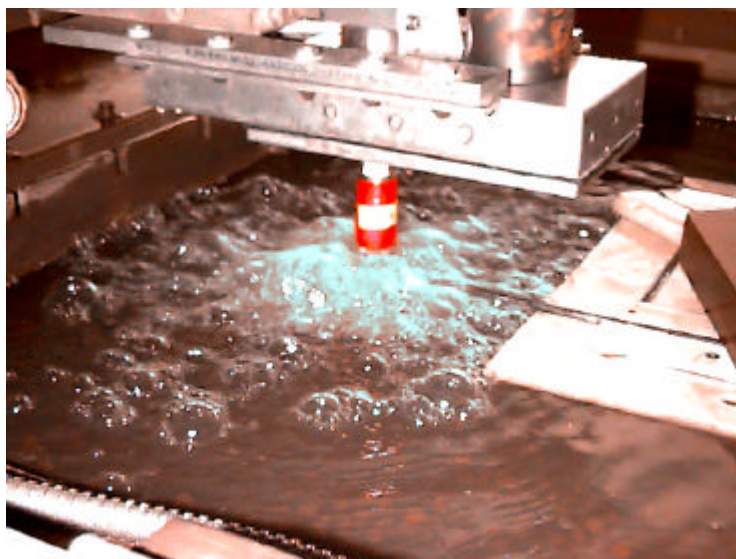


Photo. 3.1. : Tête rotative 4 jets à entraînement hydraulique (ENSAM)

L'ensemble est monté sur une machine à Commande Numérique 3 axes, ce qui permet ainsi de régler la distance de tir, ainsi que contrôler le mouvement dans un plan horizontal XY. L'installation est représentée sur la photo suivante (Photo. 3.2.).

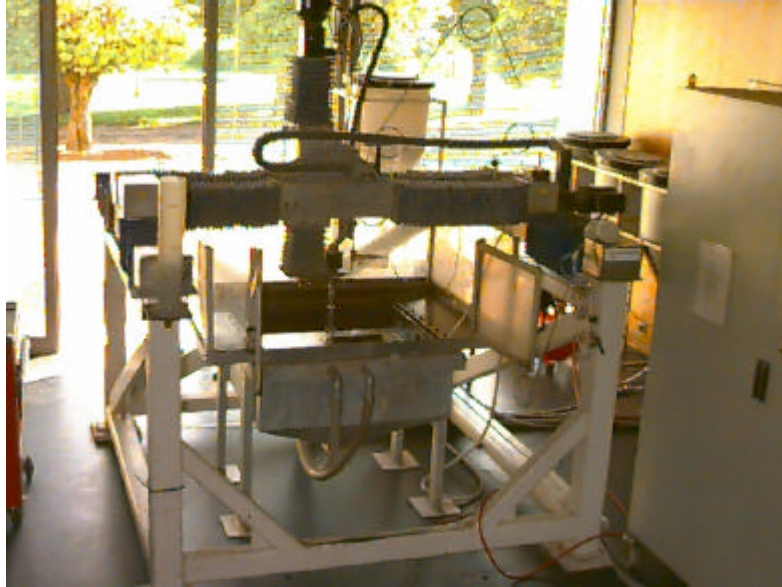


Photo.3.2. : Installation jet d'eau H.P. de l'ENSAM

Les principaux paramètres réglables sont :

- La pression de la pompe,
- Le diamètre de buses (ce qui règle le débit) et leur nombre,
- La vitesse de rotation de la tête,
- La distance de tir,
- La vitesse d'avance en déplacement de la tête.

Les principales mesures réalisables sont les suivantes :

- Géométrie de la saignée,
- Profondeur de la saignée,
- Largeur de la saignée,
- Granulométrie de la poudrette obtenue,
- Masse de la poudrette obtenue.

### II.1.1. Première exploration

De façon à évaluer de façon précise l'influence relative des paramètres du procédé, nous avons décidé de traiter les résultats par une approche de plans d'expériences (méthode Tagushi), qui permet de modéliser de façon assez précise un procédé sans faire un nombre d'essais trop important. Le choix d'un plan fractionnaire parmi le plan factoriel permet, sous certaines conditions, une approche statistique correcte de l'influence de chacun des paramètres. Cette approche est assez souvent utilisée industriellement. Elle donne de bons résultats, dans la mesure où ce procédé mécanique est suffisamment connu, en découpe, pour ne pas recéler de paramètres non maîtrisés ni d'interactions entre eux. Notre cas relevant d'une problématique un peu différente (usinage), nous serons amené à prendre quelques précautions quant à cette absence supposée d'interactions.

Nous allons mettre en place un modèle expérimental permettant d'étudier l'influence de la pression, du diamètre de buses, et de la vitesse d'avance, du nombre de buses et de la vitesse de rotation de la tête, sur la profondeur de saignée et le volume de matière enlevée. Les résultats relatifs à la poudrette obtenue (masse, granulométrie), trop difficiles à collecter, seront laissés de côté pour le moment. Le nombre de niveau d'essais pour chaque paramètre est fixé à deux. Ce plan d'expérience peut être représenté sous la forme du diagramme d'Ishikawa suivant (Fig. 3.1.) :

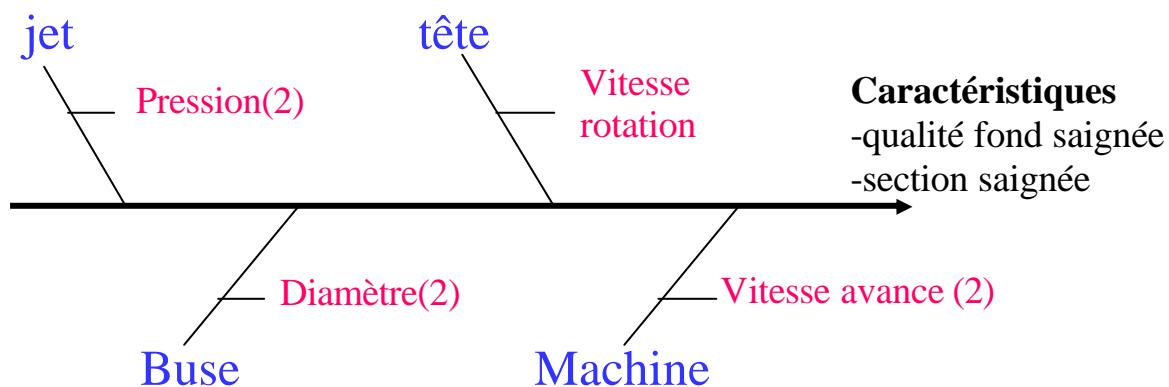


Fig. 3.1. : Diagramme d'Ishikawa du plan d'expériences

Les mesures des caractéristiques ont été réalisées suivant 2 critères :

-La section de matière enlevée (en  $\text{mm}^2$ ), calculée à partir de la profondeur maxi atteinte (en mm), obtenue sur les bords de la saignée, de part les effets de bord spécifiques à la plupart des buses rotatives et 4 autres mesures de profondeur, dont la profondeur moyenne au centre de la saignée. Ceci est mesuré en appuyant une lame horizontale de 10 mm de large, perpendiculairement au sens du mouvement d'avance, de façon à légèrement écraser les filaments de caoutchouc restant accrochés à l'échantillon,

-La qualité géométrique du fond de la saignée, mesurée de façon qualitative, avec un classement allant de 0, pour une surface encombrée de copeaux adhérents de caoutchouc sur une forte épaisseur, à 4 pour les meilleurs résultats.

Cette approche, et les moyens de mesure mis en œuvre, ne permettent pas d'assurer une précision de mesure inférieure à 0,5 mm.

Le type de saignée obtenue est illustré dans la figure (3.2.) ci-après, avec une qualité estimée pour ce cas de 2 :

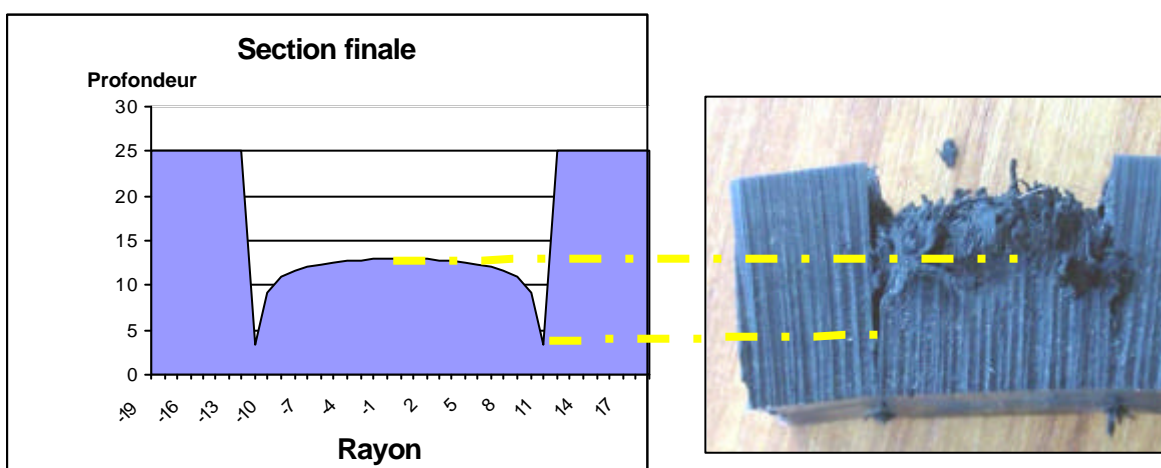


Fig.3.2. : section d'une saignée réalisée par tête rotative à 4 buses

La définition d'un plan orthogonal, avec ces choix de paramètres, nous impose une série de 8 essais (L8). Ces essais et résultats afférents sont structurés et représentés de la façon suivante (Tab. 3.1.). Le nombre de passage sur une unité de surface de la matière étant fonction du couplage V.rotation tête / V.avance, nous avons intégré une éventuelle interaction entre ces deux paramètres. L'expérience industrielle que nous avons, pour ce type de procédé mécanique, n'ayant jamais fait apparaître ce genre de phénomène, ceci est plus envisagé à titre de précaution que sur la base d'une réelle suspicion.

N° essai	Diamètre Buse (mm)	V.rotation tête (trs/min)	Pression (bars)	Vitesse d'avance (mm/min)	Qualité fond saignée	Sections saignées (mm <sup>2</sup> )
1	0,1	600	2400	750	1	91,2
2	0,1	600	2400	1500	2	39,6
3	0,1	1200	3000	750	3	149,2
4	0,1	1200	3000	1500	4	71,6
5	0,2	600	3000	750	4	281,6
6	0,2	600	3000	1500	4	103,2
7	0,2	1200	2400	750	4	241,6
8	0,2	1200	2400	1500	3	125,2

Tab. 3.1. : Tableau orthogonal structuré du plan d'expériences

Les essais ont été répétés 2 fois, mais il n'apparaît pas de différence, mesurables avec nos moyens, significatives entre chaque série d'essais.

Les photos sont présentées en annexe 1.

La moyenne arithmétique des résultats est de 137,9 mm<sup>2</sup> pour les sections et de 3,12 pour la section de matière enlevée.

Les résultats obtenus sont suffisamment variés pour justifier du choix des valeurs de paramètres, bien que les résultats de l'essai 2 soient très limités du point de vue enlèvement de matière. Ceci rend difficile l'évaluation de la qualité du fond de saignée, dans la mesure où il n'y a pratiquement pas d'endommagement dans la partie centrale.

### III.1.2. Analyse des résultats :

Le tableau 3.2a. page suivante fait apparaître l'analyse statistique du plan expérimental tendant à prouver un assez bon niveau de fiabilité du plan. Il n'apparaît pas d'interaction.

Les facteurs influents sont :

-La vitesse d'avance (43 %), ce qui est logique

-Le diamètre de buse (38 %)

La pression semble beaucoup moins influente avec un niveau de confiance réduit (65%). Ceci est beaucoup plus surprenant mais il faut remarquer que la plage de variation retenue est étroite (2500-3000). Nous avons limité à 3000 bars pour des raisons de fiabilité de la tête et retenu 2500 bars comme pression «charnière » atteignable par les 2 technologies de pompe HP existant sur le marché mais ce choix nous pénalise au niveau de l'analyse.

De même, la vitesse de rotation de la tête semble sans influence.

	Paramètre	Contribution (%)	Probabilité de F(%)	F	Regroupé
1	Vitesse de rotation				X
2	Vitesse d'avance	43,1	98,6	17,3	
3	interaction				X
4	Diamètre	38,1	98,3	15,4	
5	pression	0,3	65	1,1	
	Erreur	18,5			

Tab.3.2.a : Contribution des différents paramètres sur la section

Nous pouvons faire les mêmes remarques générales pour l'analyse des résultats (Tab.3.2.b) concernant la qualité du fond de saignée (fiabilité statistique et absence d'interaction).

	Paramètre	Contribution (%)	Probabilité de F(%)	F	Regroupé
1	Vitesse de rotation	8,5	84,2	3	
2	Vitesse d'avance				X
3	interaction				X
4	Diamètre	31,0	95,5	8,3	
5	pression	31,0	95,5	8,3	
	Erreur	29,6			

Tab.3.2.b : Contribution des différents paramètres sur la qualité

Les paramètres influents sont :

- La pression (31%)
- Le diamètre de buse (31 %)
- La vitesse de rotation, dans une moindre mesure (8,5 %) et avec un niveau de confiance réduit.

L'erreur globale est plus importante mais la notation (qualitative) de cette caractéristique est plus subjective et même assez relative avec l'essai 2, comme déjà évoqué précédemment.

La vitesse d'avance semble sans influence, ce qui est plus surprenant.



Le graphe des effets (Fig.3.3.) permet de visualiser l'influence de chaque paramètre sur les deux caractéristiques. Il propose un optimum logique, qui consiste à maximiser la pression, le diamètre de buse, la vitesse de rotation de la tête et de réduire la vitesse d'avance pour avoir la saignée la plus profonde possible. Le compromis section saignée / surface de fond de bonne qualité l'amène à proposer une vitesse d'avance intermédiaire entre les deux bornes.

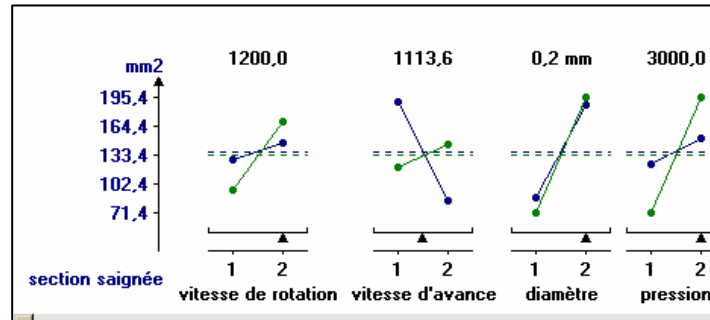


Fig. 3.3. : Graphe des effets

De façon à confirmer et valider le modèle, un essai est réalisé « hors plan » de façon à comparer résultat expérimental et résultat calculé. La combinaison retenue pour ceci est :

- Pression : 3000 bars
- Vitesse d'avance : 1114 mm / min,
- vitesse de rotation : 1200 trs / min,
- Diamètre de buse 0,2 mm.

Le résultat d'essai donne une section de saignée de : 85 mm<sup>2</sup>

Le résultat estimé par calcul nous donne : 91,4 mm<sup>2</sup> de section soit une erreur inférieure à 10 %, ce qui est tout à fait correct pour un procédé de production.

Pour la qualité de fond de saignée, le résultat d'essai donne une qualité de 4

Le résultat estimé par calcul nous donne : 4,7 ; ce qui est correct vu notre mode d'évaluation peu discriminant.

### II.2.1. Synthèse et limites

Les essais ont permis de tirer certaines premières conclusions du point de vue des paramètres influents :

- Les paramètres ayant une forte influence sur les performances d'usinage, contrairement à la vitesse de rotation de la tête de découpe sont :

- La vitesse d'avance,
- Le diamètre des buses,
- La vitesse de rotation de la tête et la pression, surtout pour la qualité, mais dans une moindre mesure.

Nous avons présenté les raisons probables de la faible influence de la pression, mais il reste des points d'interrogation quant à celle de la vitesse de rotation, dont l'influence est fondamentale sur la densité de passage des jets sur une unité de surface de la matière. Cette densité est également couplée à la vitesse d'avance. Par contre, la vitesse linéaire d'exposition de la matière à un jet est directement liée à cette vitesse de rotation, qui donne des vitesses circonférentielles élevées au niveau de buses, d'où une action coupante de chaque jet très réduite. Nous avons donc opposition entre densité de passage sur la matière et profondeur atteinte en ces différents points par chaque jet. C'est cet aspect que nous allons plus précisément explorer dans la suite de notre travail.

Cette première série d'essais se révèle ainsi fort instructive et encourageante. La production de poudrette est envisageable par cette technologie et il apparaît clairement que la performance d'enlèvement de matière varie fortement avec les différents paramètres du procédé. La sensibilité aux réglages est donc importante. Il est maintenant nécessaire, si nous voulons prédire la performance de démantèlement en terme de débit de matière, d'étudier plus finement les mécanismes physiques mis en jeu.

## **II.2. Mise en évidence de la problématique**

De façon à appréhender au mieux l'action d'une tête multi-jets rotative, il paraît nécessaire, dans un premier temps, de visualiser l'action des différents jets pour les paramètres les plus influents. Dans la mesure où l'enlèvement de matière semble en partie issu d'un nombre de passages répétés des jets sur la matière, nous introduirons ce paramètre en distinguant des fronts « montant » et « descendant » qui seront explicités plus loin.

Nous avons également choisi de travailler avec le même type de tête pour tous les essais. Il s'agit du même ensemble à quatre buses que précédemment, positionnées sur différents diamètres, dont le plus élevé est 20 mm.

La largeur de saignée obtenue par un tel équipement, pour une distance de tir de 20 mm est de l'ordre de 25 mm, puisque nous verrons plus loin, en caractérisant la géométrie de la tête, que les buses sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de rotation. Cette tête est celle présentée en fonctionnement (Photo. 3.1.).

Ceci nous amène en définitive, pour cette campagne d'exploration, à faire varier :

- La pression,
- Le nombre de buses,
- La vitesse de rotation de la tête,
- La vitesse d'avance de la tête,
- Les conditions de tir :

°Standard sous entend que la tête est utilisée normalement,

°Occultation arrière sous-entend que la moitié arrière par rapport au sens du mouvement d'avance de la buse rotative est neutralisée par un masque métallique. Le jet n'est donc actif, sur un tour, que sur les 180 premiers degrés, ce qui réduit ainsi d'un facteur 2 le nombre de passage sur la matière d'une même buse. Ceci correspond à notre définition de « front montant », celle de « front descendant » correspondant à une occultation de la moitié avant.

Ceci est illustré par la photo suivante (Photo. 3.3.)

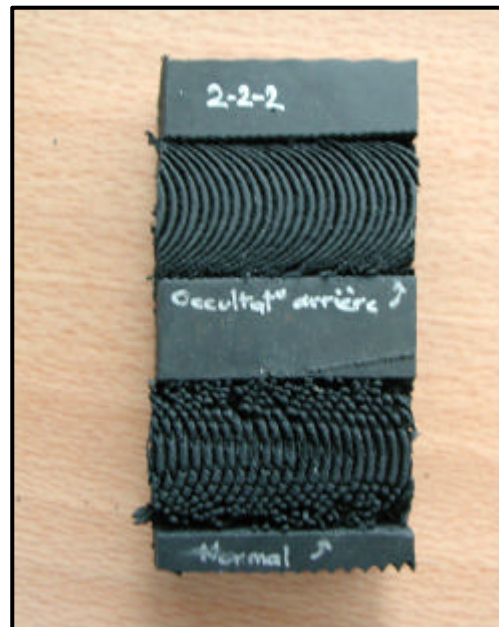


Photo. 3.3. : Action d'un jet rotatif sans et avec occultation arrière

En s'appuyant sur les résultats de l'approche globale par plan d'expériences menée précédemment, nous avons réalisé une série d'essais ponctuels, visant à expliciter les phénomènes conduisant à la réalisation d'une saignée de forte profondeur.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (Tab.3.3.).

type essai	Nombre de buses	Pression (bar)	Avance (mm/min)	Rotation de buse (tr/min)	N°essai et résultats
standard	1*0,2mm(R=8,6)	2400	100	1000	5.11 Bords : traversé ;Profondeur : 9 ;Qualité : 3
standard	1*0,2mm(R=8,6)	2400	150	1000	5.12 Bords : traversé ;Profondeur : 7 ;Qualité : 4
standard	1*0,2mm(R=8,6)	2400	200	1000	5.13 Bords : 15 ;Profondeur : 6 ;Qualité : 3
standard	1*0,2mm(R=8,6)	2400	150	750	5.23 Bords : traversé ;Profondeur : 9 ;Qualité : 3
standard	1*0,2mm(R=8,6)	3000	300	1000	2.13b Bords : 16 ;Profondeur : 5 ;Qualité : 2
Occultation arrière	1*0,2mm(R=8,6)	3000	300	1000	2.13h Bords : 2 ;Profondeur : 10 ;Qualité : 0
standard	1*0,2mm(R=8,6)	3000	100	1000	2.11b Bords : traversé ;Profondeur :15 ;Qualité :1
Occultation arrière	1*0,2mm(R=8,6)	3000	100	1000	2.11h Bords : 22 ;Profondeur : 7 ;Qualité : 1
standard	1*0,2mm(R=8,6)	3000	100	500	2.21b Bords : traversé ;Profondeur : 12 irrégulier Qualité : 2
Occultation arrière	1*0,2mm(R=8,6)	3000	100	500	2.21h Bords : 23 ;Profondeur : 7 ;Qualité : 2
standard	2*0,2mm	2400	600	1000	28 Bords : 22 ;Profondeur : 11 ;Qualité : 3
Occultation arrière	2*0,2mm	2400	600	1000	27 Bords : 15 ;Profondeur : 5 ;Qualité : 2
standard	3*0,2mm	2400	600	1000	30 Bords : 13 ;Profondeur : 9 ;Qualité : 4
Occultation arrière	3*0,2mm	2400	600	1000	30b Bords : 6 ;Profondeur : 3 ;Qualité : 3
standard	4*0,1mm	3500	600	530	19 Bords : 8 ;Profondeur : 5 ;Qualité : 3
standard	4*0,2mm	2400	600	530	17 Bords : 11 ;Profondeur : 6 ;Qualité : 1
standard	4*0,2mm	2400	600	1000	16 Bords : 10 ;Profondeur : 7 ;Qualité : 2
Occultation arrière	4*0,2mm	2400	600	1000	22 Bords : 5 ;Profondeur : 3 ;Qualité : 0
standard	4*0,1mm	2400	600	530	20 Bords : 4 ;Profondeur : 1 ;Qualité : 4
standard	4*0,1mm	3500	90	1000	21 Bords : traversé ;Profondeur : tra ;Qualité :
standard	4*0,2mm	3500	600	1000	15 Bords : traversé ;Profondeur : tra ;Qualité
standard	4*0,2mm	2400	90	530	18 Bords : traversé ;Profondeur : tra ;Qualité

Tab.3.3. : Premiers résultats expérimentaux sur éprouvettes

De façon à illustrer les principaux résultats, des photos des échantillons sont présentées en annexe 2.

Les essais du tableau sont des essais non répétés mais les résultats du plan précédent, avec les essais de répétition et de validation ont permis de s'assurer d'une bonne stabilité des résultats.

#### **II.1.4. Premières conclusions et hypothèses**

Les premiers résultats obtenus, bien que parcellaires, font apparaître certaines tendances :

*-Influence du nombre de buses :* Il apparaît qu'il est préférable (essais 15 / 30b / 28) de travailler avec un nombre important de buses, bien que l'accroissement de débit de matière ne soit pas réellement proportionnel à ce nombre. Par contre, les copeaux adhérents au fond de la saignée sont plus courts, ce qui est normal puisque le nombre de passages de découpe a été augmenté. Les résultats sont donc homogènes avec la première campagne d'essais.

*-Influence de la pression :* Les essais 19 et 20, avec une plage de variation plus élevée que dans la campagne précédente, mettent en évidence que l'augmentation de pression permet d'augmenter fortement l'enlèvement de matière, dans un rapport de 1 à 5 pour notre cas. Ceci est sans aucune commune mesure avec l'augmentation de profondeur de saignée d'une buse seule, en découpe, lorsque l'on augmente dans les mêmes proportions la pression. Nous le verrons plus précisément dans le paragraphe suivant, mais il est déjà possible de le constater, sur les bords de la saignée (rapport de 1 à 2 seulement). Il y a donc bien un effet d'amplification amené par la multiplication des passages de jets sur la matière.

*-Influence du diamètre de buses :* Pour une même pression, il permet de modifier le débit d'eau. Nous constatons grâce aux essais 17 et 20 que l'enlèvement de matière augmente dans une proportion très importante avec le diamètre de buse. Nous pouvons faire pour ce paramètre la même remarque que pour le précédent.

*-Influence de la vitesse de rotation de la buse :* les essais 16 et 17 font apparaître, mais ceci avait déjà été observé précédemment, que ce paramètre est moins influent que les précédents. Son augmentation permet globalement d'améliorer légèrement toutes les valeurs mesurées.

*-Influence de la vitesse d'avance :* Les essais 5-11, 5-12, 5-13 montrent que l'augmentation de la vitesse d'avance réduit la section de matière enlevée, dans des proportions relativement linéaires, ce qui est assez logique, au moins au niveau de la tendance.

L'influence très importante de ce paramètre sur la productivité nécessitera d'approfondir ultérieurement cet aspect.

*-Influence du nombre de passage de jet sur la matière :* Il a déjà été abordé par le biais de la vitesse de rotation de la tête mais a également été étudié en occultant la partie arrière de la tête. On retrouve donc le même type de résultats avec une baisse de la productivité et de la qualité de la surface générée proportionnelles à la division par 2 du nombre d'expositions aux jets de l'échantillon.

Il apparaît donc que si les paramètres influent de façon logique sur l'enlèvement de matière, certains facteurs semblent amplifier les phénomènes lors de multi-expositions. Il est donc nécessaire de mener des travaux, au niveau de l'action d'une buse seule sur la matière, pour ensuite étudier l'influence de la répétition des passages. Ceci impose de pouvoir se placer dans des conditions de vitesse linéaire identiques à celle d'une buse montée sur une tête rotative, tout en gardant la maîtrise complète du temps et du nombre d'expositions sur un échantillon. Ceci ne peut se faire directement avec la machine à Commande Numérique présentée photo 3.2. Celle-ci n'est pas capable de proposer des vitesses de déplacement supérieures à 6 m / min, alors que la vitesse tangentielle de la buse montée sur le plus grand diamètre de rotation (20 mm) atteint, pour 1000 trs. / min., une valeur de 12500 mm / min . La machine ne permet pas non plus de piloter le temps d'ouverture des buses de façon suffisamment précise pour être certain de maîtriser le nombre d'expositions. Il est donc obligatoire de mettre en place un banc d'essais spécifique, proche dans le principe de celui présenté par Wright et al.[Wri.et al.(1999)] pour l'étude de l'usinage de poches par jet d'eau H.P.

### **III. ETUDE EXPERIMENTALE APPROFONDIE**

#### **III.1. Définition du banc d'essais spécifique**

De façon à intégrer les contraintes machines présentées dans les premières conclusions, il a été décidé de reprendre un banc d'essais que nous avons mis en place à l'occasion d'une thèse précédente dans le laboratoire. Il avait été conçu et fabriqué afin d'étudier l'action des jets issus de têtes rotatives en décapage [Mab.Cor.1998], [Mab.Cor.(2000)] [Mab.(2000)] . Les outillages de décapage étaient les mêmes que ceux utilisés pour nos développements en démantèlement.

Les vitesses d'exposition sont donc du même ordre de grandeur, et le cahier des charges de ce banc par conséquent adapté, moyennant quelques modifications mineures d'utilisation, à notre travail. Le principe en est le suivant :

La solution de contrôle du temps d'exposition de la pièce par le jet consiste à interposer deux disques ( $D_1$ ,  $D_2$ ), d'axe vertical, en partie superposés, et entraînés en rotation, avec un calage angulaire fixe entre eux, par un moteur à courant continu. Chacun de ces disques est doté d'une fente de géométrie et dimension définies précisément (Fig. 3.4. ci-dessous).

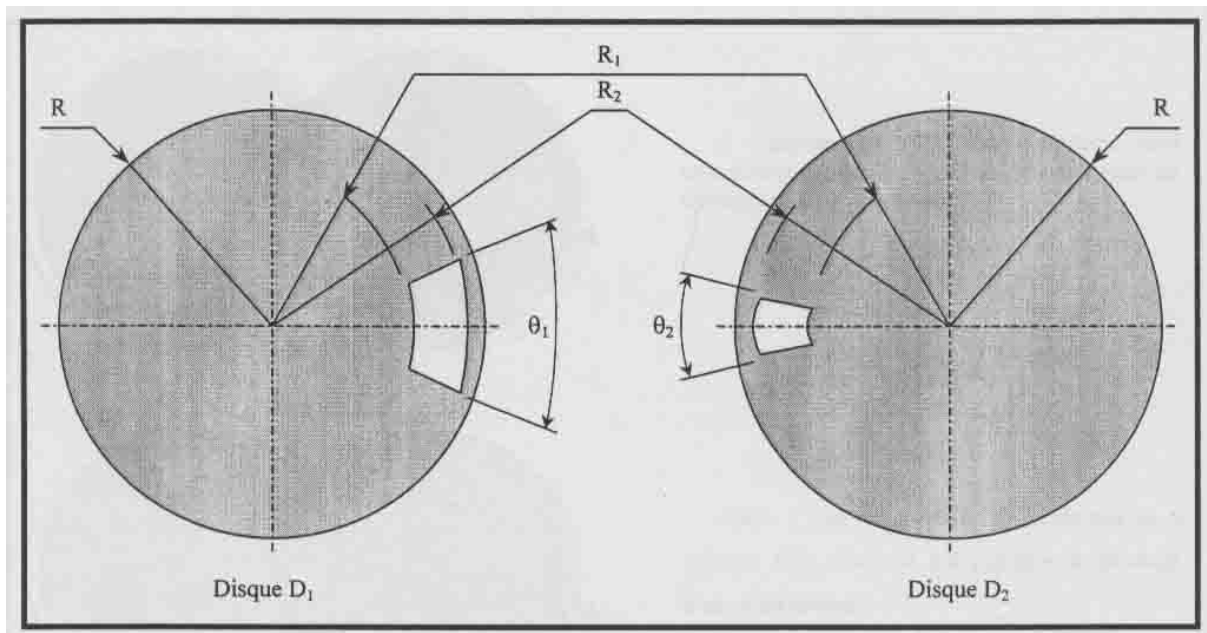


Fig. 3.4. : Géométrie des disques fendus (Mabrouki)

La maîtrise du temps d'exposition est obtenue par la superposition de chacune de ces fentes. Il varie donc avec la vitesse de rotation du moteur. La cinématique retenue permet des rapports de réduction de vitesse entre le moteur et le disque  $D_1$  d'une part, et entre les deux disques d'autre part, de respectivement 1,75 et 5,25. Ceci amène que chaque superposition des fentes apparaît tous les 21 tours pour le disque  $D_1$  et tous les 4 tours pour le disque  $D_2$ , les deux fentes étant calées superposées à l'instant initial. Etant donné les vitesses de rotation recherchées, il est ainsi largement possible de changer les conditions de tir ou d'arrêter le jet entre deux superpositions des lumières. (Fig.3.5.)

Pour notre étude, l'échantillon sera fixé sur le plateau  $D_1$ , le jet étant fixe par rapport au bâti. On peut ainsi calculer la vitesse d'avance relative du jet / pièce à partir de la vitesse de rotation du plateau.

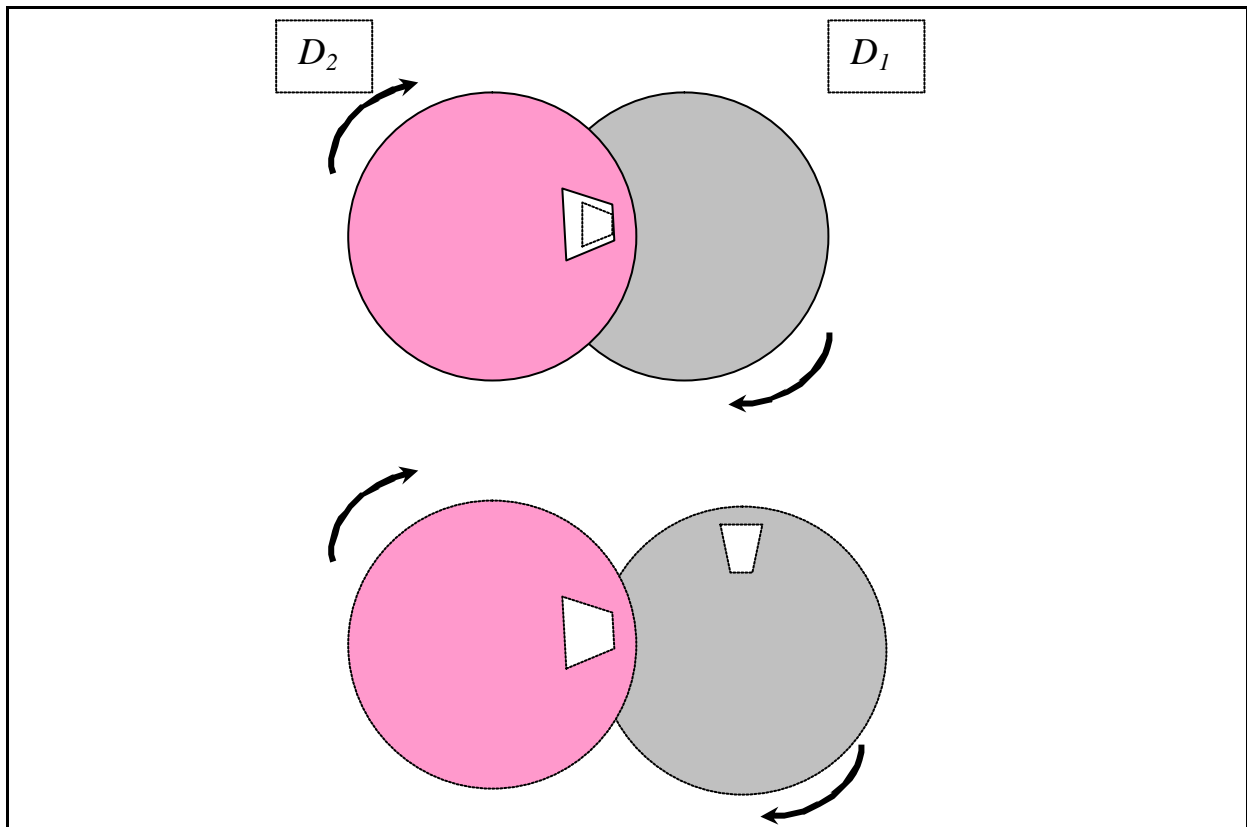


Fig. 3.5. Principe de fonctionnement du banc d'essai

*A  $t=0$ , les deux fenêtres sont coïncidentes, ce qui permet au jet de frapper l'échantillon*

Les disques  $D_1$  et  $D_2$  sont de dimensions identiques, avec un diamètre de 280 mm et une épaisseur de 4 mm. Les fentes sont caractérisées par leurs rayons  $R_{int.}=60$  mm et  $R_{ext.}=120$  mm ainsi que par leur angle d'ouverture ( $q_1 = 42^\circ$  et  $q_2 = 8^\circ$ ). Le temps d'exposition est donné par l'équation suivante :

$$t_{exp} = \frac{q_1}{2pN_1} = \frac{q_2}{2pN_2} \quad (3.1)$$

Avec

$q_1, q_2$  : angles d'ouverture respectifs des disques  $D_1$  et  $D_2$

$N_1, N_2$  : vitesses de rotation des deux disques

La vitesse linéaire d'exposition, équivalente à la vitesse relative buse / pièce se calcule selon la formule :



$$V = \frac{pDN}{1000} (m/min) \quad (3.2)$$

Avec :

N : vitesse de rotation du grand plateau,

D=180 mm. (Diamètre moyen sur lequel est positionné l'échantillon).

Le tableau suivant (Tab.3.4.), permet d'obtenir les correspondances entre les différentes grandeurs selon la vitesse de rotation du moteur.

N1(tr/min)	700	525	350	263	175	131	88	44
N2(tr/min)	133	100	66,7	50	33,3	25	16,7	8,3
Nmoteur(tr/min)	400	300	200	150	100	75	50	25
Temps d'exposition t(ms)	10	13,3	20	26,7	40	53	80	160
Temps entre 2 expo. texp(s)	1,8	2,4	3,6	4,8	7,2	9,6	14,4	28,8
Vitesse d'avance Vc1(m/min)	396	297	198	148	99	74,2	49,5	24,7
Vitesse d'avance Vc2(m/min)	75,4	56,5	37,7	28,3	18,8	14,1	9,4	4,7

Tab. 3.4. : grandeurs caractéristiques de fonctionnement du banc

Le banc d'essai est visible sur la photo. 3.4. suivante, ou il est possible de distinguer les 2 disques (2) et (3), les fentes (4) et (6) ainsi que la buse (5). Les poulies de réduction entre moteur et disques, à gauche, et le moteur lui même, sont protégés des projections d'eau par une plaque en plexiglas.

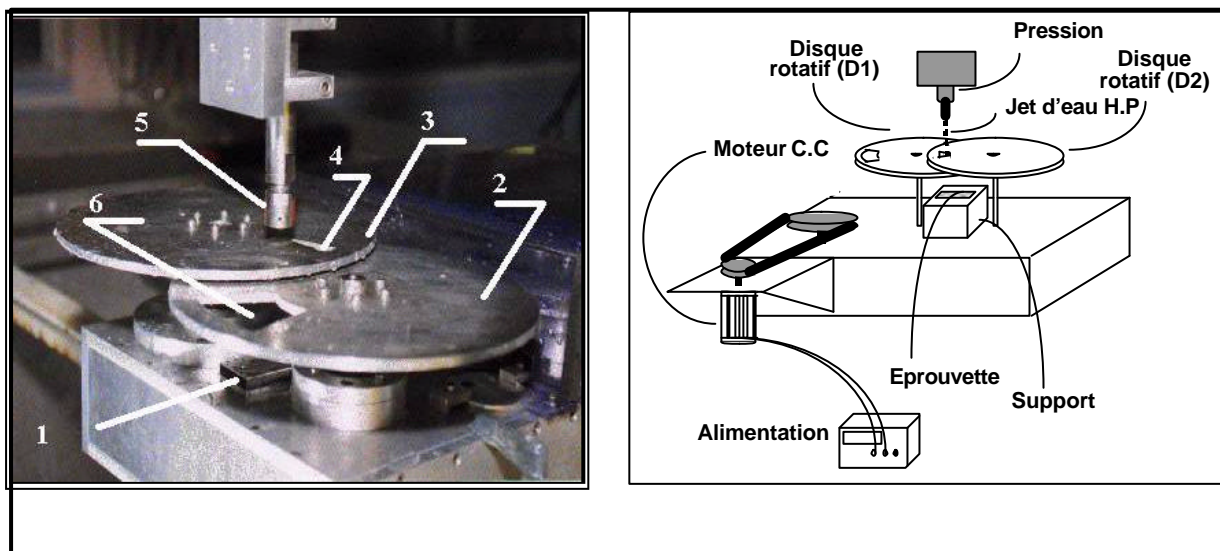


Photo.3.4. : Vue du banc d'essais et principe d'utilisation

Ce montage est installé à l'extérieur de la machine, une entretoise permettant de déporter la tête jet d'eau au dessus de la zone de superposition des fentes sur les disques.

Nous avons choisi de fixer l'éprouvette sous le disque  $D_1$ . Il tourne donc avec lui et le jet, dans ce cadre, décrit une portion d'arc de cercle par rapport à elle. Le contrôle de la vitesse d'avance est réalisé directement par le choix de la vitesse de rotation du moteur. Nous allons donc obtenir, après chaque exposition au jet de la pièce, une saignée dans le caoutchouc, de forme courbe, simulant l'action d'un jet débouchant d'une buse rotative à une seule buse (Fig. 3.6.).

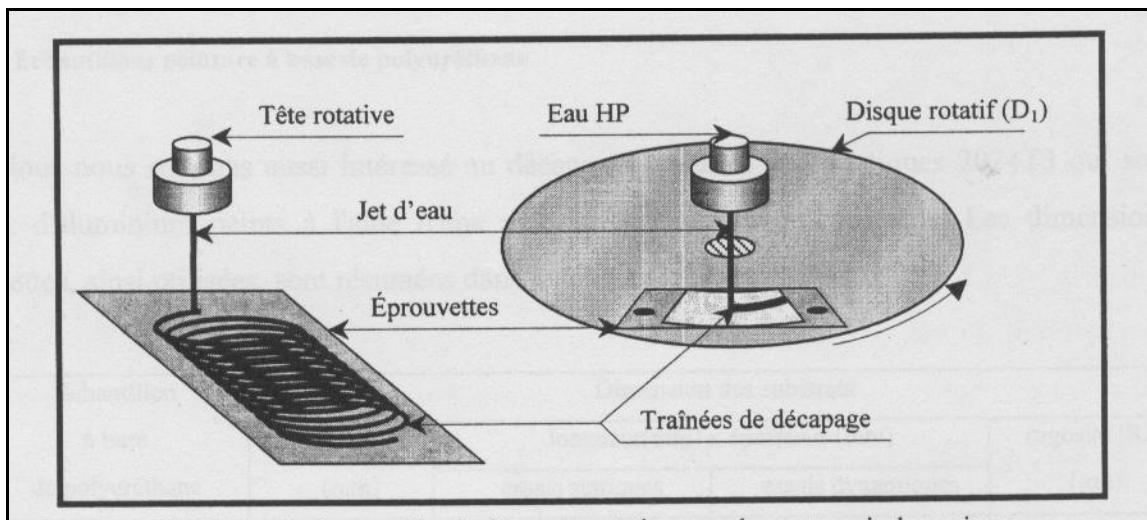


Fig.3.6. : relation entre essai sur banc et action tête rotative.

Les essais possibles avec une telle installation sont les suivants :

-Réalisation d'une saignée de découpe (fig. 3.7.)

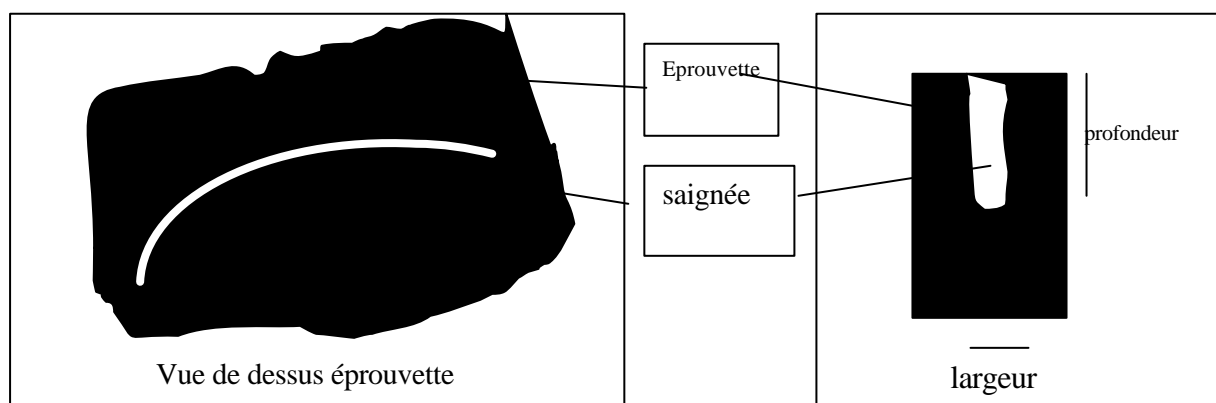


Fig. 3.7. : Saignée réalisée sur banc d'essais

-Réalisation de saignées de découpe parallèles, le pas entre elles étant alors fixé par le déplacement entre 2 expositions de la tête de découpe, suivant une direction radiale à l'axe du plateau D<sub>1</sub> (Fig.3.8),

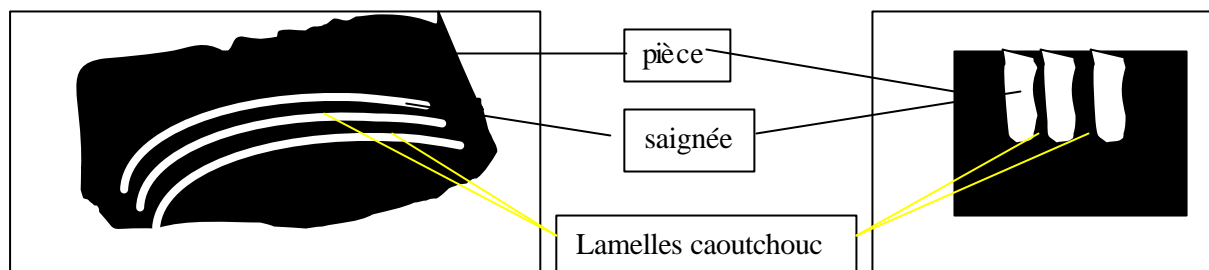


Fig. 3.8. : Saignées parallèles réalisées sur banc d'essais

-Réalisation de séries de saignées croisées, simulant une exposition réelle à une buse mono-jet rotative. Il suffit pour cela de réaliser une série de découpes parallèles puis de retourner de 180° l'échantillon avant de réaliser une deuxième série (Fig.3.9.).

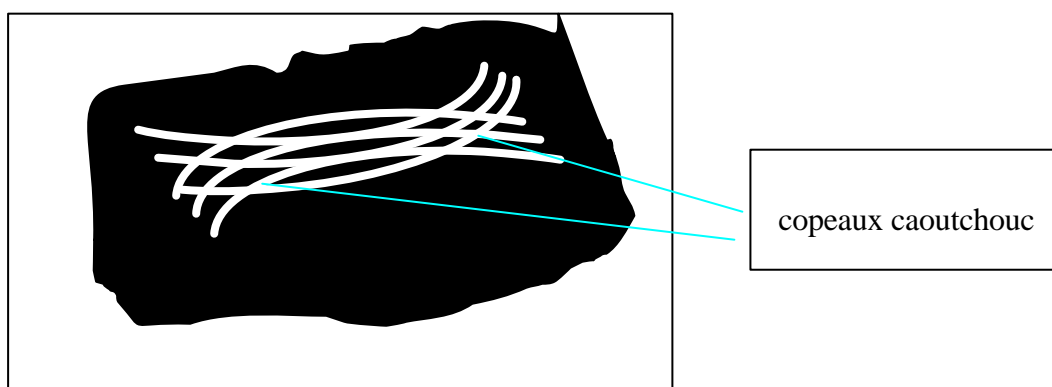


Fig. 3.9. : Simulation action d'une buse mono-jet rotative sur banc d'essais

Nous allons ainsi pouvoir explorer l'évolution de la surface de l'échantillon et éventuellement repérer les phénomènes permettant à la matière de se détacher de l'éprouvette sous forme de copeaux ou mini lamelles. Ceci n'intègre malheureusement pas les aspects dynamiques liés, entre autre, aux efforts latéraux du jet sur la matière, sur lesquelles nous reviendrons dans le chapitre suivant concernant la modélisation des phénomènes.

### III.2. Etude de l'interaction buse mono-jet / éprouvette

Approcher les mécanismes physiques mis en jeu, lors de l'enlèvement de matière, par action multi-croisée de jets issus d'une tête rotative, implique de s'intéresser dans une première étape à la découpe du caoutchouc par jet d'eau, ou plus exactement à la réalisation de saignées. Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, le banc d'essai est tout à fait adapté à cette étude.

Nous avons mené une série d'expérimentations, afin d'évaluer l'action du jet, et plus précisément la profondeur de saignée, avec une variation des principaux paramètres du procédé.

La distance de tir est fixée dans tous les cas à 20 mm.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (tab. 3.5.).

N° échantillon	Pression (bars)	Vitesse rotation plateau en tr / min (V. jet / pièce)	Diamètre buse (mm)	Profondeur saignée
1-1	2400	60 (34 m / min)	0,12	2,8
2-2	3500	115 (65 m / min)	0,12	3,5
3-3	3500	60	0,12	5,2
3-4	2400	115	0,12	1,3
3-5	2400	115	0,4	6,1 non rectiligne (surface érodée)
4-7	3500	60	0,4	10,5 inclinée
4-8	3500	115	0,4	8,9 inclinée
4-9	2400	60	0,4	8,6 (très large)
5-10	3500	60	0,25	11,4
5-11	2400	60	0,25	8,5
5-12	2400	115	0,25	5,4
5-13	3500	115	0,25	6,9
6-14	2400	60	0,1	2,4
6-15	2400	115	0,1	1,5
6-16	3500	60	0,1	4,8
6-17	3500	115	0,1	3,8

Tab. 3.5. : résultats essais de découpe avec buse mono-jet

Ces résultats sont issus de la moyenne de plusieurs mesures, la précision de la procédure de mesure mise en place étant de l'ordre de +/- 0,2 mm. Ils font apparaître en première analyse des informations conformes à ce que l'on pouvait attendre :

- Très forte influence du débit d'eau (diamètre buse),
- Importance moyenne de la pression,
- Importance moyenne de la vitesse d'avance (vitesse rotation plateau).

### III.2.1. Plan d'expériences

De façon à quantifier de façon plus précise l'influence relative de ces paramètres, les résultats ont été traités par plans d'expériences. Nous allons mettre en place un modèle expérimental permettant d'étudier l'influence de la pression, du diamètre de buses, et de la vitesse d'avance sur la profondeur de saignée. Le nombre de niveau d'essais pour chaque paramètre est fixé à deux sauf pour le diamètre de buse (4). Ce plan d'expérience peut être représenté sous la forme du diagramme d'Ishikawa suivant (Fig. 3.10.) :

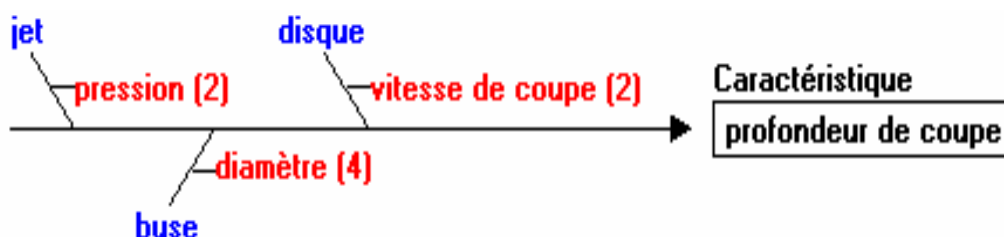


Fig. 3.10. : Diagramme d'Ishikawa du plan d'expériences

Le plan orthogonal (L16) issu du tableau d'essais 3.5., s'organise de la façon suivante (Tab. 3.6.) :

Pression (bar)	Vc (m / min)	Diamètre buse (mm)	Profondeur saignée (mm)
2400	34	0,12	2,8
2400	34	0,4	8,6
2400	34	0,25	8,5
2400	34	0,1	2,4
2400	65	0,4	6,1
2400	65	0,12	1,3
2400	65	0,1	1,5
2400	65	0,25	5,4
3500	34	0,25	11,4
3500	34	0,1	4,8
3500	34	0,12	5,2
3500	34	0,4	10,5
3500	65	0,1	3,8
3500	65	0,25	6,9
3500	65	0,4	8,9
3500	65	0,12	3,5

Tab. 3.6. : tableau orthogonal structuré du plan d'expériences

La moyenne arithmétique des résultats est de 5,725 mm

### III.2.2. Analyse des résultats :

Le tableau 3.7. ci-dessous fait apparaître une analyse de la variance correcte, ne laissant pas place à d'éventuels paramètres cachés ou liés.

	Paramètre	Contribution (%)	Probabilité de F(%)	F	Regroupé
1	pression	13,9	100	42	
2	vitesse avance	11,3	100	34,4	
3	diamètre	69,6	100	69,4	
	Erreur	5,1			

Tab.3.7. : Contribution des différents paramètres

Le graphe (fig. 3.11.) représente la contribution de chaque paramètre à la profondeur de saignée. On retrouve le résultat déjà entrevu en première analyse, soit la prépondérance du diamètre de buse dans le processus de découpe.

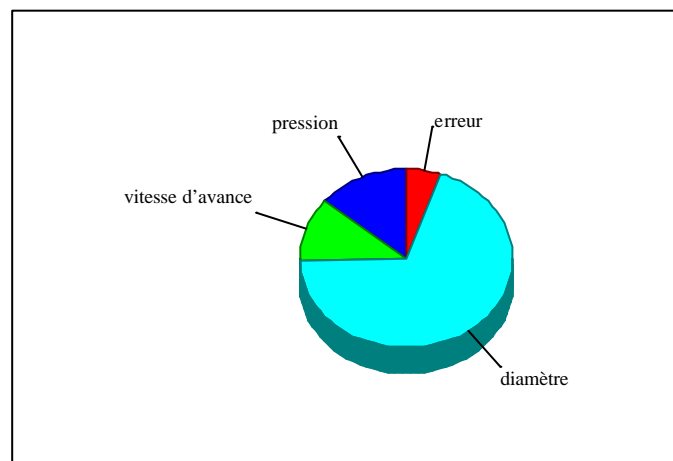


Fig. 3.11. : Contribution des différents paramètres.

Le graphe des effets (Fig.3.12.) permet de visualiser l'influence de chaque paramètre sur la profondeur de saignée. Il propose un optimum logique, qui consiste à maximiser la pression, le diamètre de buse et de réduire la vitesse d'avance pour avoir la saignée la plus profonde possible.

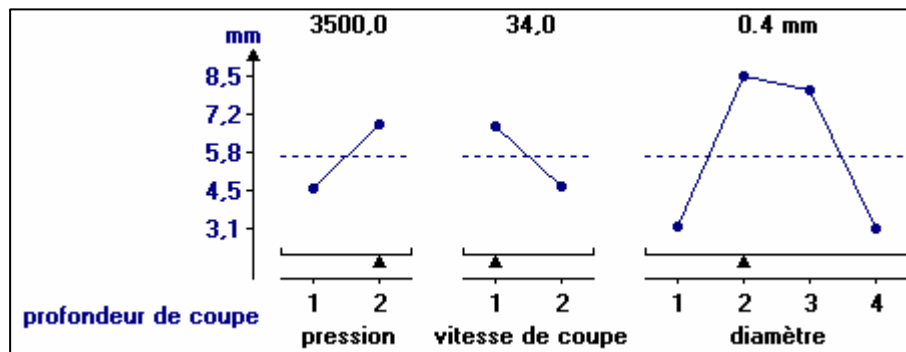


Fig. 3.12. : Graphe des effets

Le modèle de comportement s'écrit alors de la façon suivante :

$$Y = 5,725 + [-1,15 \quad 1,15] P + [-2,525 \quad 2,8 \quad 2,325 \quad -2,6] D + [1,4 \quad -1,05] V$$

De façon à confirmer et valider le modèle, un essai est réalisé « hors plan » de façon à comparer résultat expérimental et résultat calculé. La combinaison retenue pour ceci est :

- Pression : 3500 bars
- Vitesse d'avance : 34 m / min,
- Diamètre de buse 0,4 mm

Le résultat d'essai nous donne une profondeur de saignée de : 10,4 mm

Le calcul nous donne :  $Y = 5,725 + 1,15 + 2,8 + 1,4 = 11,07$  mm soit une erreur inférieure à 10 %.

On trouve des résultats analogues pour d'autres configurations.

Cette erreur de 10 % est tout à fait acceptable, pour un procédé de production, dont certains paramètres ne sont pas maîtrisés comme par exemple les légères fluctuations de pression de la pompe ou la qualité des buses. De plus, les moyens de mesure permettent difficilement une évaluation très précise des résultats expérimentaux.

### III.3. Approche expérimentale du modèle de Graham et Wilkins

Le modèle de découpe de R. J. Wilkins et E. E. Graham, présenté dans le chapitre précédent, s'appuie sur l'hypothèse que la friction entre la gomme et l'eau induit la déflexion du jet d'eau dans la matière. Cet effort de friction s'écrit sous la forme suivante :

$$F = \frac{-C_f \cdot A_w \cdot r \cdot V_z^2}{2} \quad (3.3)$$

Ce modèle permet de déterminer le coefficient de friction  $C_f$ , comme ceci a été fait pour le néoprène. Le jet se comporte, comme dans le cas du jet d'eau abrasif, de la manière suivante, en s'inclinant à fur et à mesure qu'il pénètre dans la matière (fig. 3.13.):

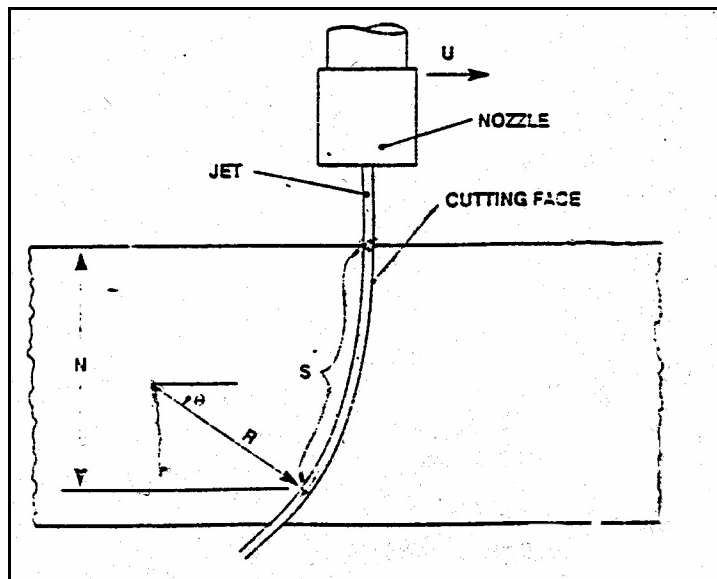


Fig. 3.13 : Comportement du jet (source Modèle de découpe)

La démarche est la suivante :

Il s'agit de relever après un essai de découpe la valeur de deux grandeurs :

-L'angle de déviation  $q$  ,

-La profondeur de pénétration  $s$  (Fig. 3.14.), en supposant que le jet est dévié selon un arc de cercle.



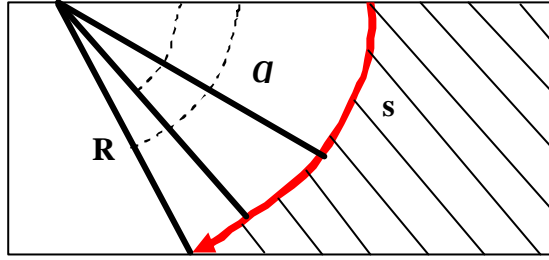


Fig. 3.14. : Schéma de représentation idéale

Graham et Wilkins nous proposent, dans leur modèle de découpe, la formulation suivante, pour l'angle  $q$ , dont la représentation graphique est une droite d'abscisse  $s$  et d'ordonnée  $\sin(q)^{1/6}$  :

$$(\sin q)^{1/6} = A(u)^{1/6} \cdot \left( \frac{C_f}{2.D_0} \cdot s + 1 \right) \quad (3.4)$$

Cette équation nous permettra, avec les mesures relevées, d'obtenir une droite dont l'ordonnée à l'origine est  $A(u)^{1/6}$ , et dont le coefficient directeur est le coefficient de friction  $C_f$

### III.3.1. Détermination expérimentale du coefficient de friction $C_f$

Le mode opératoire est le suivant :

Nous réalisons une opération de découpe sur une de nos éprouvettes.

Les conditions de tir sont les suivantes (Tab. 3.8.)

campagne d'essai	Numéro de lopin	Numéro de l'essai	Caractéristiques :				
			Pression (Bar)	Diamètre (mm)	Hauteur de tir (mm)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)
Calcul du coefficient de friction	1	1-1-1	3000	0,5	1	Découpe	2000
		1-1-2	3000	0,5	1	Découpe	1500
		1-1-3	3000	0,5	1	Découpe	1000
	2	1-2	3000	0,5	1	Découpe	2000
	3	1-3	3000	0,5	1	Découpe	2500

Tab. 3.8. : Essais de découpe pour calcul  $C_f$

Parmi les essais réalisés, nous avons retenu celui pour lequel les stries étaient bien visibles. Nous en avons fait une photographie pour pouvoir l'agrandir ultérieurement pour mieux l'analyser (Photo.3.5.)

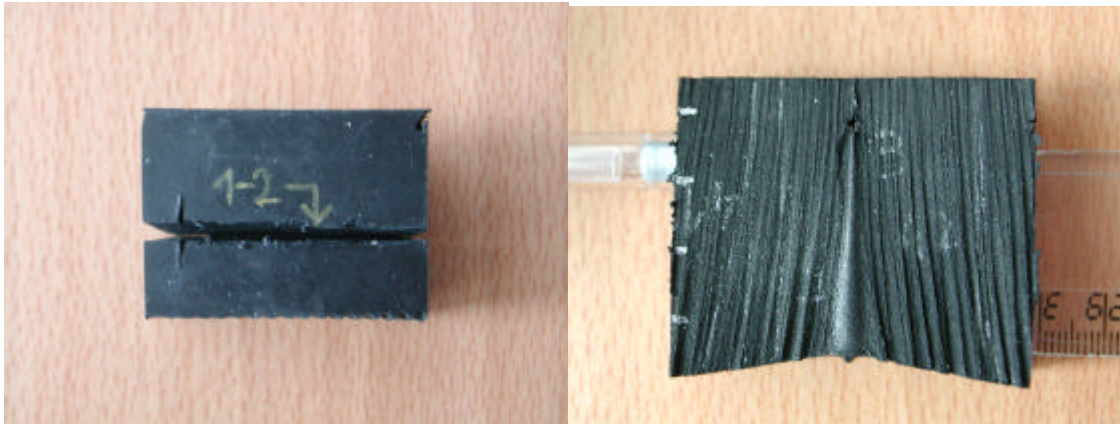


Photo.3.5. : Vue du dessus et vue de l'intérieur du plan de découpe

Pour exploiter les relevés de l'expérience, à savoir l'angle de déviation et la profondeur de pénétration, nous avons réalisé un agrandissement de la photo (annexe 3.1). En relevant les coordonnées des points par rapport à une échelle fixe, nous avons obtenu le tableau de données se trouvant en Annexe 3.2. Conformément à la formule énoncée dans les hypothèses, nous avons obtenu une droite dont le coefficient directeur est de **3.6353** et dont l'ordonnée à l'origine est de **0.0865** (Fig. 3.15).

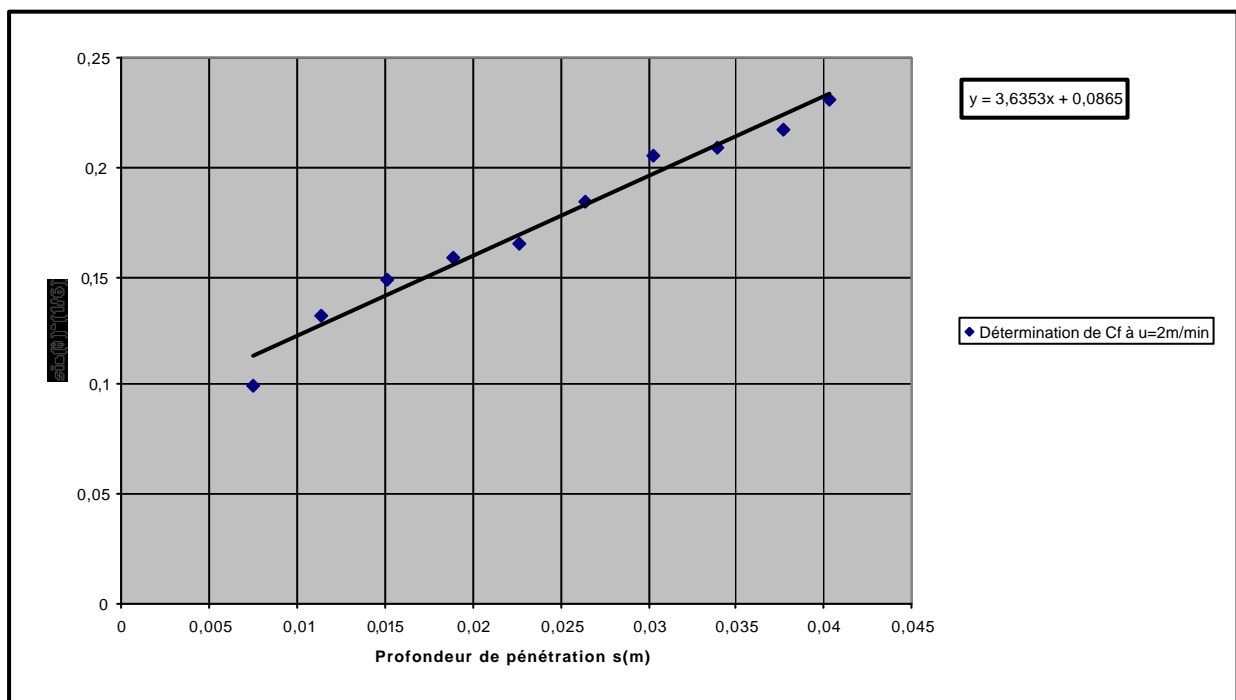


Fig. 3.15. : Représentation graphique des points relevés durant l'expérience

Il est alors possible de déterminer le coefficient de friction ainsi qu'une autre constante  $x$ . Nous avons donc obtenu  $C_f = 0.042$  soit dix fois plus que pour le néoprène. Ceci semble logique, étant donné que le néoprène est de loin moins dense que la gomme de caoutchouc.

### III.3.2. Validation de l'analogie entre buse de découpe et buse de tête rotative

Les calculs effectués dans le paragraphe précédent sont basés sur des essais menés avec une buse de découpe, étudiée pour générer les jets les plus cohérents possibles, de façon à amener la densité d'énergie la plus importante possible par unité de surface. Les buses utilisées sur les têtes rotatives ne cherchent pas à remplir ce cahier des charges car, destinées aux applications de décapage, elles ont surtout été développées pour traiter des surfaces importantes en lissant les pics d'énergies qu'elles risquaient d'entraîner. Ces buses produisent donc des jets naturellement moins cohérents que celles de découpe. Il est nécessaire pour la suite de notre étude de chiffrer cette différence.

Pour ce faire, nous avons réalisé une série d'essais, avec la tête rotative, équipée d'une seule buse positionnée sur le diamètre le plus important ( $R=8,06$  mm). Ces essais seront réalisés sans rotation de la tête, avec une buse de 0,2 mm de diamètre et à une distance de tir de 20 mm. La pression est fixée à 2400 bars, le paramètre variable étant la vitesse d'avance (de 1 à 12 m / min). Le mode opératoire est présenté Fig. 3.16.

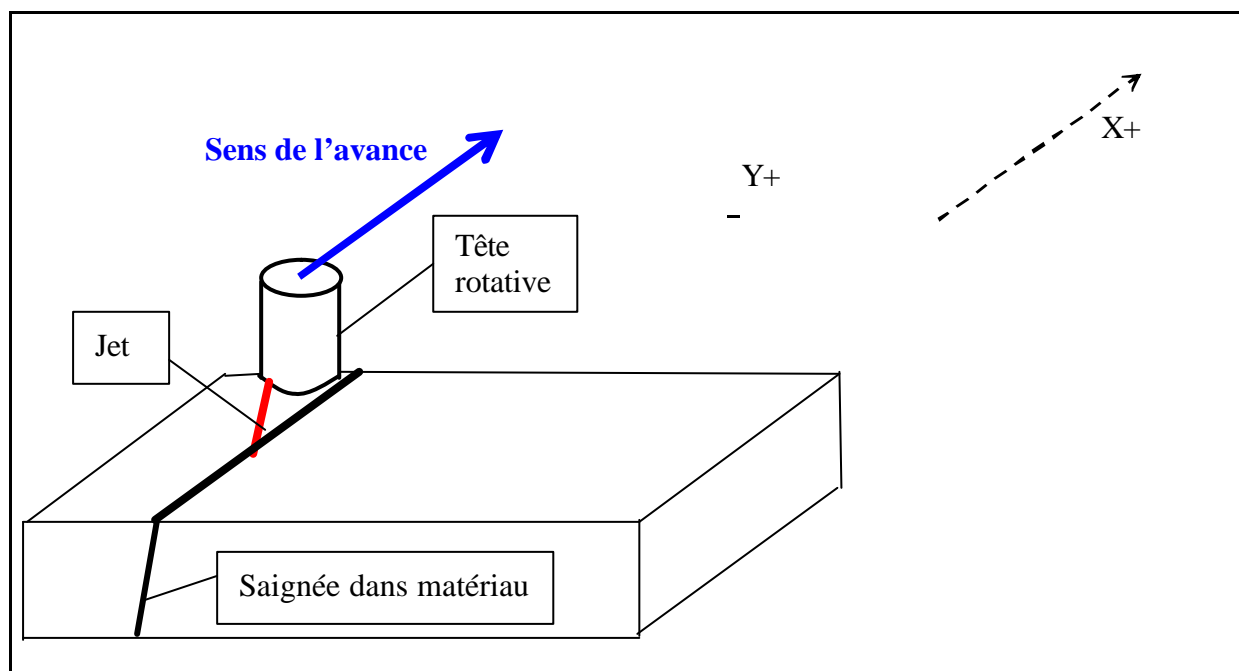


Fig. 3.16. : Mode opératoire pour essai de découpe avec buse rotative

Les résultats obtenus sont les suivants (Tab. 3.9.), avec pour calcul de la profondeur théorique, l'application de la formule suivante (chapitre 2) :

$$S = \frac{2D_0}{C_f} \left[ \left( \frac{3pV_0^3 C_f \cos a^3}{4eu} \right)^{\frac{1}{6}} - 1 \right] \quad (3.5)$$

Vitesse d'avance Av (m/min)	5	7	10	12
Profondeur de pénétration (mm)	13	12	10	9.5
Profondeur espérée grâce au modèle de Graham et Wilkins (mm)	22-24	20.5-22.6	19-20	18-20

Tab. 3.9. : Essais de découpe avec buse rotative

Remarquons que le rendement de la buse rotative est de loin inférieur au rendement de la buse de découpe, comme cela était prévisible étant donné les spécificités de chacune, et les remarques évoquées chapitre 1 quant à la stabilité des performances des buses industrielles. La différence de performance varie du simple au double. C'est pourquoi nous considérerons la moitié de la profondeur trouvée lors de l'évaluation avec le modèle. De plus, les essais réalisés pour tester l'enlèvement de matière avec un seul jet (Annexe 4.1), donnent des profondeurs de pénétration en corrélation avec le modèle, après introduction d'un coefficient correcteur de 0,5. Nous adopterons donc ce coefficient de calage pour passer de la buse de découpe à la buse rotative :

$$S_{rota.} = K_{rendement} \cdot S_{découpe} \text{ et } K_{rendement} = 0.5$$

### III.3.3. Détermination de la profondeur de coupe

Une fois ce coefficient défini, nous pouvons reprendre le calcul et déterminer l'avance et la profondeur de pénétration.

Durant les essais, nous avons pu remarquer que l'angle maxi d'inclinaison du jet dans la matière était de l'ordre de 10-15°. Nous avons fait l'hypothèse, à partir de ces résultats, qu'en découpe linéaire, le jet, à partir d'un angle de 15°, «rebondit» sur la gomme et donc ne pénètre plus dans la matière. Par conséquent, en fixant un angle maxi, la profondeur de saignée peut être déterminée (Annexe 4.2).

Une illustration de ces calculs est présentée ci-dessous (Fig. 3.17.), pour une vitesse d'avance de 2 m / min, dans le cas d'une tête rotative tournant à 1200 Trs / min.

Le premier résultat correspond à la profondeur de saignée obtenue avec une tête non tournante. Le seul déplacement est le déplacement linéaire de la tête.

Le deuxième résultat est obtenu pour une même vitesse de déplacement, avec la tête animée d'un mouvement de rotation.

<b>Calcul de la profondeur de pénétration du jet</b>				
<b>Données :</b>				
<b>Angles limites de déviation :</b>				
$\theta_{min}$ (°)	10	V linéaire=	113,097336	K= 0,5
$\theta_{max}$ (°)	15			
N (tr/min)	1200	<u>Vitesse linéaire</u>		<b>Profondeur de pénétration : (mm)</b> <b>smin = 9,3</b>
Ksi	5,00E+07	u = 90,478	(m/s)	
P (Bar)	2400	<u>Vitesse en sortie de buse</u>		
Cf	4,20E-02	V0 = 692,820323	(m/s)	<b>Profondeur de pénétration : (mm)</b> <b>smin = 4,7</b>
Ro (Kg/m <sup>3</sup> )	1000	A(u) = 2,86E-03		
D0 (mm)	2,00E-01			
R (mm)	12			

Fig. 3.17. : Exemple de calcul de la profondeur de coupe

D'autres résultats, pour des vitesses de rotation différentes, sont disponibles en Annexe 4.3.

### III.3.4. comparaison modèle de Graham et modèle expérimental

Les essais réalisés (Tab.3.6.) ne sont pas facilement comparables car, outre les plages de vitesse d'avance totalement décalées, nous avons travaillé avec des buses de découpe différentes de celles montées sur des têtes rotatives, en général moins performantes du point de vue de la cohérence du jet.

Les résultats obtenus (extrait Tab. 3.6.) pour les conditions les plus proches étaient les suivants :

Pression (bar)	Vc (m / min)	Diamètre buse (mm)	Profondeur saignée (mm)
2400	65	0,12	1,3
2400	65	0,25	5,4

Le modèle de Graham donne une profondeur de saignée de environ 5 mm pour un diamètre de buse de 0,2 mm et une vitesse d'avance de 90 m / s. Il semble donc, étant donné l'influence de la variation de chacun des paramètres déjà étudiés, quelque peu optimiste, mais nous avons déjà en parti abordé ce problème. Cet optimisme est intégré, dans la suite de notre étude, avec le coefficient de 0,5 introduit en III.3.2.

### III.4. Etude de l'interaction buse multi-jets rotative / éprouvette

#### III.4.1. Etude expérimentale

Nous avons vu précédemment que la multi-exposition de la matière aux jets, dans le cadre de l'utilisation d'une tête multi-jets rotative, amenait à des profondeurs de saignée globales différentes de celles obtenues avec un seul passage d'un jet. Il est donc maintenant nécessaire, dans cette étude des phénomènes physiques d'enlèvement de matière, de réaliser des essais simulant le passage de cette tête rotative, avec des conditions de tir identiques à celles étudiés dans les paragraphes précédents.

Nous avons mené une série d'expérimentations, afin d'évaluer le comportement de la matière exposée à des tirs parallèles puis croisés, selon des pas variables, en variant les principaux paramètres du procédé.

Les paramètres retenus pour cette étude sont :

- La vitesse de rotation du plateau support de l'échantillon,
- Le diamètre de buse.

La distance de tir est fixée dans tous les cas à 20 mm, de même que la pression de pompe est fixée à 2400 bars.

Le mode opératoire reste identique à celui de l'étude précédente, mais la tête de découpe est animée d'un mouvement de translation, ce qui induit un déplacement entre 2 expositions et donc la réalisation de saignées parallèles, comme présenté Fig. 3.8.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (Tab. 3.10.).

N° échantillon	Pression (bars)	V. rotation plateau (tr / min) (V. jet / pièce)	Diamètre buse (mm)	vitesse de déplacement tête (mm/min)	Profondeur saignée (mm)
6-14	2400	115 (65 m / min)	0,25	60	-Environ 5 mm (variabilité) -Détachement de lamelles
7-15	2400	115 (65 m / min)	0,25	90	-Environ 4 mm (variabilité) -Quelques soulèvements de lamelles
8-16	2400	115	0,25	42	-Environ 4 mm -Des lamelles se touchent en fond de saignée -Beaucoup de détachement de matière
9-17	2400	115	0,1	42	-moins de 1 mm très fines rayures
10-18	2400	115	0,1	60	Identique à 9-17
11-19	3500	115	0,1	90	Identique à 10-18 (plus espacées)

Tab.3.10. : Réalisation de saignées parallèles à pas variable.

Nous constatons que :

- L'utilisation de buses de faible diamètre (0,1 mm) ne permet pas de réaliser des saignées profondes, ce qui avait déjà été identifié dans le plan d'expérience (Tab. 3.6.) et vérifié avec une tête rotative (Tab.3.3.) : L'action multiple des buses n'avait pas permis d'enlever de la matière sur plus de 1mm (4 mm sur les bords),

-Le pas entre les stries a une grande importance puisque pour un pas de 0,25mm, nous avons beaucoup plus de matière se détachant que pour un pas plus élevé, comme le montrent les photos ci-dessous (photo. 3.5.)



Photo.3.5. : séparation copeaux / échantillon en fonction du pas entre stries

De même, des essais ont été réalisés en faisant une première série de stries, puis une deuxième en retournant l'échantillon, de façon à ce que l'on obtienne un croisement des deux séries, comme présenté Photo.3.6.

On constate que, pour des conditions de tir identiques, nous obtenons des lamelles se détachant de la pièce lorsque nous réalisons ces tirs croisés (Photo. 3.6.).



Photo.3.6. : séparation copeaux / échantillon avec superposition de saignées

L'inclinaison des jets, liée à la géométrie de la machine et surtout des têtes rotatives, ou aussi à des effets dynamiques à préciser ultérieurement, apparaît d'une importance particulière.



La variation des angles de tir des buses et le faible pas entre chaque saignée doit permettre aux jets de se croiser à une certaine profondeur dans la pièce, et ainsi de libérer les copeaux de matière. Il est donc intéressant à ce stade de mieux caractériser la géométrie des têtes rotatives.

### III.4.2. Caractérisation géométrique d'une tête multi-jets rotative

L'objectif de ce paragraphe est de vérifier et de mesurer l'inclinaison des différentes buses de la tête rotative.

La procédure expérimentale mise en place est la suivante :

Nous avons réalisé, avec une tête multi-jets immobilisée (en translation comme en rotation), un tir de courte durée sur une pièce en caoutchouc, à des distances de tir variables. L'axe du système est connu et repéré sur la pièce. Il est alors possible de relever la position des points d'impact, pour les différentes distances de tir et de calculer les angles d'inclinaison dans les deux plans verticaux de toutes les buses (Fig. 3.18.).

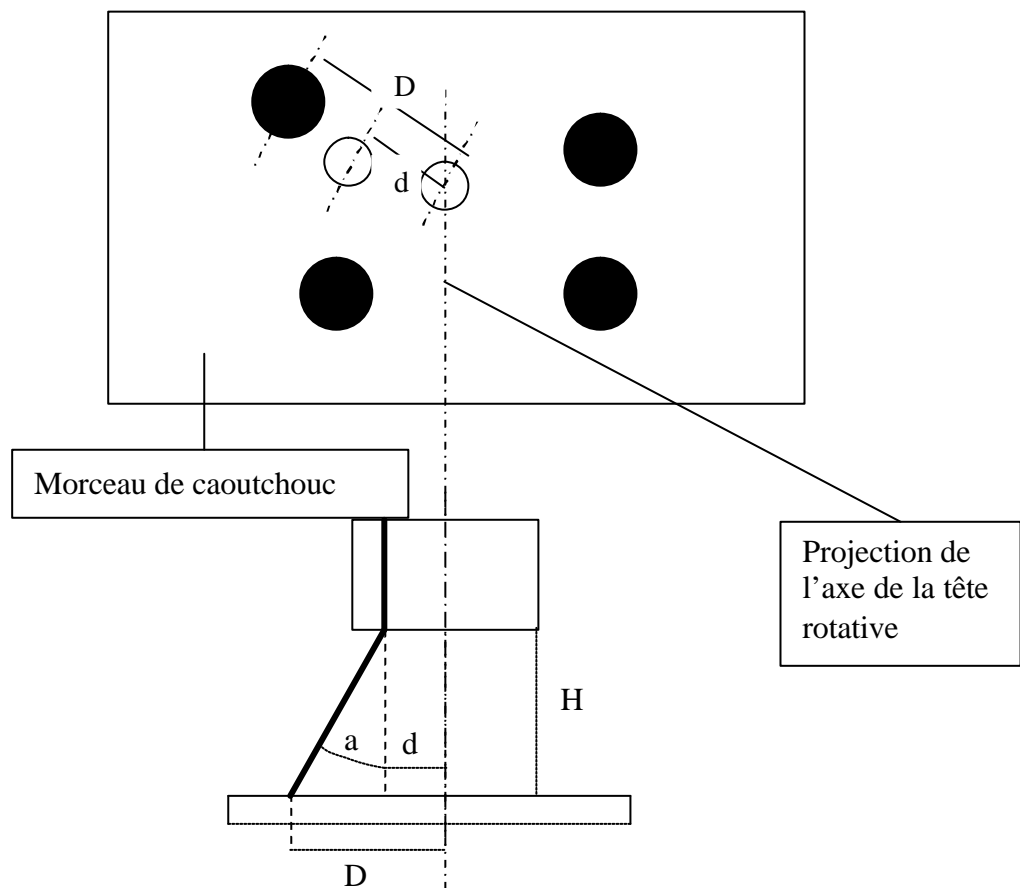


Fig. 3.18.calcul angles impact

Pour une distance de tir de 20 mm nous obtenons :

	Jet 1	Jet 2	Jet 3	Jet 4
D (mm)	7.5	11.5	10	10.5
d (mm)	5.7	8.06	7	8.04
φ (mm)	1.2	0.8	1.2	1

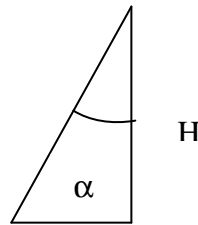
Pour une distance de tir de 30 mm nous obtenons :

	Jet 1	Jet 2	Jet 3	Jet 4
D (mm)	9	13	11.5	12
d (mm)	5.7	8.06	7	8.04
φ (mm)	1.6	1.2	1.6	1.4

En posant  $D-d=a$

Nous avons :  $a = \arctan\left(\frac{a}{H}\right)$

et :  $b = \arctan\left(\frac{a + \frac{f}{2}}{H}\right)$



D'où la divergence :  $q = (b - a)$

La moyenne des valeurs déterminées par 2 essais donne :

buse	Incidence $\alpha$ (en °)	Divergence $\theta$ (en °)
1	5.7	1.6
2	9.55	1.11
3	8.53	1.57
4	7.26	1.35

Il y a donc bien des angles de tir variables selon les buses.

### III.4.3. Interaction tête multi-jets rotative / éprouvettes

Pour analyser le comportement en usinage d'une tête multi-jets, nous avons effectué une série d'essais avec une buse, dans des conditions de tir les plus proches possibles de celles étudiées dans le paragraphe 4.1 (Tab. 3.8.).

Les paramètres retenus pour cette étude sont toujours :

-Le diamètre de buse,

-La vitesse d'avance de la tête.

La vitesse de rotation de la tête multi-jets est fixée à 1000 trs / min, ce qui correspond à une vitesse tangentielle pour les buses de l'ordre de 65 m / min.

La distance de tir reste fixée dans tous les cas à 20 mm, de même que la pression de pompe (2400 bars).

Le tableau d'essais est le suivant (Tab. 3.11.) :

N° échantillon	Pression (bars)	Vitesse rotation tête	Diamètre buse (mm)	Nombre de buses en service	Vitesse d'avance (mm/min)	Profondeur saignée (mm)
12-20	2400	1000	0,25	4	42	traversante
12-21	2400	1000	0,25	4	90	traversante
12-22	2400	1000	0,25	4	90	traversante
13-23	2400	1000	0,1	1	90	4 sur bords 2 au milieu
13-24	2400	1000	0,1	1	42	5 sur bords 3 au milieu
13-25	2400	1000	0,1	4	90	13 homogène fond très haché
13-26	2400	1000	0,1	4	42	17 homogène fond très haché

Tab.3.11. : Essais avec buses multi-jets rotatives.

Ces résultats font apparaître que :

-Le nombre de buses est important pour le débit de matière et surtout pour la régularité de la géométrie de la saignée,

-Le diamètre de buse est fondamental pour l'enlèvement de matière, ce qui a déjà été maintes fois constatées,

-La multi-exposition permet un fort enlèvement de matière puisque à conditions de tir identiques, pour une seule buse en service, nous avons une profondeur de saignée de moins de 1 mm pour une série de saignées parallèles, sans enlèvement de matière significatif (essai 9-17 tab. 3.8.) et une profondeur de saignée, sur 25 mm de large, de 3 à 5 mm avec la tête mise en rotation (essai 13-24 Tab. 3.9.).

Le même type de résultat est constaté en comparant l'essai 7-15 (5mm en moyenne de profondeur d'une saignée avec quelques détachements de lamelles) et l'essai 12-21 (échantillon détruit, donc profondeur de saignée supérieure à 25 mm). Il y a donc un facteur d'amplification, lié à la multi-exposition, qui est introduit dans les mécanismes d'enlèvement de matière.

### **III.5. Conclusions et hypothèses relatives à l'enlèvement de matière**

Les différents essais menés dans ce chapitre nous ont permis de :

- Valider la faisabilité de l'enlèvement de matière par jet d'eau HP, en obtenant une poudrette de caoutchouc,
- Etudier le modèle de découpe et Graham et Wilkins en l'adaptant à notre matériau,
- Etudier l'action d'un jet d'eau HP issu d'une buse sur des éprouvettes en caoutchouc, et de mettre en place un modèle expérimental de comportement en découpe,
- Analyser les différences de comportement entre une buse mono-jet, en déplacement linéaire ou mise en rotation, et une buse multi-jet rotative, de façon identifier les phénomènes permettant à la matière de se détacher sur une profondeur importante.

L'enlèvement de matière se réalise grâce aux différences d'orientation de l'ensemble tête rotative – machine. Ces différences permettent aux différentes saignées de se rejoindre en profondeur dans la matière, et à la lamelle de matière ainsi générée de se libérer. De plus le nombre d'expositions au jet d'une unité de surface (dénommée dans notre étude facteur de multi-exposition), est fondamental pour le débit de matière atteint.

L'objectif suivant va être de modéliser cet enlèvement de matière, en s'appuyant sur ces premières analyses et constatations.

# **CHAPITRE 4. MODELISATION DE L' ENLEVEMENT DE MATIERE PAR BUSES MULTI-JETS ROTATIVES**

## **I. HYPOTHESES ET DEMARCHE**

Les essais, menés dans le chapitre précédent, ont permis d'appréhender les mécanismes d'enlèvement de matière et l'influence du nombre de passage du jet sur la matière. L'objectif du travail va maintenant être de mettre en place un modèle, permettant de prédire le volume de matière enlevée, lors du passage d'une tête multi-jets rotative.

Les hypothèses de base retenues pour cette étude sont :

-Utilisation de têtes multi-jets rotatives à buses cylindriques, tournant sur des diamètres prédéterminés (trajectoire circulaire),

- Travail dans du caoutchouc naturel, afin de permettre un transfert facile de notre travail à l'application de démantèlement de pneumatiques automobiles,
- Utilisation du modèle de découpe de Graham et Wilkins,
- Non déformation de la matière lors de l'exposition aux jets.

Nous verrons que cette dernière hypothèse pose problème. Elle est éloignée des caractéristiques mécaniques de notre matériau, ce qui contrariera la modélisation, au point de devoir la reprendre sous un nouvel angle.

Deux approches vont donc être présentées :

-La première consistera à considérer que les angles différents des buses permettent aux saignées de se rejoindre en profondeur dans la matière. L'exposition croisée d'une unité de surface aux différents jets permet alors à la matière de se détacher, en petits copeaux de forme pyramidale inversée (théorie dite «des pyramides» dans la suite de notre document).

-La seconde consistera à aborder le problème par une approche plus macroscopique de l'enlèvement de matière, en considérant que chaque jet réalise une saignée suivant le modèle de Graham et Wilkins, et en définissant un facteur de recouvrement lié au nombre de passages de jets sur la matière. La combinaison du modèle de Graham et de ce facteur, appliquée à la cinématique de la tête, permettra de calculer le profil de l'enlèvement de matière donc le débit.

## **II. MODELE PREDICTIF ISSU DE LA THEORIE DES PYRAMIDES**

### **II.1. Démarche retenue**

Nous avons vu, dans le chapitre précédent, que la géométrie de la tête de découpe présentait des différences d'angles d'inclinaison des buses par rapport à l'axe vertical de rotation. Ceci implique que les saignées sont inclinées dans la matière, avec une empreinte sur la surface de la pièce liée à la cinématique de la tête.

Cette forme est le résultat de la combinaison d'un mouvement de rotation de la buse, positionnée sur un rayon A-M, et du mouvement d'avance de la tête suivant l'axe Ox. (Fig. 4.1.)

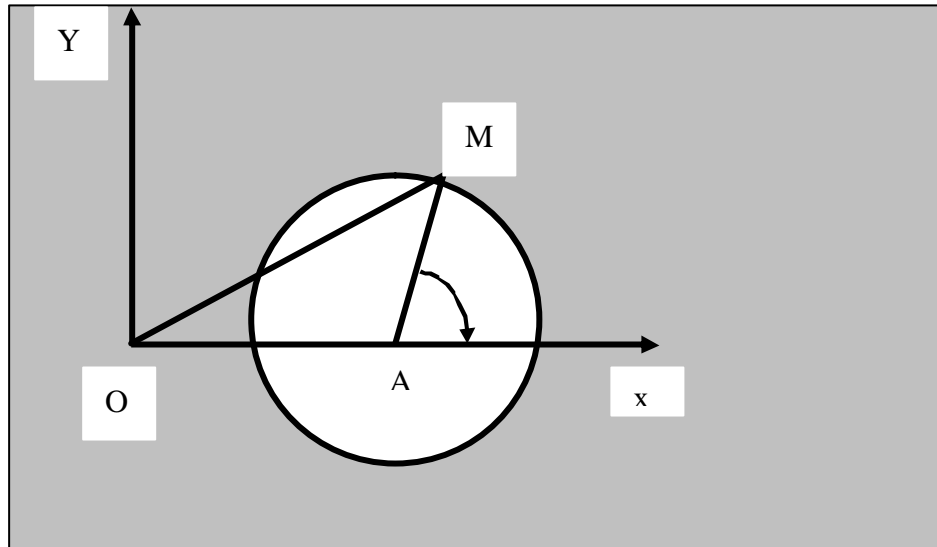


Fig. 4.1. : Modélisation cinématique de la trajectoire d'une buse

La trajectoire du point M s'écrit de la façon suivante :

- Pour le mouvement d'avance suivant l'axe x nous avons :

$$V_a = V_0 * \dot{x} \quad (4.1)$$

- Pour le mouvement de rotation autour de l'axe z nous avons :

$$V_r = r\omega * \vec{e}_q \quad (4.2)$$

Après transformation géométrique (changement de base) nous avons :

$$V_r = r\omega \sin \omega t * \vec{x} - r\omega \cos \omega t * \vec{y} \quad (4.3)$$

Le mouvement de la buse se décomposant en deux mouvements, nous avons :

$$V = V_r + V_a \quad (4.4)$$

La position des points est donnée par :

$$X = \int_0^t V dt \quad (4.5)$$

Ce qui va donner pour une seule buse :

$$X = (V_a t + (r \cos \omega t - 1)) \vec{x} + r \sin \omega t \vec{y} \quad (4.6)$$

Cette équation donne, en utilisant le logiciel de calcul Matlab, le tracé suivant, pour  $r=8$  mm,  $V_o=60$  m / min et  $\omega=6,3$  rad / s (Fig. 4.2.).

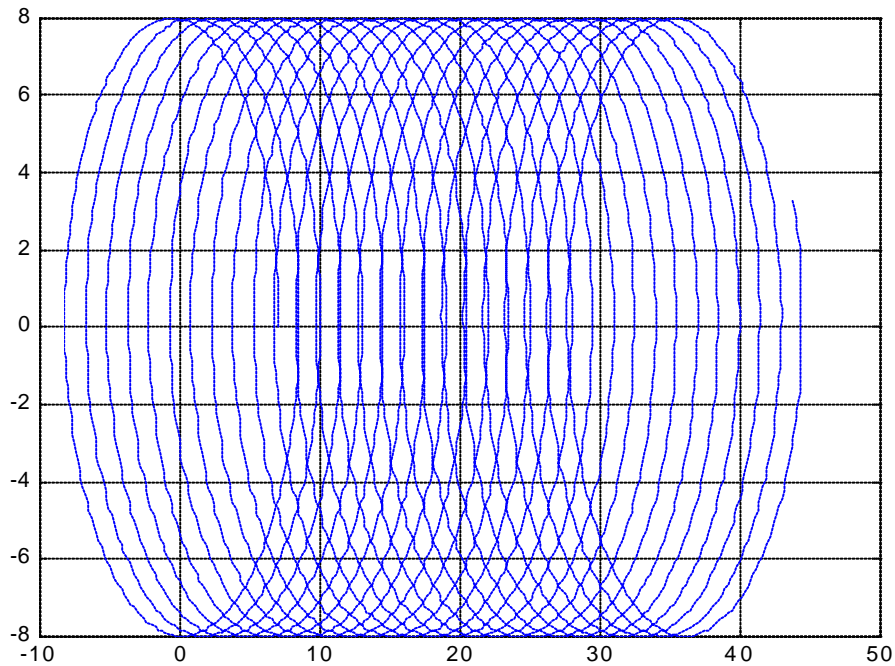


Fig.4.2. : représentation graphique de la trajectoire d'une buse

Pour un ensemble de quatre buses, objet de la tête rotative que nous utilisons dans cette étude, les trajectoires s'écrivent de la façon suivante :

Nous avons :

$$\vec{OM} = \vec{OA} + \vec{AM} \quad (4.7)$$

Avec  $\vec{OA} = V_a t \vec{x}$  et  $\vec{AM} = r \cos \mathbf{q} \vec{x} + r \sin \mathbf{q} \vec{y}$

Ceci amène :

$$\vec{OM} = (V_a t + r \cos \mathbf{q}) \vec{x} + r \sin \mathbf{q} \vec{y} \quad (4.8)$$



Nous avons par ailleurs :

$$\mathbf{q} = \mathbf{wt} + \mathbf{j} \quad (4.9)$$

Et

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{pour(1)} \Rightarrow \mathbf{j} = \mathbf{p} \\ \text{pour(2)} \Rightarrow \mathbf{j} = \frac{\mathbf{p}}{2} \\ \text{pour(3)} \Rightarrow \mathbf{j} = 0 \\ \text{pour(4)} \Rightarrow \mathbf{j} = -\frac{\mathbf{p}}{2} \end{array} \right. \quad \text{Ce qui donne :}$$

- (1) : désigne la première buse.                      (3) : désigne la troisième buse.  
 (2) : désigne la deuxième buse.                      (4) : désigne la quatrième buse.

D'où

$$\left\{ \begin{array}{l} \overline{OM}_1 = [Vt + r \cos(\mathbf{wt} + \mathbf{p})] * \vec{x} + [r \sin(\mathbf{wt} + \mathbf{p})] * \vec{y} \\ \overline{OM}_2 = [Vt + r \cos(\mathbf{wt} + \frac{\mathbf{p}}{2})] * \vec{x} + [r \sin(\mathbf{wt} + \frac{\mathbf{p}}{2})] * \vec{y} \\ \overline{OM}_3 = [Vt + r \cos(\mathbf{wt})] * \vec{x} + [r \sin(\mathbf{wt})] * \vec{y} \\ \overline{OM}_4 = [Vt + r \cos(\mathbf{wt} - \frac{\mathbf{p}}{2})] * \vec{x} + [r \sin(\mathbf{wt} - \frac{\mathbf{p}}{2})] * \vec{y} \end{array} \right. \quad (4.9)$$

La représentation graphique de ces équations, par le biais de Matlab, donne le schéma de la page suivante (Fig. 4.3.) :

Avec :

$r = 8 \text{ mm}$  pour toutes les buses,

$V_0 = 10 \text{ mm / min}$

$w = 6,3 \text{ rd / s}$

et un intervalle de temps de  $0,5 \text{ s}$

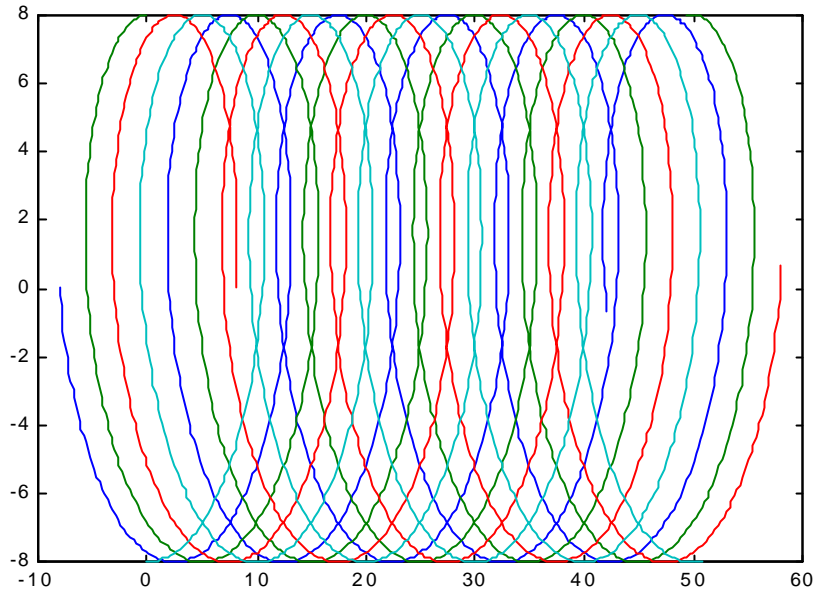


Fig. 4.3. : Représentation graphique des trajectoires de buses d'une tête 4 jets

Comme nous l'avons indiqué au début du paragraphe, sur chacune de ces trajectoires, la buse génère une saignée inclinée dans la matière, dans le sens X+ pour la première partie de la rotation et dans le sens X- pour les 180 ° restant.

Le croisement de ces différentes saignées, diversement inclinées, et le faible pas entre chaque passage permet à la matière de se détacher sous formes de petites pyramides inversées, comme schématisé dans la figure suivante (Fig.4.4.).

Cette démarche se rapproche en partie de celle retenue par Gordine [Gor.(1997)] dans sa thèse, où il a étudié les interactions entre sillons » normalement parallèles » de façon à prédire les conditions de tir assurant la séparation des redans les uns des autres.

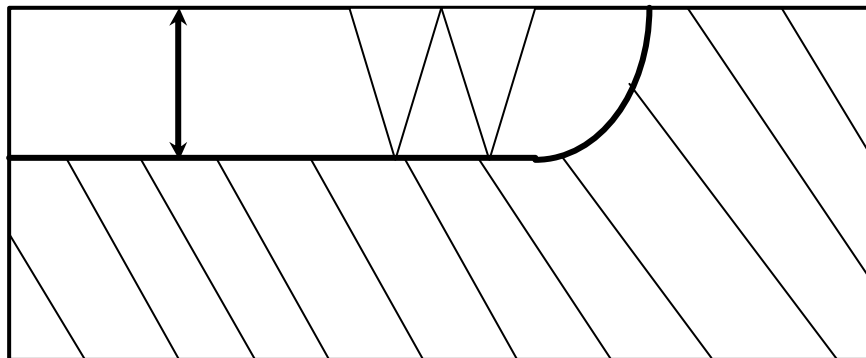
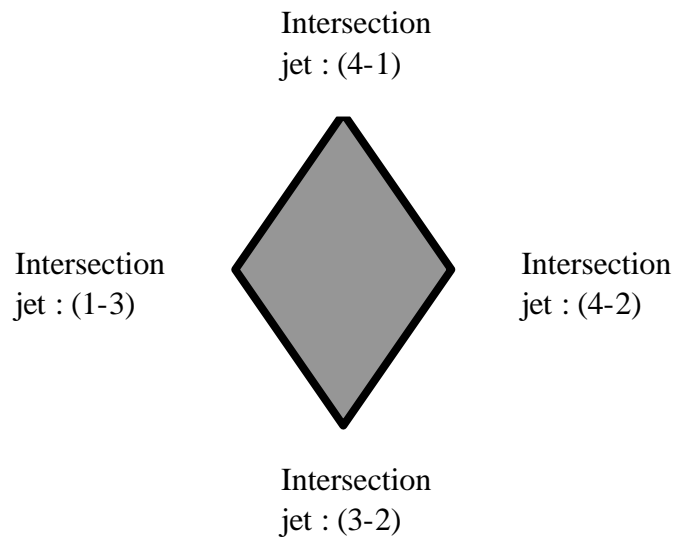


Fig. 4.4. : Schéma représentatif de la théorie des pyramides

## II.2. modélisation des pyramides

### II.2.1. calcul des coordonnées de la base des pyramides

De façon à prédire l'enlèvement de matière, nous étudions la géométrie des pyramides générées par le passage de 4 jets. La base de la pyramide se représente de la façon suivante :



Le calcul des coordonnées des points d'intersection s'effectue de la façon suivante :

*Intersection (1-3) :*

Nous avons :

$$V_a * t_1 + r \cos(\mathbf{w}t_1 + \mathbf{p}) = V_a * t_2 + r \cos(\mathbf{w}t_2) \quad (4.10)$$

Et

$$r \sin(\mathbf{w}t_1 + \mathbf{p}) = r \sin(\mathbf{p}t_2) \quad (4.11)$$

L'équation (4.11) permet d'écrire :

$$\mathbf{w}t_1 + \mathbf{p} = \mathbf{w}t_2 + 2k\mathbf{p} \quad (4.12)$$

$$\mathbf{w}t_1 + \mathbf{p} = -\mathbf{w}t_2 + (2k+1)\mathbf{p} \quad (4.13)$$

On remplace (4.12) dans (4.10) :

$$Vt_1 - r \cos \omega t_1 = vt_1 + \frac{Vp}{w}(1 - 2k) - r \cos \omega t_1 \quad (4.14)$$

Ce qui est une solution impossible.

On remplace (4.13) dans (4.10) :

On obtient :

$$r \cos \omega t_1 - Vt_1 = -k \frac{Vp}{w} \quad (4.15)$$

Et

$$t_2 = -t_1 - \frac{p}{w} + (2k + 1) \frac{p}{w} \quad (4.16)$$

*Intersection (4-1) :*

En procédant avec la même manière on trouve :

$$\sqrt{2}r \cos(\omega t_1 - \frac{p}{4}) - 2V_a t_1 = -(\frac{V_a p}{2w} + 2k \frac{V_a p}{w}) \quad (4.17)$$

$$t_2 = -t_1 - \frac{p}{w} + \frac{p}{2w} + (2k + 1) \frac{p}{w} \quad (4.18)$$

*Intersection (4-2) :*

$$2V_a t_1 - 2r \sin(\omega t_1) = \frac{p * V_a}{w} (2k + 1) \quad (4.19)$$

$$t_2 = -t_1 + (2k + 1) \frac{p}{w} \quad (4.20)$$

*Intersection (3-2) :*

$$2V_a t_1 - 2r \sin(\omega t_1) = \frac{V_a p}{w} (\frac{1}{2} - 2k) \quad (4.21)$$

$$t_2 = -t_1 - \frac{p}{2w} + (2k + 1) \frac{p}{w} \quad (4.22)$$

La résolution avec Matlab, en utilisant un algorithme de résolution numérique de type  $f(x)=0$ , donne :

Pour (1-3) :

$$t_1 = 0.2077$$

Pour (4-1) :

$$t_1 = 0.3185$$

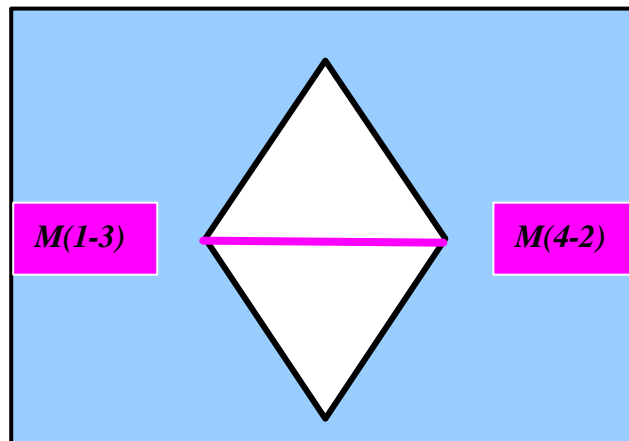
Pour (4-2) :

$$t_1 = 0.4570$$

Pour (3-2) :

$$t_1 = 0.4354$$

il devient alors possible, de calculer les points d'intersection.



Le calcul des coordonnées des points d'intersection (1-3) et (4-2) nous permet de déterminer la longueur du segment  $M(1-3)M(4-2)$  :

Soit :

$$\overrightarrow{OM}_{1-3} = -0.009\vec{x} - 7.72\vec{y}$$

$$\overrightarrow{OM}_{4-2} = 2.488\vec{x} - 7.72\vec{y}$$

On remarque qu'on a la même coordonnée au niveau de l'axe des ordonnées. L'hypothèse concernant l'assimilation de l'élément géométrique à un losange est donc acceptable.

En fin nous avons :

$M(1-3)M(4-2)=2.497\text{mm}$

Ceci permet, en considérant l'ensemble des trajectoires de toutes les buses, de calculer le volume de matière enlevée.

## II.2.2. Calcul du volume de matière enlevée

Les hypothèses retenues sont :

- La forme générale de chaque élément enlevé est une pyramide,
- Les profondeurs atteintes en découpe correspondent au passage d'un seul jet (identification de la profondeur de découpe avec la longueur du coté de la pyramide),
- La géométrie des pyramides est constante. Cette hypothèse est fautive, la cinématique même des buses la rend en effet impossible. Pour pallier en partie ce problème, nous avons sectorisé la surface balayée par les jets en plusieurs zones, avec en particulier une zone centrale peu attaquée et des zones latérales, identiques et fortement soumises aux différents jets.

Le volume d'une pyramide s'écrit sous la forme :

$$V = \frac{1}{3} Bh \quad (4.23)$$

avec B : aire du losange, variable selon les zones dans lesquels on effectue le calcul.

En discrétisant, sur chacune des zones sélectionnées, une fenêtre de largeur X par Y traversée par les différents jets pendant le passage de la tête, et en réalisant sous Matlab les calculs présentés précédemment, il est possible d'obtenir une visualisation du volume de matière enlevé.

Cette approche se heurte malgré tout à un certain nombre de problèmes, techniques pour le calcul d'une part, mais surtout de principe, en particulier à cause des hypothèses retenues, sur lesquelles il semble nécessaire de réfléchir avant d'aller plus loin.

Deux points semblent particulièrement critiquables :

- L'hypothèse de non déformation de la matière,
- L'hypothèse de découpe de saignées parallèles ou presque, se rejoignant en profondeur,

D'autre part, la théorie des pyramides est assez facile à appréhender, en raisonnant sur une surface initialement plane, mais dans notre cas, cette surface est évolutive dans le temps et donc difficile à définir géométriquement.

L'hypothèse retenue de correspondance entre la profondeur atteinte par un jet, et longueur du coté de la pyramide est grossière. Elle est fausse la plupart du temps.

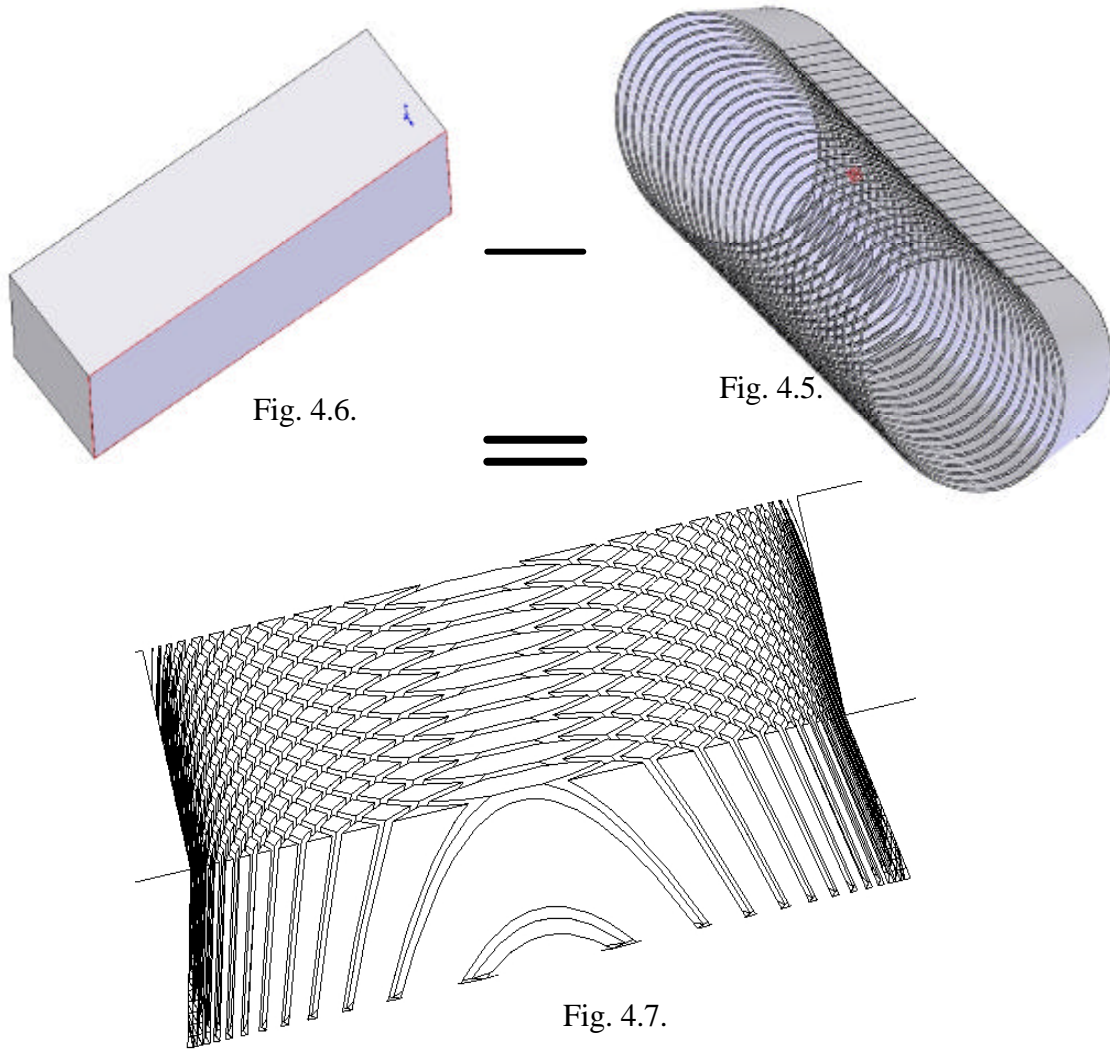
Ceci nous amène à rechercher jusqu'où il est acceptable de retenir cette approche.

### II.3. Analyse des hypothèses retenues pour notre modélisation

#### II.3.1. Modélisation en 3 D de l'enlèvement de matière

Pour préciser les deux premières hypothèses de notre théorie, nous avons réalisé une première modélisation en 3D de l'échantillon soumis aux différents jets inclinés.

Cette modélisation est réalisée à l'aide du logiciel de conception Solidworks, qui permet des représentations 3D. Les représentations ci-après sont obtenues par soustraction : La trajectoire du jet créée (Fig. 4.5.), on la soustrait à un bloc de matière plein (Fig. 4.6.) on obtient alors la représentation désirée (Fig. 4.7.).



Les résultats suivants (Fig. 4.8.) sont obtenus par application du modèle, avec les hypothèses suivantes :

- Diamètre buse : 0,2 mm et inclinaison du jet :  $8^\circ$
- Rayon de rotation de cette buse : 12 mm
- Profondeur de saignée : 10 mm
- Vitesse d'avance de la buse : 300 mm / min

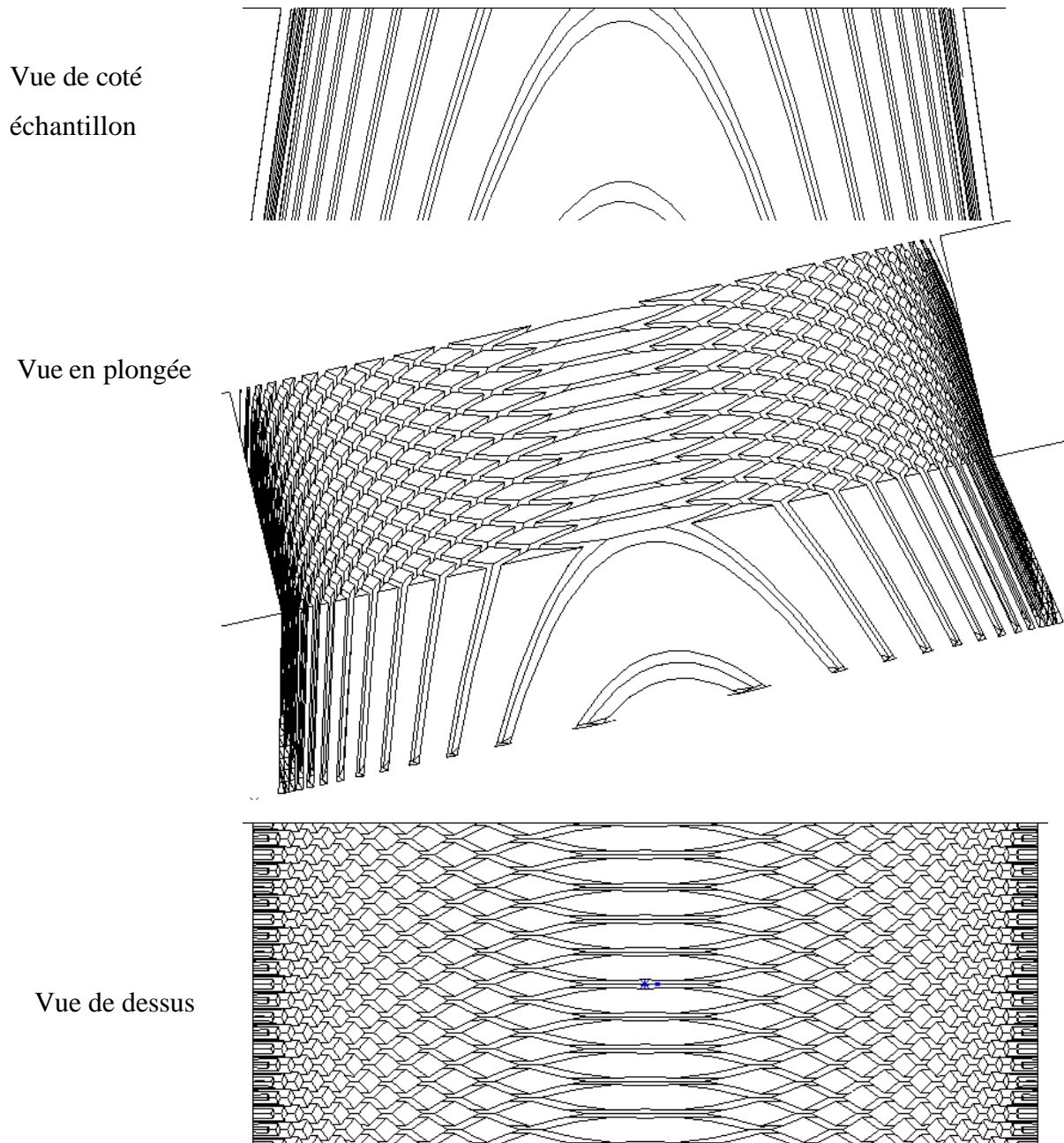


Fig. 4.8. : Modélisation 3D de l'action de la tête rotative sur l'éprouvette



Sur le dernier schéma de Fig. 4.8., nous retrouvons bien la répartition inégale du nombre de pavés (losanges), représentant la base des pyramides inversées. Il est possible de calculer, sur l'ensemble de la largeur de la saignée, la répartition du nombre de ces losanges dans  $1 \text{ mm}^2$ , en fonction de la distance de cette unité de surface avec l'axe de la tête rotative. Ceci nous permettra une approche plus fine que celle consistant à sectoriser la saignée en plusieurs zones. Ceci est représenté dans la figure suivante (Fig.4.9.) :

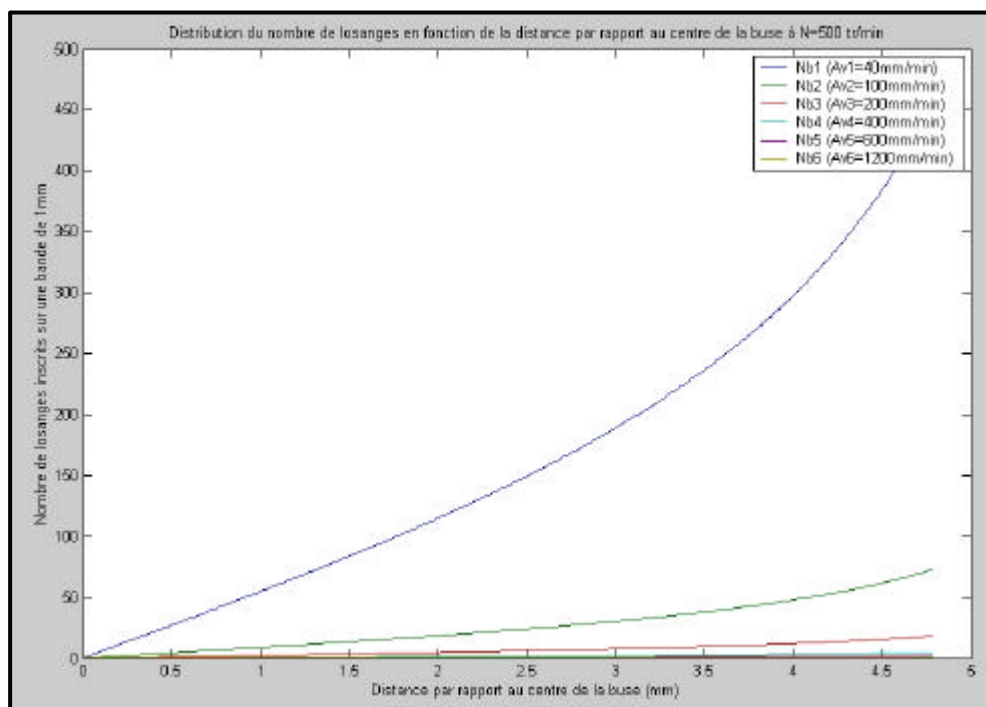


Fig.4.9. : distribution du nombre de pyramides sur la section de la saignée

D'autres distributions, pour différentes vitesses de rotation de la tête, sont disponibles en annexe 5.1.

A la vue de ces dernières représentations (Fig.4.8. en particulier), nous constatons que la matière ne se détache pas de l'éprouvette, et que la pièce est découpée en fines lamelles de formes variées. Nous avons déjà vérifié ceci dans le chapitre précédent, lorsque le pas entre 2 jets, est supérieur à 0,5 mm.

Ce modèle est corroboré par l'expérimentation puisque nous obtenons le résultat suivant (Photo. 4.1.).

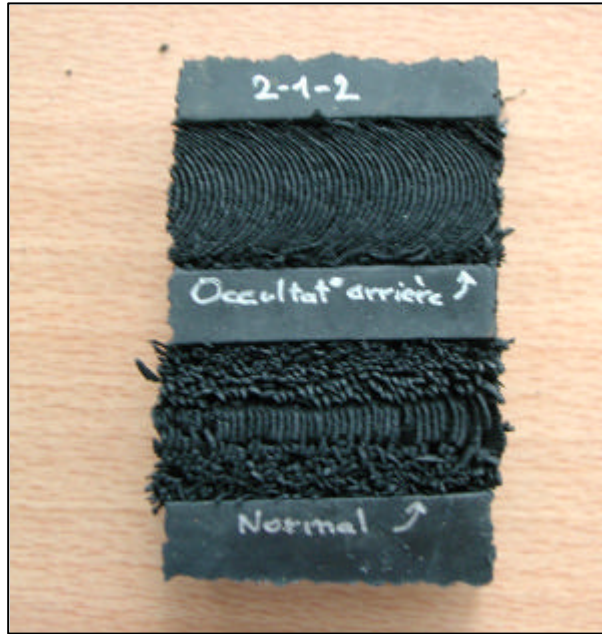


Photo.4.1. : Essai avec buse rotative à 1 jet avec / sans occultation arrière

### II.3.2. Analyse de l'hypothèse de non déformation

Par ailleurs, avec le modèle de Graham et Wilkins, calculons les efforts latéraux exercés sur les surfaces de la saignée pendant le passage d'un jet. Cet effort, variable en fonction de la profondeur atteinte nous donne, pour un coefficient  $C_f$  de 0,042 les résultats suivants (Fig. 4.10.) :

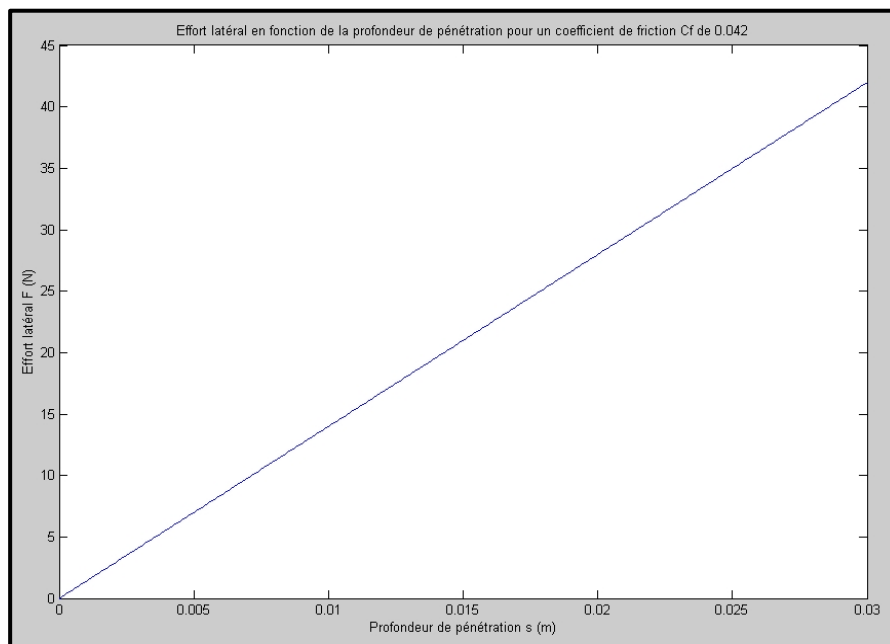


Fig. 4.10. : Effort latéral dans la saignée.

Pour une profondeur de saignée de 5 mm, un effort latéral de 7 N. est obtenu. Cet effort est faible, mais il est appliqué à une lamelle de caoutchouc de moins de 0,5 mm d'épaisseur. Il apparaît évident que l'hypothèse de non déformation retenue dans notre étude est loin d'être réaliste.

Enfin, si nous nous plaçons dans des conditions classiques d'utilisation d'une tête rotative à 4 jets, pour paramètres :

- Diamètre buse de 0,2 mm,
- Vitesse de rotation de 1000 trs / min,
- Vitesse d'avance de 200 mm / min,

nous avons un pas, entre chaque saignée réalisée avec la même buse, de 0,2 mm, ceci sans tenir compte du passage entre temps des 3 autres buses. Il y a donc superposition, pour partie, de la trace de chacune des buses, ce qui rend caduque l'approche par la théorie des pyramides.

#### **II.4. Conclusion quant à la théorie des pyramides**

Les travaux réalisés dans cette approche se heurtent à un certain nombre de limites, liées au matériau d'une part, et d'autre part aux conditions d'utilisation de la tête rotative, dont la vitesse de rotation est particulièrement élevée par rapport à sa vitesse de déplacement. Ces limites auraient pu être mise en avant dès la mise en place des hypothèses et donc rendre inutile la description, bien que incomplète dans notre document, de cette approche.

Nous pensons malgré tout que celle-ci peut se justifier dans certains cas, en particulier lorsque nous pouvons avoir des vitesses relatives plus réduites entre rotation et avance de la tête, dans le cas par exemple de tête rotatives de fort diamètre permettant de traiter des pièces de grandes dimensions, ou pour des angles d'inclinaison de buses plus importants, comme dans l'application de démantèlement des pneumatiques, présentée dans le chapitre 5.

Dans le cas présent, une autre approche, plus globale et déjà évoquée en introduction à ce chapitre, est envisageable. Elle consiste à intégrer cet aspect recouvrement des saignées dans le modèle de découpe déjà utilisé.

## **III. MODELE PREDICTIF GLOBAL**

### **III.1. Démarche retenue**

Nous venons de voir que la multi-exposition de l'échantillon, aux différentes buses, est telle qu'il y a en partie recouvrement des saignées générées par chaque jet. Ces traces se croisent, de façon répétée, selon la cinématique de la tête rotative. Chaque jet amplifie le travail du précédent, creusant toujours plus profondément la pièce et détachant au passage des copeaux de matière, selon ses déformations localisées. Les angles d'inclinaison des buses ont également leur importance dans la séparation des granulés de caoutchouc.

Nous allons donc, en nous appuyant sur l'utilisation du modèle de découpe de Graham et Wilkins, ainsi que sur le calcul des trajectoires de buses présenté en II.1., chiffrer l'influence de ce recouvrement de façon à mettre en place un modèle prédictif de la section et du débit de matière enlevée par l'ensemble des buses de la tête.

### **III.2. Modélisation du recouvrement**

#### **III.2.1. Calcul de la densité de passage des jets sur la surface**

L'objectif est de déterminer un facteur dit «de recouvrement », fonction de la densité de passage des jets en un point de la pièce, et permettant de corriger le modèle de découpe utilisé pour la profondeur atteinte par les jets. Ceci permettra, en l'intégrant sur toute la largeur d'exposition de la pièce, de calculer la section réelle de matière enlevée.

La seule hypothèse prise en compte sera que, dans la zone de  $1 \text{ mm}^2$ , la courbure des saignées est négligeable. Elles sont donc assimilées à des portions de droite.

Pour une tête à une seule buse, les données de départ sont les suivantes :

R : Distance de la buse au centre de la tête,

r : Distance entre l'axe de la tête et le point pour lequel on souhaite calculer la densité de passage des jets,

$A_v$  : Avance en mm/min,

$N$  : Vitesse de rotation en tours / min.

Le principe de cette approche peut se schématiser de la façon suivante (Fig. 4.11.) :

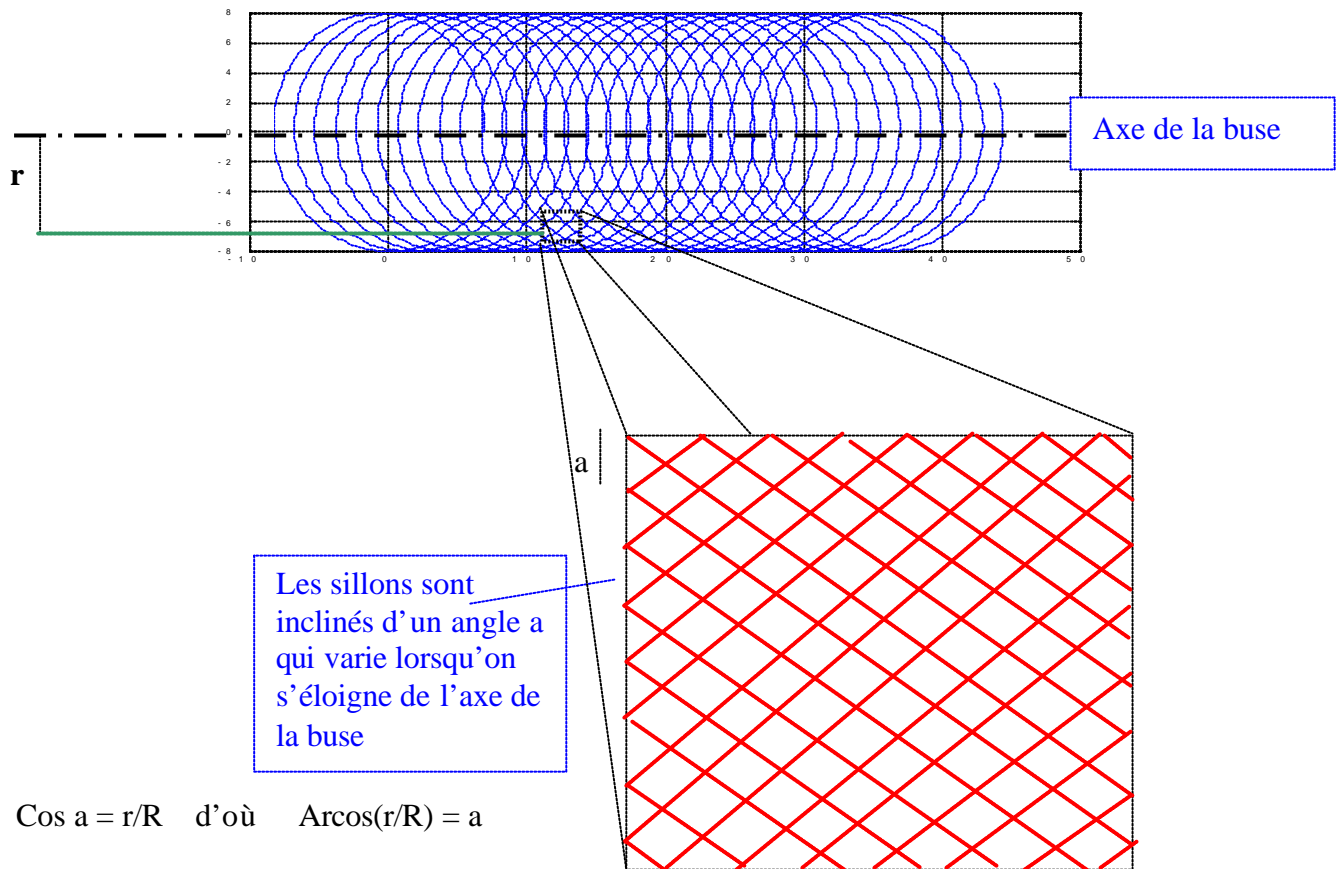
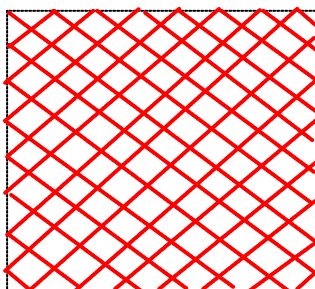


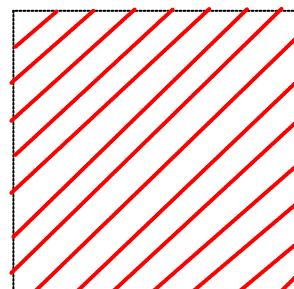
Fig. 4.11. : Principe d'approche de la densité d'exposition

Avec  $a =$  Avance en mm/tour soit  $a = A_v / N$

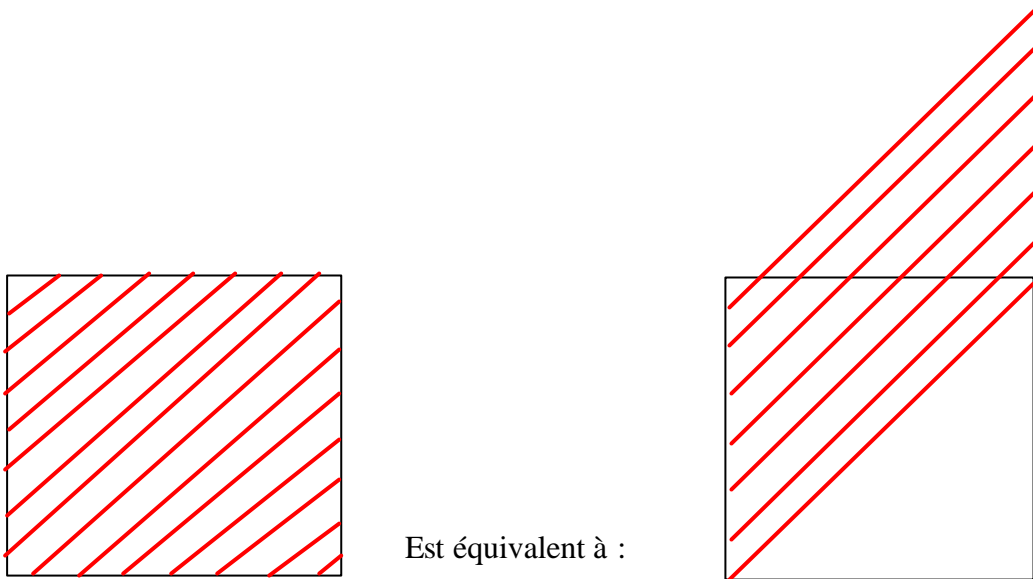
Nous calculons la longueur cumulée des sillons inclinés de l'unité de surface. Avec les hypothèses simplificatrices retenues, liées à la répartition des sillons, nous avons donc :



Equivalent à 2 fois :



De même nous retiendrons que :



En nommant  $a$  le pas des sillons, et en considérant une surface unitaire, nous avons 2 fois  $1/a$  traits et chaque trait mesure  $1/\sin(a)$ .

Or nous avons :

$$1/a = N/A_v \text{ et } a = \text{Arcos}(r/R) \quad (4.24)$$

La longueur totale des sillons dans un  $\text{mm}^2$  qui s'écrit :

$$L = 2 \cdot \frac{N}{A_v} \cdot \frac{1}{\sin(\text{Arc cos}(\frac{r}{R}))} \quad (4.25)$$

En utilisant Matlab (annexe 5.2.), il est alors possible d'obtenir le tracé suivant (Fig. 4.12.), pour différentes conditions de tir.

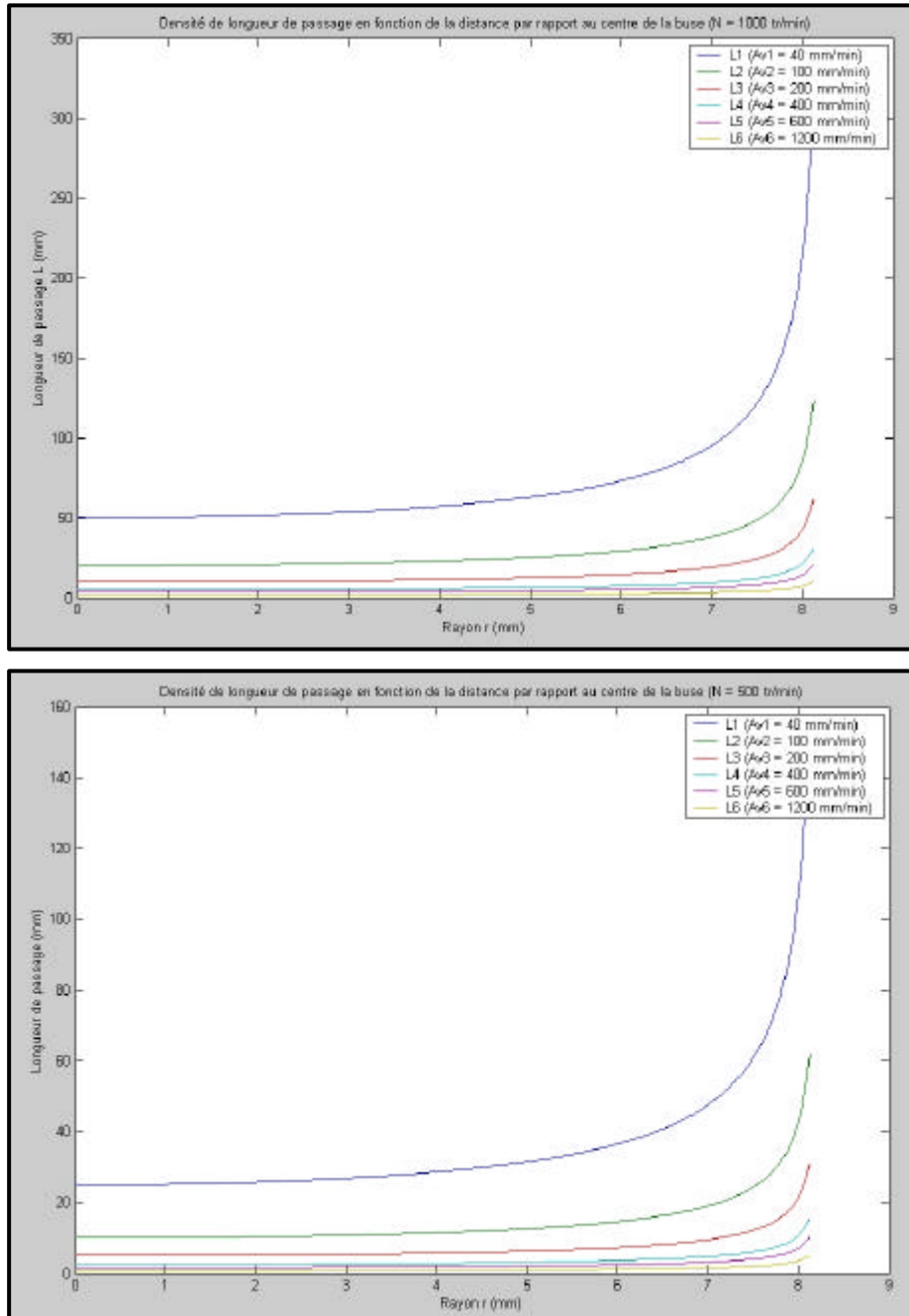


Fig. 4.12. : Exemple de courbes de densité pour différentes conditions de tir

Cette notion de densité, basée sur une longueur par  $\text{mm}^2$ , peut parfaitement être additionnée à celles issues d'autres jets. Le passage à une buse 4 jets ne pose donc pas de problème de principe.

Nous obtenons alors des courbes se superposant de la façon suivante (Fig. 4.13.) :

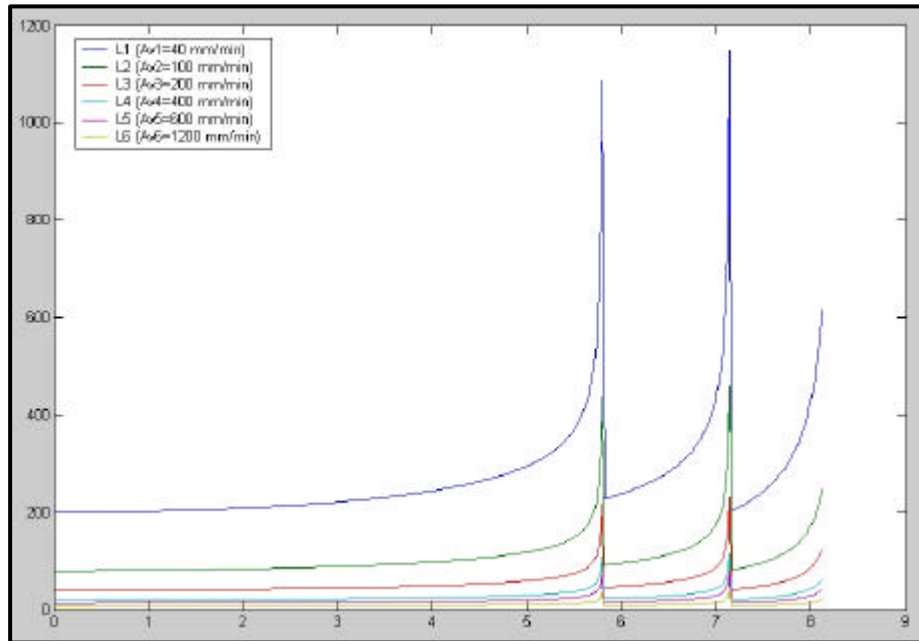


Fig. 4.13. : Densité de passage pour 4 jets à  $N = 1000$  tr. / min.

Ces courbes, présentées pour différentes vitesses d'avance de la tête, font bien évidemment apparaître des pics de densité, révélateurs de la non homogénéité de la répartition énergétique sur la surface traitée, problème déjà évoqué à plusieurs reprises.

### III.2.2. Calcul du facteur de recouvrement

Le facteur de recouvrement représente le coefficient d'augmentation de la profondeur atteinte dans la matière, lorsque en un point donné, celle-ci est soumise à l'action de plusieurs jets. Ce facteur est donc lié à la densité de passage définie dans le paragraphe précédent.

La procédure d'obtention de ce facteur est la suivante : Pour l'ensemble de nos éprouvettes, une cartographie de la saignée est réalisée avec la buse rotative, avec un relevé de la profondeur atteinte localement en chacun des points de la section. Ce relevé est réalisé par l'intermédiaire d'une fine pointe métallique, appuyé sur le fond du sillon réalisé par les buses dans l'échantillon.



Cette valeur est comparée à celle obtenue par calcul en appliquant le modèle de Graham et Wilkins, calé par rapport au comportement de nos buses (coefficient de réduction de 0,5), comme présenté en fin de chapitre précédent. Le ratio, entre profondeur du sillon et profondeur théorique, donne directement le facteur de recouvrement. Nous avons par exemple, pour une profondeur théorique de 10 mm et une profondeur mesurée de 20 mm, un facteur de recouvrement de 2.

La précision de ces mesures, bien que réalisées de la façon la plus rigoureuse possible (montage semi-automatisé), est évidemment limitée par une géométrie du fond des saignées des pièces, assez irrégulière. Ceci sera abordé ultérieurement à l'occasion de la discussion sur la précision et la robustesse du modèle.

Les résultats sont représentés de la façon suivante (Fig.4.14.)

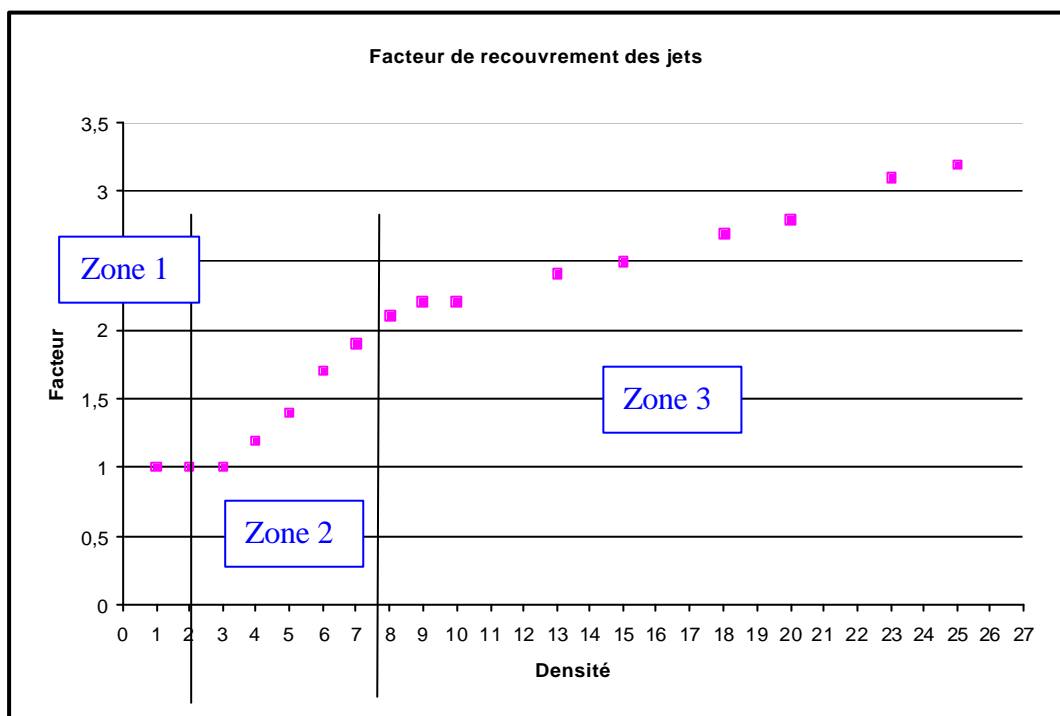


Fig. 4.14 : Evolution du facteur de recouvrement en fonction de la densité de passage.

Sur cette courbe trois zones sont distinguées :

- Zone 1 : La densité n'est pas assez forte pour permettre le recouvrement des jets, le facteur vaut alors 1.
- Zone 2 : Le recouvrement est possible et le facteur d'amplification augmente alors vite avec la densité.

- Zone 3 : Le recouvrement est encore plus important mais cette fois l'amplification semble ralentie. Ceci est peut être dû aux copeaux qui ne se décrochent pas et qui perturbent la découpe.

A l'intérieur de ces trois zones de la courbe, les points sont presque alignés et nous allons ainsi paramétrer cette courbe selon trois droites (Fig. 4.14).

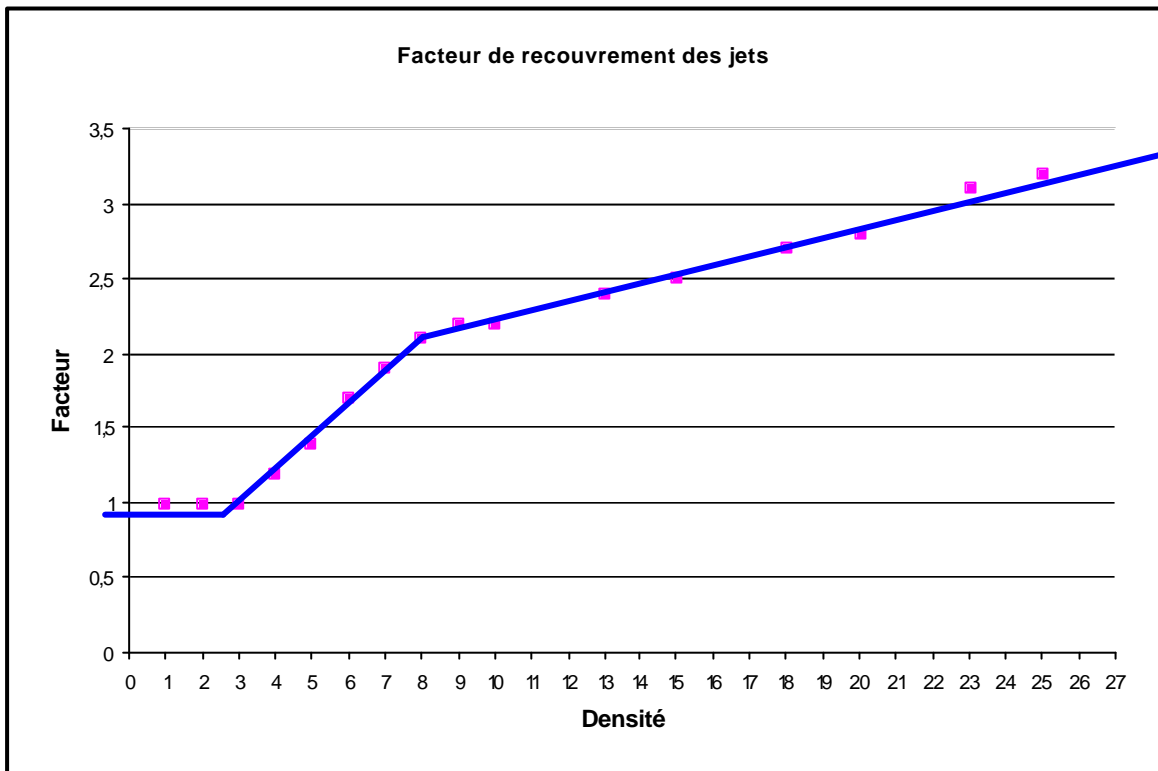


Fig. 4.14. : Linéarisation du facteur de recouvrement

Cette courbe, réalisée à partir de l'ensemble des essais, est généralisable à tout type de tête rotative, quelle que soit le nombre de buses et leur répartition sur le diamètre de la tête, sous réserve que les angles d'incidence des jets restent faibles ( $< 10^\circ$ ). Pour des angles supérieurs, les modes d'enlèvement de matière risquent d'être différents (retour possible dans ce cas à la théorie des pyramides). Bien évidemment, pour des vitesses d'avance très importantes, générant des pas entre sillons suffisamment grands pour qu'il n'y ait pas de séparation des lamelles de matière par rapport à la pièce, cette approche n'a plus grande signification.

A partir de la densité de passage et du facteur de recouvrement, il est possible maintenant de mettre en place un modèle d'enlèvement de matière.

### **III.3. Modélisation de l'enlèvement de matière**

La démarche retenue consiste à utiliser les courbes de densité et de recouvrement sous forme d'abaques. L'objectif est de déterminer, pour des conditions de tir définies, le facteur de recouvrement en tout point de la section de la saignée. Ceci permettra ensuite de calculer la profondeur atteinte, avec le modèle de Graham et Wilkins. En intégrant cette profondeur sur toute la largeur de la pièce exposée au jet, la section de matière enlevée est obtenue. Ceci va être explicité à partir d'un exemple.

#### **III.3.1. Essai avec 1 jet sur tête tournant à 1000 tr. / min et V avance de 200 mm / min**

Le principe de calcul est le suivant :

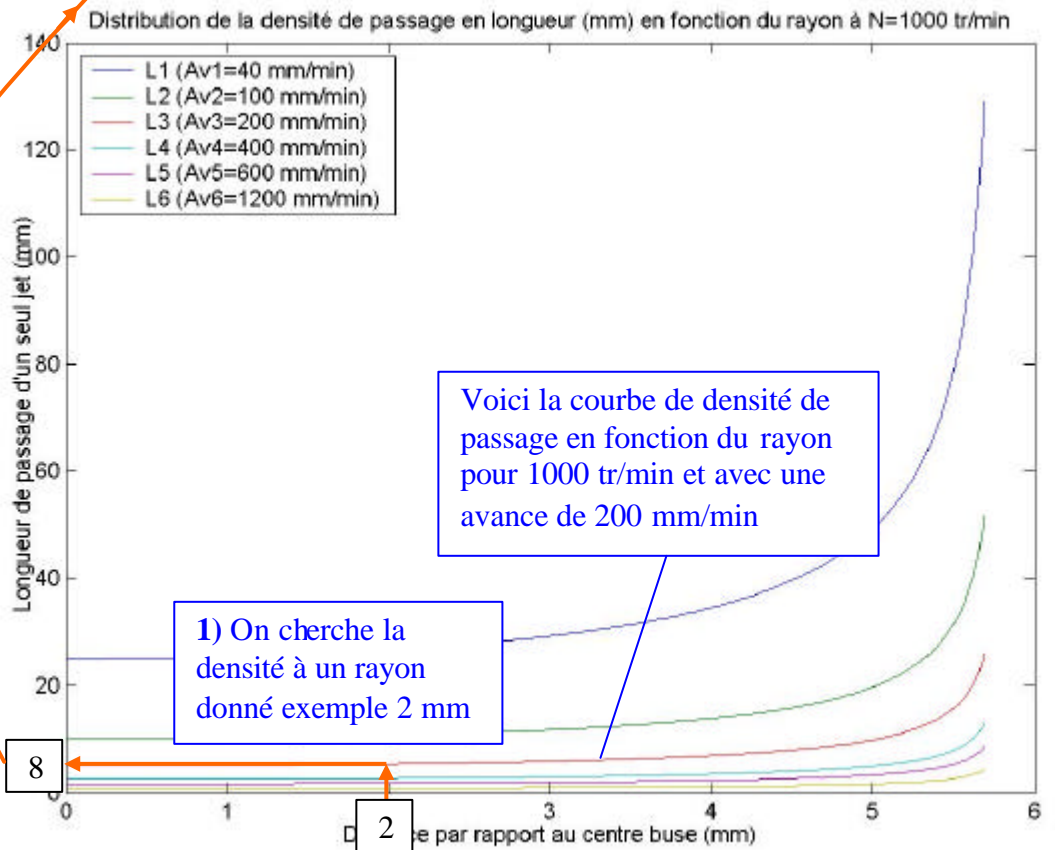
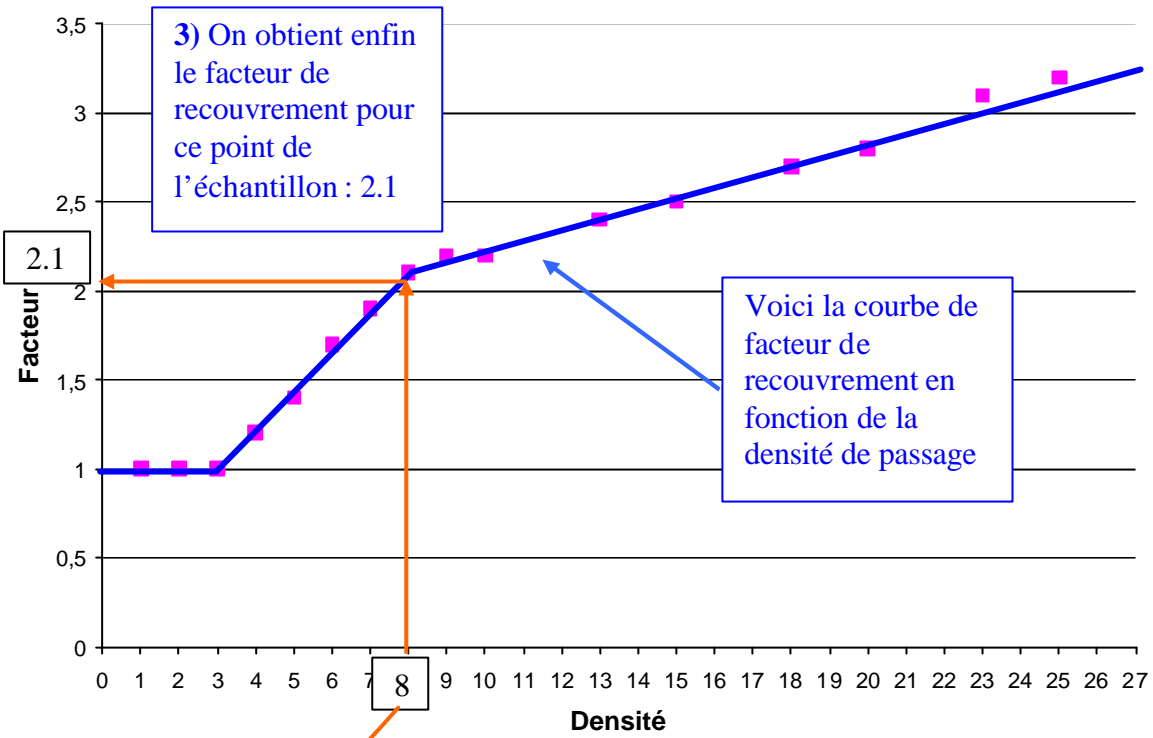
*-Première étape* : recherche de la densité, sur le rayon de la buse considérée, (2 mm dans le cas présent). Ici, pour une vitesse d'avance de 200 mm / min une valeur de 8 est obtenue.

*-Deuxième étape* : report de cette densité sur le graphe de recouvrement

*-Troisième étape* : Détermination du facteur de recouvrement, avec la courbe définissant ce facteur en fonction de la densité de passage. Nous trouvons ici 2,1.

Ces trois premières étapes sont illustrées dans la figure page suivante (Fig. 4.15.)

Facteur de recouvrement des jets



2) On reporte cette densité sur le graphique donnant le facteur de recouvrement

Fig. 4.15.

En réitérant cette démarche, en tous point de la largeur de la pièce exposée aux jets, nous obtenons les résultats suivants (Fig. 4.16.) sont obtenus.

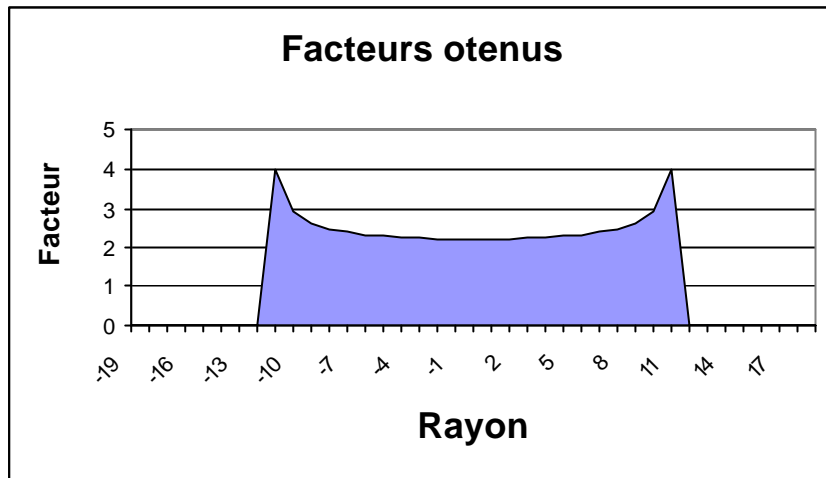


Fig.4.16. : Répartition des facteurs de forme obtenus sur la section de la pièce

-*Etape 4*: Le modèle de calcul de Graham et Wilkins, appliqué aux conditions de découpe retenues pour la buse utilisée nous donne, en tout point de la section de la pièce, une profondeur théorique atteinte dans la matière, sans amplification. Elle est représentée dans le graphe suivant (Fig. 4.17.)

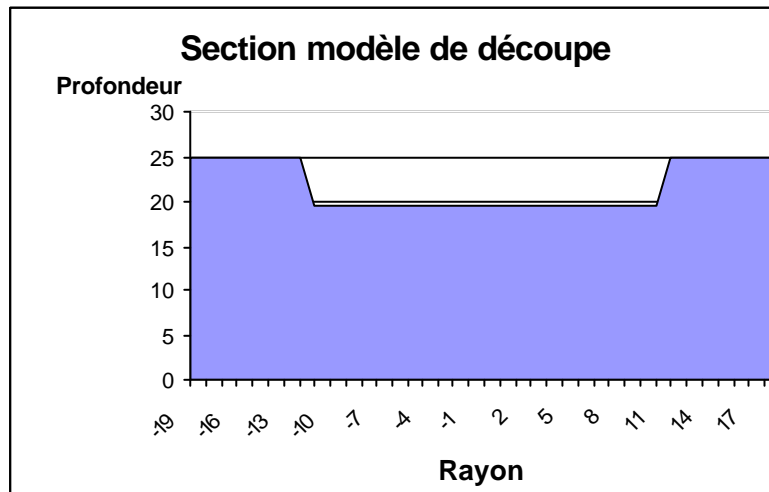


Fig. 4.17. : Section obtenue par le modèle de Graham et Wilkins

-*Etape 5* : En multipliant, point par point, la profondeur du modèle de découpe (Fig.4.17.) par les facteurs d'amplification (Fig.4.16.), nous obtenons la section finale de la matière, pour une vitesse d'avance de 200 mm / min, N=1000 tr. / min, 1 seule buse de 0,2 mm de diamètre alimentée par de l'eau à 2400 bars (Fig. 4.18.).

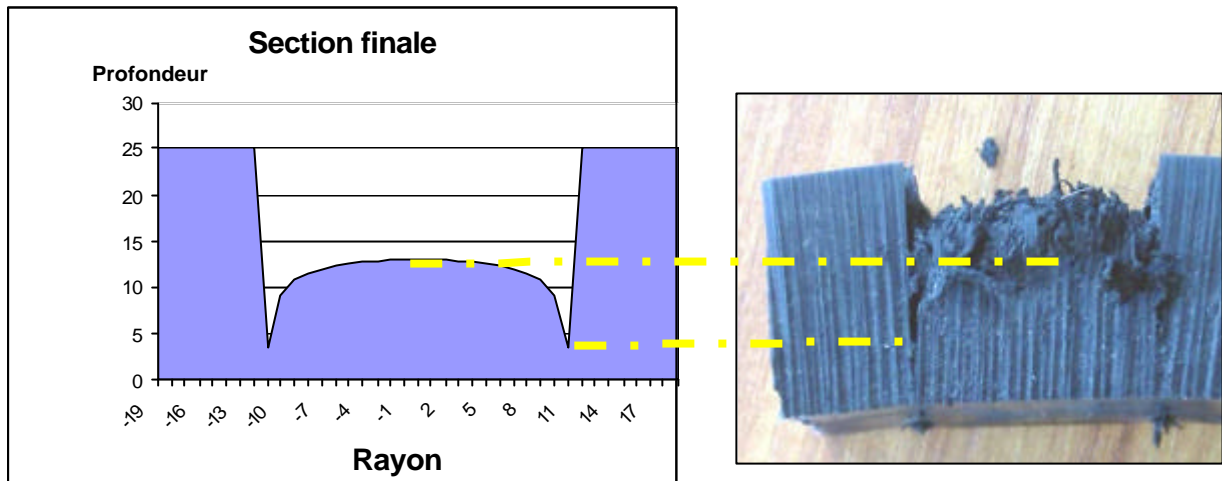


Fig. 4.18. : Section calculée de matière enlevée et photo essai réel

### III.3.2. Analyse des résultats

Les premiers résultats de simulation, présentés fig. 4.18., correspondent assez bien à la réalité pour le profil global. Il est par contre un peu plus difficile de quantifier correctement le volume de matière enlevée, dans la mesure où les copeaux restant adhérents au fond de la saignée polluent la précision de la mesure de la profondeur. Dans tous les cas, le calcul donne la profondeur atteinte par les jets, et non la profondeur sur laquelle la matière est complètement enlevée. Il faut ensuite multiplier l'aire de la section calculée par la vitesse d'avance de la tête pour obtenir le débit de matière.

En reprenant l'ensemble des essais réalisés avec cette tête rotative, nous avons évalué que le volume de matière réellement enlevée, par rapport à la profondeur maxi atteinte par les différents jets, variait de 60% à 90 %. Cette variation représente la quantité de copeaux ou de lamelles restant accrochés au fond de la saignée. Ils sont particulièrement présents lorsque :

- La vitesse de rotation de la tête est lente,
- Le nombre de buses en service est réduit,
- La vitesse d'avance est élevée.

Ceci permet d'affirmer que ce pourcentage varie avec la densité de jet définie précédemment pour développer le modèle. Il est assez difficile de mettre en place une relation exacte entre cette densité, qui varie selon le point de la section de la saignée où l'on se trouve, et « l'état de surface » local du fond de cette même saignée. La définition mathématique de cet état de surface en est le principal obstacle. En première approximation, nous nous contenterons de définir deux valeurs limites définissant le volume maxi et mini de ce que l'on peut obtenir, correspondant à 60 % et 90 % du volume calculé, dans des conditions de tir normale, c'est-à-dire pour des densités au moins égales à 1 en tout point de la saignée.

Pour valider notre modèle, nous avons effectué une série de calculs et de mesures d'enlèvement de matière dans différentes conditions de tir. Afin d'éviter de réaliser un par un ces calculs un peu fastidieux, et de façon à proposer un modèle automatisé de notre approche, il a été décidé d'écrire les étapes, présentées dans le paragraphe précédent, sous forme d'une feuille de calcul Excel, permettant de tenir compte également de la matière  $m$  se détachant pas de la pièce.

### **III.3.3.logiciel de calcul du profil et du débit de matière**

Nous avons procédé à l'automatisation du calcul des 5 étapes. Ceci nous permet de simuler l'action d'une tête rotative de 1 à 4 jets paramétrables en fonction de :

- Nombre de buses en service,
- Diamètre sur lesquels sont implantés ces buses,
- Inclinaison des jets,
- Pression,
- Vitesse d'avance de la tête.

Il est plus simple de l'illustrer par un exemple dans la suite.

#### **III.3.3.1. cas d'une tête à une seule buse**

Le cas étudié dans le paragraphe précédent est repris, avec les mêmes conditions de tir.

- Les caractéristiques machine sont définies dans la table ci-dessous (Tab. 4.1.):

Pression en sortie (bar)	2400
Avance (mm/min)	600
Vitesse de rotation (tr/min)	1000
distance de tir (mm)	20
Diamètre des saphirs (mm)	0,2

r du jet1 (mm)	8,06
angle du jet 1 (degré)	9,55
Rayon application du jet 1	11,42
Jet utilisé obligatoirement	

r du jet2	8,04
angle du jet 2 en degré	7,26
Rayon application du jet 2	10,59
Jet utilisé ( 0 ou 1)	1

r du jet3	7,00
angle du jet 3 en degré	8,53
Rayon application du jet 3	10,00
Jet utilisé ( 0 ou 1)	1

r du jet4	5,70
angle du jet 4 en degré	5,70
Rayon application du jet 4	6,76
Jet utilisé ( 0 ou 1)	1

Tab. 4.1. : Paramètres machine utilisés

*Remarque* : les buses 2,3 et 4 sont désactivées. (état logique à 0).

Nous obtenons le profil suivant, comme déjà vu dans le paragraphe précédent (Fig. 4.18.) :

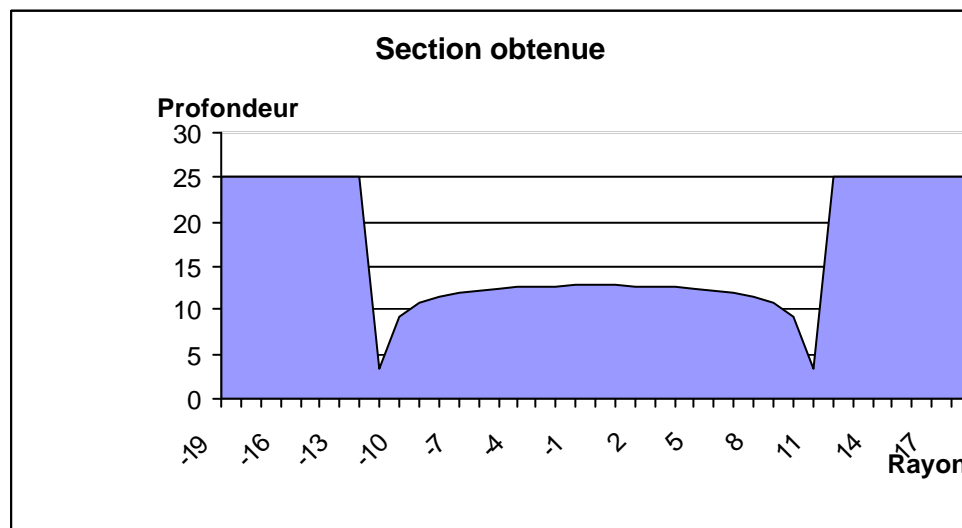


Fig. 4.18.

Le débit de matière obtenu est le suivant (Tab. 4.2.) :



<b>La densité de cet essai est convenable : 60 à 90 % de la matière est réellement enlevée.</b>	
Section atteinte pas le jet =	316,25 mm <sup>2</sup>
Section mini réellement enlevée =	189,75 mm <sup>2</sup>
Section Maxi réellement enlevée =	284,63 mm <sup>2</sup>
Volume / minute mini =	37,95 cm <sup>3</sup> /min
Volume / minute Maxi =	56,93 cm <sup>3</sup> /min

Tab. 4.2. : Aire de la section détruite et débit de matière associé

### III.3.3.2. Cas d'une tête à quatre buses

Nous avons vu précédemment que la démarche retenue était en tous points compatible avec l'utilisation de plusieurs buses, dans la mesure où nous avons pris une unité de longueur pour quantifier la densité. Il est donc acceptable d'additionner les densités de chaque buse, et de multiplier ensuite ce résultat par le facteur de recouvrement. Ceci donne par exemple, pour une tête 4 jets tournant à 1000 tr/ min, avec une avance de 600 mm / min, les résultats suivants :

-Les caractéristiques machine sont (Tab. 4.3.):

Pression en sortie (bar)	2400
Avance (mm/min)	600
Vitesse de rotation (tr/min)	1000
distance de tir (mm)	20
Diamètre des saphirs (mm)	0,2

r du jet1 (mm)	8,06
angle du jet 1 (degré)	9,55
Rayon application du jet 1	11,42
Jet utilisé obligatoirement	

r du jet2	8,04
angle du jet 2 en degré	7,26
Rayon application du jet 2	10,59
Jet utilisé ( 0 ou 1)	1

r du jet3	7,00
angle du jet 3 en degré	8,53
Rayon application du jet 3	10,00
Jet utilisé ( 0 ou 1)	1

r du jet4	5,70
angle du jet 4 en degré	5,70
Rayon application du jet 4	6,76
Jet utilisé ( 0 ou 1)	1

Tab. 4.3. : Paramètres machine utilisés

Le profil obtenu de la saignée est le suivant (Fig.4.19.)

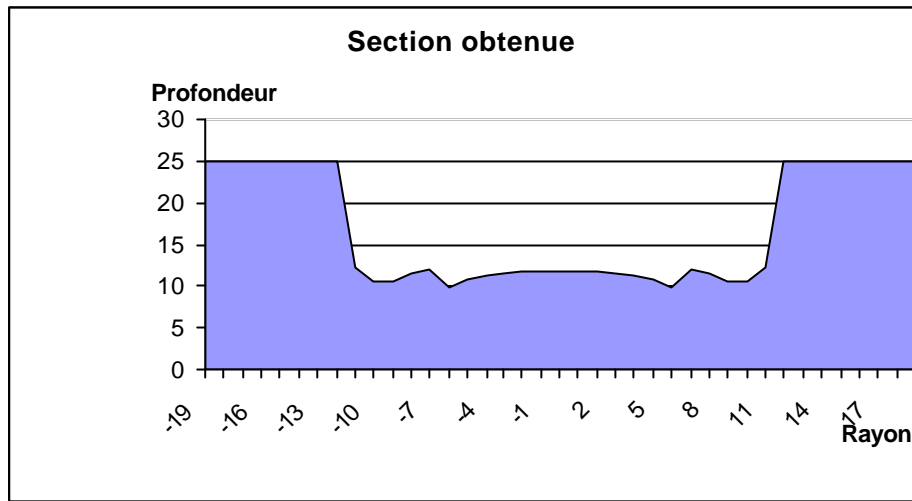


Fig. 4.19. Profil de section avec une tête 4 jets

Le débit de matière obtenu est donné dans le tableau suivant (Tab. 4.4.) :

<b>La densité de cet essai est convenable : 60 à 90 % de la matière est réellement enlevée.</b>	
Section atteinte pas le jet =	317,73 mm <sup>2</sup>
Section mini réellement enlevée =	190,64 mm <sup>2</sup>
Section Maxi réellement enlevée =	285,96 mm <sup>2</sup>
Volume / minute mini =	114,38 cm <sup>3</sup> /min
Volume / minute Maxi =	171,57 cm <sup>3</sup> /min

Tab. 4.4. : Résultats de débit de matière avec une tête 4 jets

Cet exemple correspond à l'essai référencé 6-1-1, déjà répertorié et repris dans le schéma page suivante (Fig. 4.20.). Il est visuellement très pollué par les copeaux et lamelles adhérentes, mais correspond assez bien, après mesure, aux calculs enlèvement de matière. Le pourcentage de matière enlevée est ici plus proche de 60 % que de 90 %.

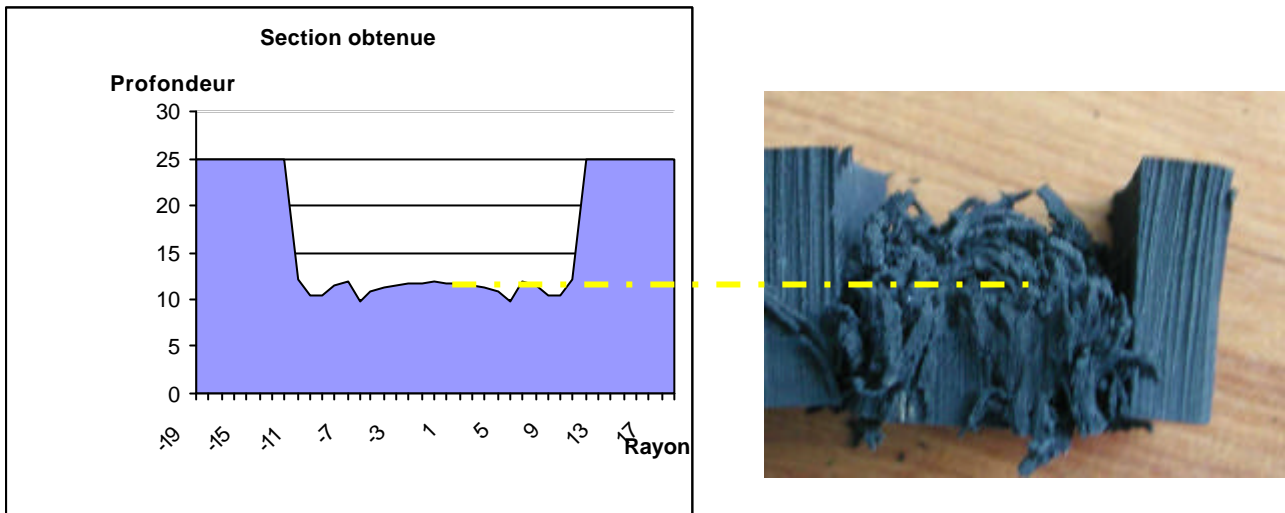


Fig. 4.20. : Comparaison des résultats avec l'expérimentation

### III.4. Validation du modèle

Les quelques résultats, présentés dans le paragraphe précédent, sont assez encourageants. Il est important de les valider plus précisément. Nous avons comparé les résultats obtenus par calcul à ceux, obtenus par l'expérimentation. Pour ce qui est de l'expérimentation, et pour tenir compte du problème des copeaux adhérents, nous avons retenu le processus de mesure suivant :

- Réutilisation du montage expérimental mis en place pour obtenir le facteur de recouvrement. Il nous permet de mesurer la profondeur atteinte, grâce à une fine pointe appliquée en fond de saignée avec un effort constant, en chaque point de la section,

- Réalisation de 5 mesures, sur chaque échantillon, et calcul du volume de matière manquant, par rapport à l'échantillon non altéré. Il est bien entendu que la valeur attendue doit être inférieure à la section maxi calculée par le logiciel, puisque nous faisons le choix de ne pas enlever les copeaux adhérents. Le stylet est supposé ne pas aller au fond de chaque sillon, étant donné les obstacles (copeaux) qu'il rencontre.

Les résultats obtenus sont rapportés sur le tableau suivant (Tab. 4.5.)

Type essais	N° échantillon	Pression (bars)	Diamètre buse	Vitesse de rotation (tr / min)	Vitesse d'avance (mm / min)	Section mesurée	Section calculée Mini/Maxi	Section atteinte
Essais à un seul jet (R=8,06mm)	5,1,1	2400	0,2	1000	100	323	261 / 391	435
	5,1,2	2400	0,2	1000	150	314	213 / 320	355
	5,1,3	2400	0,2	1000	200	309	189 / 284	316
	5,2,3	2400	0,2	750	150	322	207 / 311	345
	5,3,1	2400	0,2	500	100	342	233 / 350	389
Essai à 4 jets	6,1,1	2400	0,2	600	1000	355	205 / 307	342
	6,1,2	2400	0,2	1000	600	217	164 / 273	318
	6,2,1	2400	0,2	500	500	345	201 / 302	336

Tab. 4.5. : Résultats comparés entre section mesurée et section calculée

Pour la plupart des cas, la mesure se situe entre la borne mini et la borne maxi, définies dans les paragraphes précédents. Il apparaît que nous nous rapprochons de la valeur mini pour les essais ayant généré des copeaux adhérents nombreux et volumineux.. Ceci semble normal, étant donné le protocole de mesure adopté. Les résultats mesurés sont légèrement supérieurs au calcul pour les cas où la qualité obtenue est très bonne (essais 6.1.1 et 6.2.1.).

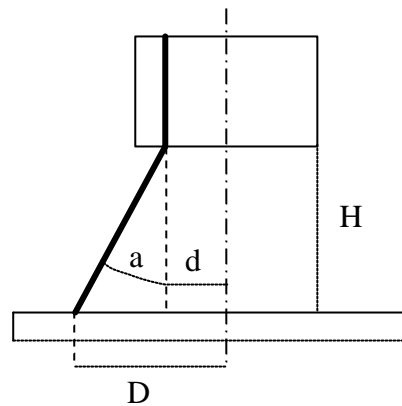
Les résultats du modèle mis en place dans notre travail semblent donc acceptables, mais nous y reviendrons dans la discussion finale.

### III.5.Application méthode à une autre tête rotative

Il est également intéressant, de façon à évaluer l'étendue de notre modèle, de tester son utilisation pour un autre type de tête rotative. Nous avons à notre disposition un ensemble rotatif de plus grand diamètre, pouvant porter jusqu'à 5 buses, sur des diamètres différents et avec des angles d'inclinaison des jets également différents. Nous avons comparé les résultats obtenus par calcul, pour cette tête, avec une série d'essais expérimentaux. De façon à ne pas trop modifier le logiciel, dont la modularité est limitée, nous nous sommes limités à des essais avec 4 buses. Elles sont identiques aux précédentes, de façon à ne pas intégrer de dispersion due à la performance énergétique. De plus, la fenêtre de calcul de notre logiciel est limitée à des saignées de 40 mm de largeur maximum, ce qui donne peu de latitude pour la sélection des buses à utiliser sur cette tête.

### III.5.1. Caractérisation géométrique de la tête

En utilisant le même processus de mesure que pour la tête 4 jets, nous obtenons les résultats suivants (Tab.4.6.) :



	Jet 1	Jet 2
<b>d (mm)</b>	6	14
<b>D (mm)</b>	14	23
<b>a (°)</b>	6,25	6,65

Tab. 4.6. : Caractéristiques géométrique de la tête rotative

### III.5.2. Etude comparative du modèle et de l'expérimentation

De la même manière que pour la tête 4 jets, quelques expérimentations permettant de comparer les résultats du modèle à la réalité physique ont été conduites.

Cette comparaison est présentée dans le tableau suivant (Tab. 4.7.) :

Type essais	N° échantillon	Pression (bars)	Diamètre buse	Vitesse de rotation (tr / min)	Vitesse d'avance (mm / min)	Section mesurée	Section calculée Mini/Maxi	Section atteinte
Essais à deux jets	7.1	2400	0,2	1000	500	241	254 / 381	424
	7.2	2400	0,2	1000	300	351	312 / 468	520
	7.3	2400	0,2	1000	500	234	254 / 4381	424
	7.4	2400	0,2	500	300	345	288 / 432	480

Tab. 4.7. : Résultats comparés entre section mesurée et section calculée

Les résultats amènent le même type de remarque que pour la tête à 4 jets, c'est-à-dire une assez bonne adéquation entre les résultats du modèle et l'expérimentation. La répétition des paramètres entre les essais 7.1 et 7.3 permet par ailleurs de juger de la précision de la méthode de mesure.

Elle est honorable, étant donné les moyens de mesure utilisés. Notre modèle semble donc relativement généraliste, au moins dans les plages d'utilisation pour lesquelles il a été mis en place.

#### **IV. DISCUSSION ET PREMIERE CONCLUSION**

La modélisation conduit à des résultats [Cor.et.al.(2004)] qui semblent assez précis, rapportés à l'approche expérimentale. Ceci ne sous-entend pas que ce modèle soit d'une utilisation universelle. Il semble malgré tout suffisamment généraliste pour être utilisé dans de nombreux cas, sous réserve d'un certain nombre de précautions :

- Validation du modèle de Graham et Wilkins sur d'autres matériaux, indépendamment même des calculs à mener, pour le caler avec les caractéristiques mécanique du matériau usiné. Ce modèle s'appuie en effet sur des hypothèses de découpe faites pour un matériau homogène, et ne s'appliquera pas forcément au démantèlement de matériaux non homogènes, durs et friables. C'est le cas pour le béton par exemple, ce qui correspond à de nombreuses applications d'hydrodémolition. Les mécanismes de destruction sont différents.

- Calage de ce modèle pour le type de buses utilisées. Nous avons vu que leurs performances étaient très variables d'un type à l'autre, voire d'une série à l'autre. C'est une source de dispersion difficile à maîtriser correctement,

- Utilisation du modèle dans les limites pour lesquelles il a été développé, avec en particulier :

- une plage de densité comprise entre 0 et 50 mm / mm<sup>2</sup>. Ceci n'est pas trop pénalisant, car des densités supérieures ne peuvent être obtenues qu'au prix de vitesses d'avance très réduites, peu favorables à la productivité. Certaines cinématiques de têtes multi-jets ou certaines buses monojets tournant à très grande vitesse (30000 tr / min), sont malgré tout susceptibles d'échapper à cette plage.

- des jets peu inclinés par rapport à l'axe de la tête, ce qui exclut la tête rotative orbitale à grande vitesse évoquée ci-dessus,

- L'utilisation de cinématiques ne faisant pas varier en continu les paramètres considérés comme fixe dans notre travail (distance de tir, angle élevé d'inclinaison des buses, buses non cylindriques,...)

Du point de vue de la qualité des résultats obtenus nous pouvons en final dire que ce modèle est :

- Sensible aux variations de paramètre,

-Relativement précis et exact par rapport aux résultats expérimentaux.

Ce dernier point est à pondérer. Les moyens de mesure mis en œuvre pour mesurer les différentes profondeurs atteintes par les jets, et plus encore l'évaluation du volume de matière enlevé en fonction des copeaux restant adhérents au fond des saignées, ont une fiabilité limitée. Il y a de toute évidence une part subjective dans ces mesures qu'il serait bon dans l'avenir de minimiser.

Du point de vue des perspectives, il semble intéressant de réaliser une étude de granulométrie, afin de déterminer les dimensions des copeaux en fonction des paramètres machines. Nous pouvons d'ores et déjà faire l'hypothèse que la granulométrie est fonction du pas ( $\Delta v/N$ ). En effet, ce pas détermine l'espace entre deux motifs identiques. Il s'agit de la période du motif inscrit dans la matière. Plus le pas est élevé, plus le grain sera grossier. De plus, en utilisant les courbes de densité, il est possible de calculer la répartition de la taille du grain sur le rayon des échantillons. La finesse du grain sera proportionnelle à la densité. Pour cela, il faut réaliser une étude de granulométrie en récoltant tous les copeaux après chaque essai, ce qui n'est pas forcément facile à mener rigoureusement. C'est malgré tout un enjeu important car (voir dans le chapitre suivant) la valorisation de la matière issue de ce démantèlement est d'autant plus riche que la granulométrie de la poudre est fine. Nous allons aborder, dans le chapitre suivant, l'ensemble des aspects et voir comment appliquer les connaissances issues de cette étude, afin de valoriser au mieux des pneumatiques automobiles en fin de vie.

# **CHAPITRE 5. APPLICATION AU CAS DES PNEUMATIQUES**

## **I. GENERALITES SUR LE RECYCLAGE DES PNEUS**

### **I.1.Description des pneumatiques**

#### **I.1.1Nature**

Les pneumatiques sont des ensembles composites complexes, composés de caoutchoucs, d'acier et de textiles divers. Les pneus usagés ne sont pas des déchets dangereux, mais ils présentent un danger pour l'environnement et la santé, en cas d'incendie sur le site de stockage ou le dépôt sauvage (émissions de fumées toxiques et éventuellement d'un liquide huileux).



Pour des véhicules légers, Leur composition moyenne est la suivante, (Tab.5.1) :

<b>Matériau/élément</b>	<b>Pourcentage massique</b>
Caoutchoucs	48%
Noir de carbone	22%
Acier	15%
Textile	5%
Oxyde de zinc	1%
Soufre	1%
Additifs	8%

Tab.5.1. : Composition moyenne d'un pneumatique de véhicules légers

La gestion des pneus usagés représente toujours un problème dans notre pays, puisque environ la moitié de ces déchets suit des filières mal connues, non contrôlées voire illégales.

### **I.1.2.Volumes à traiter :**

Il se vend en France chaque année, que ce soit en première monte ou en remplacement, plus de 40 millions de pneumatiques de tourisme et plus de 2 millions de pneumatiques pour poids lourd. Ces chiffres devraient être complétés par les volumes destinés aux autres marchés : camionnette, agricole, génie civil, aviation, moto, vélo... Le nombre de pneumatiques consommés progresse régulièrement, avec la croissance du parc automobile, et malgré l'amélioration de la longévité. Faute de comptabilité des flux de Pneumatiques Usagés Non rechapables (PUNR) présents sur le territoire, les estimations se basent sur les ventes de pneus neufs. A l'aide de diverses hypothèses, on estime que **405 000 tonnes de pneus usagés ont été produites en 2000**, dont :

-234 000 tonnes pour les véhicules légers (VL)

-17 000 tonnes pour les utilitaires légers (VUL)

-123 000 tonnes pour les poids lourds (PL)

-31 000 tonnes environ de diverses origines : génie-civil (CG), agricole, cycles

De plus, le stock estimé à traiter est de l'ordre de 2 Millions de tonnes.

### **I.1.3.Contexte réglementaire**

Les pneus usagés sont des déchets banals, et sont classés dans la rubrique 16 01 03 de la liste des déchets. Le décret n°2002-1563 du 24 décembre 2002 définit les principales dispositions relatives à l'élimination des pneus usagés. Tous les types de pneus sont concernés, exceptés ceux équipant les cycles (vélos) et les cyclomoteurs (<50 cm<sup>3</sup> et vitesse maxi de 45 km/h), car les quantités correspondantes sont relativement faibles et les circuits de distribution sont différents de ceux visés par ce décret.

Les acteurs concernés par ce décret sont :

- Les producteurs,
- Les distributeurs,
- Les détenteurs,
- Les collecteurs,

Les exploitants d'installations d'éliminations.

Leurs obligations sont présentées en Annexe 6.

Les acteurs concernés sont :

### **I.2.Filières existantes**

De nombreux développements ont été menés depuis quelques années en France et dans le monde mais fort peu sont arrivées au stade industriel, pour des raisons techniques mais surtout économiques, en l'absence d'incitations législatives.

Les quelques applications ayant fait l'objet au minimum de la mise en place d'une installation pilote peuvent être regroupées en trois familles principales de valorisation:

- La valorisation énergétique,
- La valorisation matière par transformation mécanique,
- La valorisation matière par transformation chimique.

Les différents procédés mis en œuvre sont présentés brièvement en Annexe 6.

L'emploi des produits obtenus par transformation chimique ou mécanique, se heurte aux obstacles bien connus de filière de valorisation que sont :

- Réputation de "produits bas de gamme" attachée à l'emploi de matières recyclées,
- L'inexistence de normes et de règlements couvrant les caractéristiques et l'emploi de ces produits nouveaux,
- La concurrence de produits vierges aptes à remplir la même fonction à moindre coût,
- Le nombre restreint d'opérateurs réalisant industriellement et économiquement le broyage,
- La réticence des transformateurs à se lancer dans une voie "nouvelle" sans marché clairement identifié.

### **I.3.Répartition des pneus usagés valorisés en tonnes**

La production annuelle de pneus usagés était estimée en 2000 à 405 000 tonnes, mais 36 % de ce gisement est actuellement valorisé, soit 143 000 tonnes. L'activité rechapage est aujourd'hui en France la première source de valorisation des pneumatiques usagés. Environ 67 000 tonnes de pneumatiques usagés, dont une part importante de pneus poids lourd, acquièrent une seconde vie grâce à la technologie du rechapage.

La répartition dans les différentes filières se fait de la manière suivante (Tab.5.2.)

Nature de la valorisation	Tonnage	%
Rechapage	67 000	47 %
Valorisation énergétique en cimenterie	27 000	19 %
Granulation	33 000	23 %
Génie Civil	16 000	11 %
<b>TOTAL</b>	<b>143 000</b>	<b>100 %</b>

Tab.5.2. : Répartition du gisement dans les différentes filières

Ce cadre permet de mieux comprendre l'intérêt potentiel du procédé jet d'eau en temps que nouvelle voie de fabrication de poudrette fine.

## II. PROBLEMATIQUE DU DEMANTELEMENT DES PNEUS PAR JET D'EAU

### II.1. Essais préliminaires

Le but de ces essais a été d'explorer la faisabilité technique du démantèlement de PUNR (pneumatiques usagés non rechapables) par jet d'eau haute pression, et de mener une première analyse de l'influence des principaux paramètres de tir. Les moyens mis en œuvre sont les mêmes que ceux présentés en chapitre III.

Les principaux paramètres explorables pour notre application sont (Tab.5.3.) :

Paramètres	Niveaux	Paramètres	Niveaux
Partie du pneu traitée	Bande de roulement (BdR) Flanc Talons	Pression de l'eau	De 1000 à 4000 bars
Epaisseur du pneu		Débit de l'eau	
Structure du pneu	Nature des couches Nombre de couches	Vitesse de rotation	De 0 à 1300 tr/min
Distance buse / matière	De 5 à 50mm	Vitesse d'avance	De 50 à 500mm
Inclinaison jet / matière	De 30° à 90°	Direction de passage	Direction / BdR Direction / fils d'acier
Diamètres des	De 0.1 à 0.5mm	Sens de passage	Composantes horizontales des vitesses d'avance et du jet
Nombres de saphirs	4 à 7		

Tab.5.3. : Paramètres pneus à explorer

Les principales mesures réalisables sont les mêmes que précédemment, avec en plus le degré de nettoyage des fils d'acier.

De nombreux essais ont été réalisés, dans une première étape sans structuration particulière de l'approche expérimentale. Ils ont permis de vérifier qu'il était bien possible de produire de la poudrette de caoutchouc, à partir de la gomme d'un pneumatique, en particulier au niveau de sa bande de roulement, comme l'illustrent les deux photos suivantes (Photo. 3.1.).

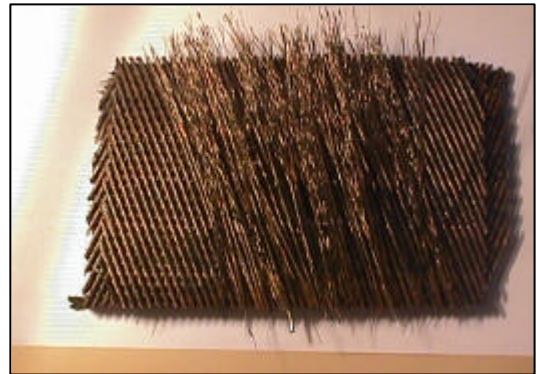
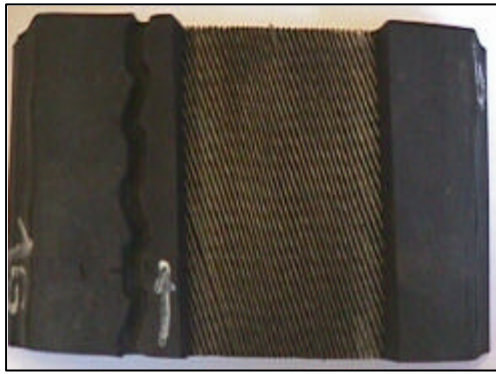


Photo. 3 .1. : Séparation gomme / carcasse métallique

## II.2. Premiers résultats et limites

Quelques résultats de tir sont regroupés dans le tableau suivant (Tab. 5.4.).

Distance de tir (mm)	Vitesse (mm/min)	Nombre de passage	Buses (nombre x diamètre)	Profondeur de coupe (mm)	Profondeur de coupe entre les fils d'acier (mm)
30	100	1	4 x 0,2	30	5
30	100	2	4 x 0,2	45	20
30	150	2	4 x 0,2	58	20
30	100	1	5 x 0,2	5	3
20	200	1	4 x 0,2	25	5

Tab. 5.4. : Premiers résultats expérimentaux sur pneumatiques

Les résultats obtenus sont assez encourageants dans la mesure où il est possible d'enlever de la matière sur de fortes épaisseurs, en obtenant une poudre assez fine, y compris entre les tresses de fils métalliques qui sont par ailleurs très bien nettoyées, au moins sur les faces directement exposées au jet.

Il apparaît néanmoins que plusieurs points seront à étudier plus en profondeur, pour améliorer le procédé. Il est en effet impossible d'enlever la gomme sous la première couche de fils, qui joue un rôle de bouclier, par rapport à l'action du jet (Photos. 5.2.).

Ceci sera abordé de façon plus précise par la suite, puisque l'objet de ce chapitre est de proposer une cinématique permettant à la fois de traiter ce problème, et d'intégrer nos réflexions sur l'influence de l'angle d'inclinaison des buses sur l'enlèvement de matière.



Photo. 5.2. : vue en coupe d'une section de BdR de pneu attaquée par jet d'eau H.P.

Les essais ont également permis d'énoncer de premières conclusions du point de vue des paramètres influents :

-Les paramètres ayant une forte influence sur les performances de découpe sont :

- Le nombre et position des buses,
- Le diamètre des buses.

La vitesse de rotation de la tête de découpe ne semble pas avoir d'influence.

-La vitesse d'avance optimale, pour une tête rotative classique 4 jets fonctionnant à 2500 bars et équipée de buses de 0.2mm, est de 100mm/min.

-La direction des vitesses d'avance pour laquelle on obtient le meilleur compromis, entre efficacité et facilité de mise en œuvre, est celle se situant parallèlement à l'axe de la bande de roulement du pneumatique.

### **II.3.Problématique industrielle**

Nous avons vu qu'il était possible d'enlever de la gomme, sous forme de poudrette, sur les différentes surfaces du pneu et en particulier sur la bande de roulement.

Les paramètres influents ont été identifiés, de même que les principales difficultés, qui portent en particulier sur l'accès du jet à la gomme située immédiatement en dessous des nappes de fils.

La direction d'avance, par rapport à l'orientation des nappes de câbles, semble avoir une influence sur la séparation des fils par rapport au caoutchouc. Les résultats sont en particulier meilleurs lorsque l'avance est parallèle à l'axe de la bande de roulement (BdR), déroulée sur un plan, plutôt que lorsque l'on travaille perpendiculairement.

De plus, la première nappe tend à protéger les suivantes, lors de l'action d'un jet.

Les angles de tir, par rapport à la géométrie relative des différentes nappes de câbles, ont donc une grande importance.

Dans cette situation, deux options sont envisageables pour traiter le problème :

-Déplacer les câbles pour avoir accès à la matière. Dans la mesure où il n'est pas envisageable de le faire avec un moyen mécanique annexe, la seule solution est d'envisager de le faire par l'action directe du jet sur le fil,

-Trouver un angle de tir permettant de l'atteindre directement.

Dans les deux cas, nous sommes amenés à chercher un angle d'incidence entre le jet et la matière, cet angle d'incidence aura bien évidemment une influence sur l'enlèvement de matière, comme nous l'avons exploré dans les chapitres précédents.

## **II.4. Etude de la séparation des fils métalliques**

### **II.4.1. Approche géométrique du franchissement des nappes**

A l'aide de photos et de mesures sur divers échantillons, nous avons réalisé un modèle CAO de l'agencement des tresses métalliques dans les différents plans avec leurs différentes orientations ( $22,5^\circ$  entre axe BdR et orientation nappes). Nous avons ensuite dessiné le jet dans le plan perpendiculaire à ces nappes, en intégrant dans la représentation la divergence naturelle du jet dans l'air. Cette représentation prend la forme suivante (Fig.5.2.)

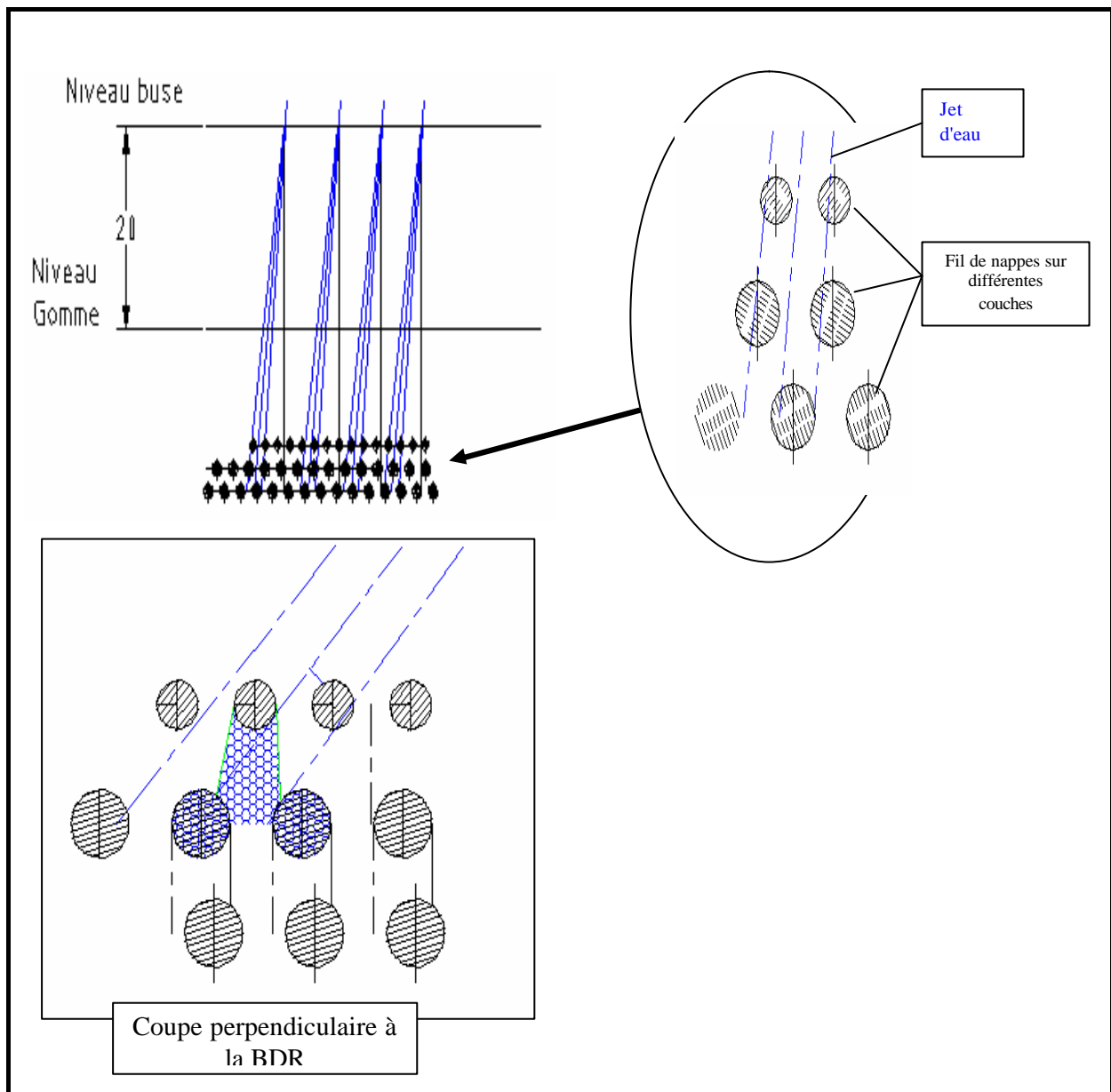


Fig.5.2. : Représentation du jet et des différentes nappes de câbles

Les hypothèses retenues pour l'étude sont :

- Distance de tir de 20 mm par rapport à la surface supérieure de la gomme,
- Dépouille de 15° laissée par la première passe, à cause de la déviation des jets (Photo.5.2.).

Le calcul consiste, à atteindre le dernier point de matière en dépouille sur la nappe inférieure, en considérant l'axe énergétique du faisceau tangent à la nappe supérieure (Fig. 5.3.).



Il devient alors possible de trouver les positions extrêmes, inclinaison des jets, permettant d'enlever toute la matière sous les câbles. Nos principales conclusions sont les suivantes :

- Pour chaque nappe, il existe un angle optimal,
- L'angle optimal dépend du pas des nappes (distance entre chaque câble d'une même nappe), de la hauteur inter-nappe H, de l'orientation des nappes par rapport à l'axe de la BdR),
- La plupart de ces paramètres varient avec les nappes,
- L'angle optimal dépend de la divergence du jet et du diamètre de buse.

**-Quel que soit le cas étudié, l'angle optimal varie entre 45° et 55°**

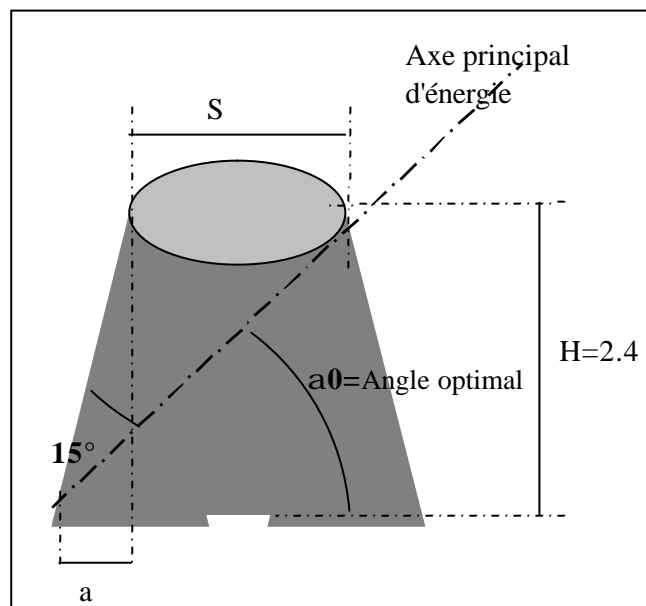


Fig. 5.3. : Recherche de l'angle optimal d'inclinaison

Ces calculs ont été validés grâce au montage expérimental suivant : L'axe de la buse n'étant pas inclinable sur notre machine, nous avons mis en place un banc d'essais permettant d'effectuer des tirs sur un échantillon de pneu inclinable à volonté. L'angle d'inclinaison est mesuré (Fig.5.4.).

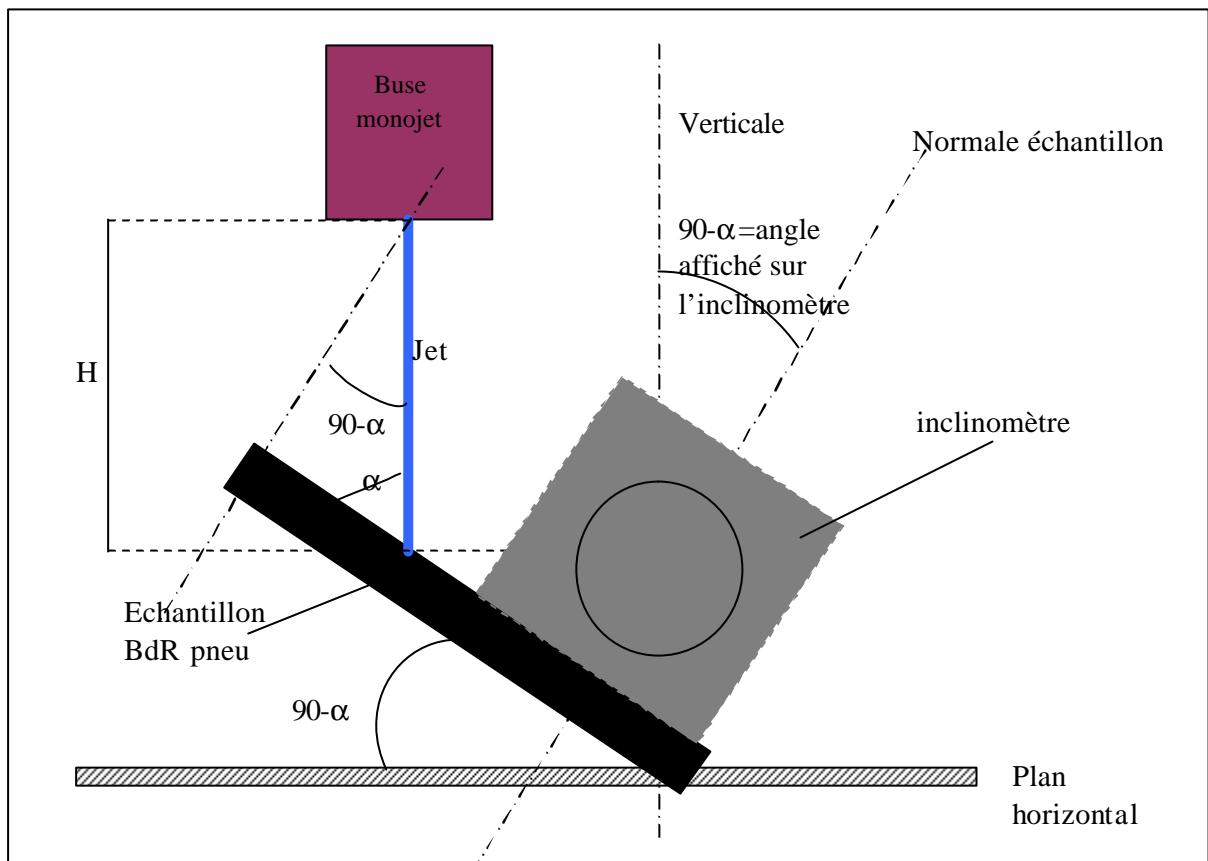


Fig.5.4. : banc d'essai de mesure de l'inclinaison optimale

Nous obtenons confirmation des valeurs obtenues par calcul à  $5^\circ$  près, pour tous nos échantillons. Ceci est tout à fait acceptable étant donné la précision des mesures de l'inclinaison et de position de tir par rapport au câble.

#### II.4.2. Etude de l'hypothèse de mobilité des câbles

Nous avons mesuré l'effort qu'il est nécessaire d'appliquer sur un câble pour qu'il se couche jusqu'à toucher le câble suivant. Le montage retenu est représenté Fig.5.5. Il consiste à accrocher le câble, toujours lié au caoutchouc sur sa partie inférieure avec un fil, relié à une masse variable. Le déplacement du câble est mesuré grâce à un comparateur micrométrique. Nous constatons qu'il faut un effort de 10 daN pour qu'un câble commence à bouger et 15daN pour qu'il touche son voisin. Cet effort paraît élevé par rapport à ce que peut proposer un jet d'eau HP.

Il est de plus obtenu dans une direction très favorable, qui ne pourra pas être reproduite par le jet. Il semble donc improbable que les fils bougent pendant le traitement. Les angles de dépouilles mesurés approximativement sont plutôt liés à l'inclinaison des buses sur la tête rotative.

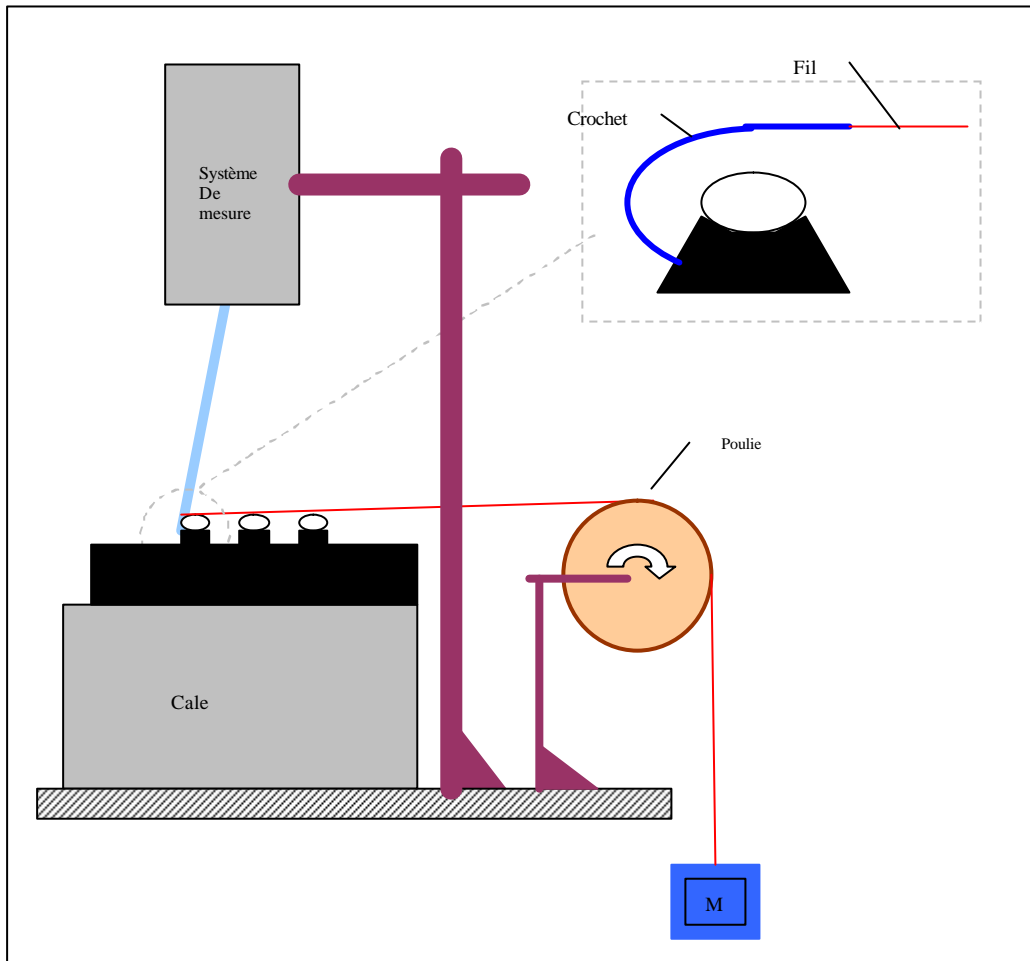


Fig.5.5. : Banc de mesure mobilité des câbles

### II.4.3. Etude de l'influence de la direction de passage

L'étude CAO a permis de déterminer des directions favorables pour le traitement. Nous avons par contre remarqué que selon le sens de passage, le fil était plus ou moins bien libéré, ce qui laisse à penser que dans certains cas il protège mieux la gomme que dans d'autres.

La longueur protégée par le câble varie avec l'angle de passage, comme illustré Fig. 5.6. Il convient donc de minimiser cette longueur. La meilleure solution est de passer perpendiculairement au fil, ce qui n'est pas possible en tout point, puisque toutes les nappes ne sont pas orientées de façon identique. Etant donné l'angle classique d'inclinaison des nappes (de l'ordre de  $22,5^\circ$ ), la moins mauvaise solution est de passer parallèlement à la BdR. Dans ce cas, la longueur protégée est augmentée de 61% par rapport au cas idéal ( $1 / \sin 22,5^\circ$ ), soit 1,6 mm pour un câble de 1 mm. Ceci est évidemment valable en un instant, et pour un jet incliné colinéaire à la vitesse d'avance.

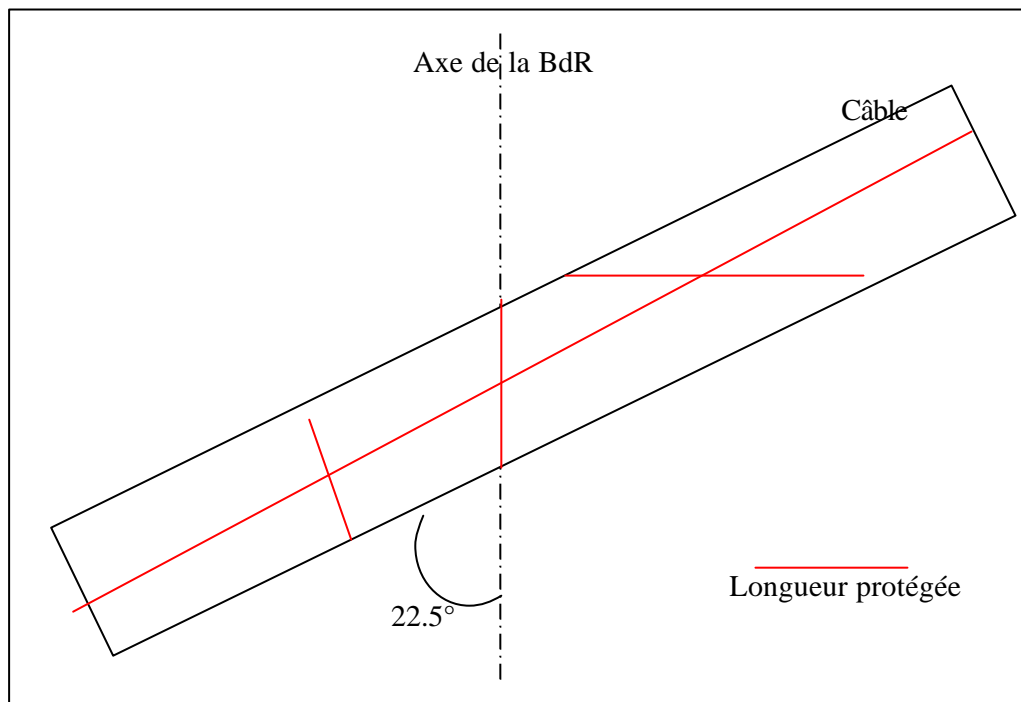


Fig.5.6. : Représentation de la longueur protégée

## II.5.Conclusion

Il apparaît assez clairement, à la vue de ces différents calculs et essais, que l'utilisation d'une buse rotative à orientation des jets fixes ne peut en aucun cas permettre aux différentes nappes de se séparer de la gomme. Les angles de tir nécessaires au détachement sont de plus très importants, de l'ordre de  $45^\circ$ .

Par ailleurs, l'orientation des nappes étant variable, il faudrait des têtes rotatives à fort angle d'incidence variant en continu, ce qui n'existe pas sur le marché, entre autres pour des raisons techniques. Elles ne permettraient pas dans tous les cas de traiter complètement un pneu, sous tous ses angles.

Il apparait donc nécessaire d'essayer de développer une solution originale.

### **III. CONCEPTION D'UN EQUIPEMENT DE DEMANTELEMENT**

#### **III.1.Cahier des charges**

L'objectif est de mettre au point une cinématique permettant de :

- Traiter en même temps la bande de roulement et les flancs d'un pneu,
- Limiter le nombre de systèmes tournants de façon à réduire le nombre de joints tournants et d'équipements hydrauliques,
- Travailler sous des incidences optimales pour la libération des nappes ( $45^{\circ} \pm 5^{\circ}$ )
- Réduire le nombre de buses permettant de traiter le pneu complet,
- Echapper aux brevets concurrents,
- Permettre la fabrication de poudrette de granulométrie stabilisée.

Les mécanismes d'enlèvement de matière, étudiés et modélisés dans les précédents chapitres, doivent aider à la maîtrise de ce dernier point. L'inclinaison importante des buses devrait par ailleurs permettre de se rapprocher de la théorie des pyramides, abordée dans le chapitre 4.

#### **III.2.Solution retenue**

Après de longues réflexions, la solution retenue est la suivante :

- La géométrie d'outil la mieux adaptée au traitement d'un pneu complet est un entrefer torique. En effet, cette forme en U permet l'usinage simultané de la bande de roulement et des flancs (Fig. 5.7.).

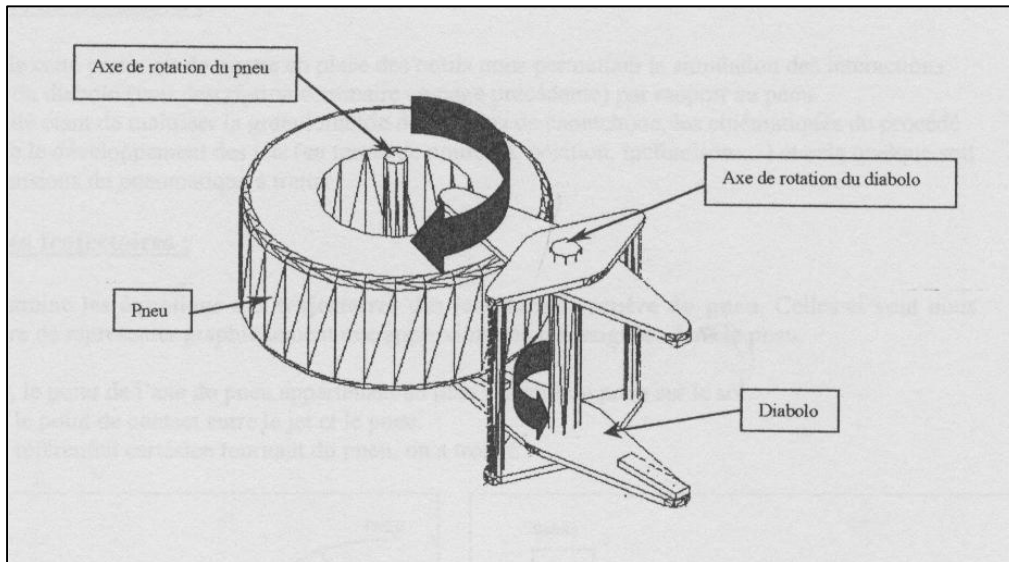


Fig.5.7. : Principe cinématique retenu

Le pneu et l'entrefer torique, appelé dorénavant « diabolo », ont deux axes de rotation distincts. En inclinant l'axe des buses sensées traiter la bande de roulement, on provoque sur celle-ci la formation d'une « écaille » arrondie, la distance buse matière variant pendant l'exposition. Au tour de diabolo suivant, la même écaille est reproduite, légèrement décalée de la précédente puisque le pneu a lui-même légèrement tourné.

Cette cinématique permet de balayer toute la plage d'angles d'incidence nécessaire à enlever la matière sous chaque câble.

La partie extérieure du diabolo, appelée « pales », permet de traiter les flancs, l'alimentation complète en eau de l'ensemble étant réalisée par un seul joint tournant (Fig. 5.8.).

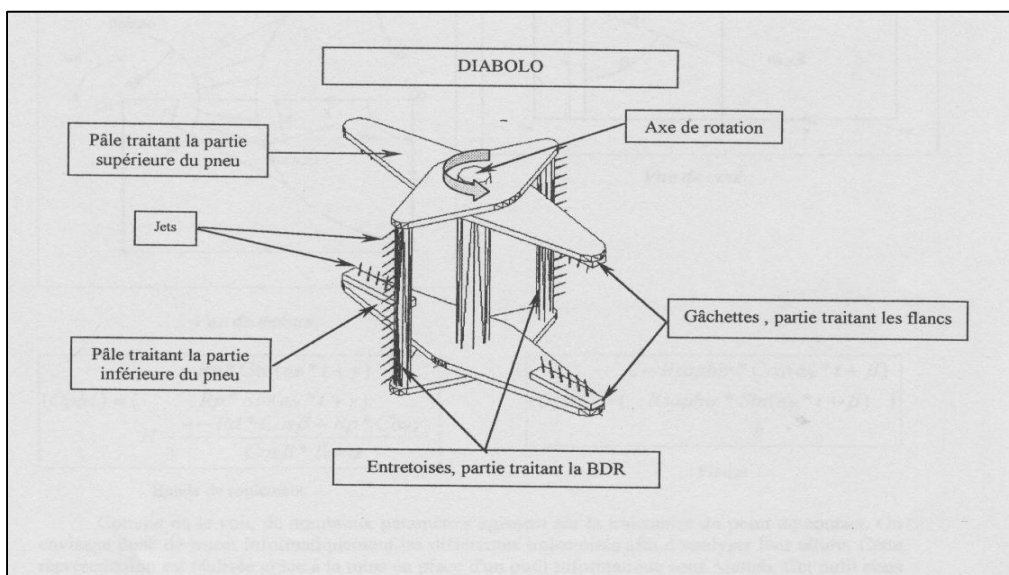


Fig.5.8. : Représentation schématique du diabolo

Une étude reprenant la démarche utilisée dans le chapitre 4, a permis de calculer la trace réalisée par une buse sur le pneu.

Nous obtenons une forme d'écaille, comme décrite précédemment (Fig. 5.9.). Les trois écailles représentées sont issues de 3 buses différentes, les deux du haut ayant un angle de tir orienté vers le haut et la troisième vers le bas.

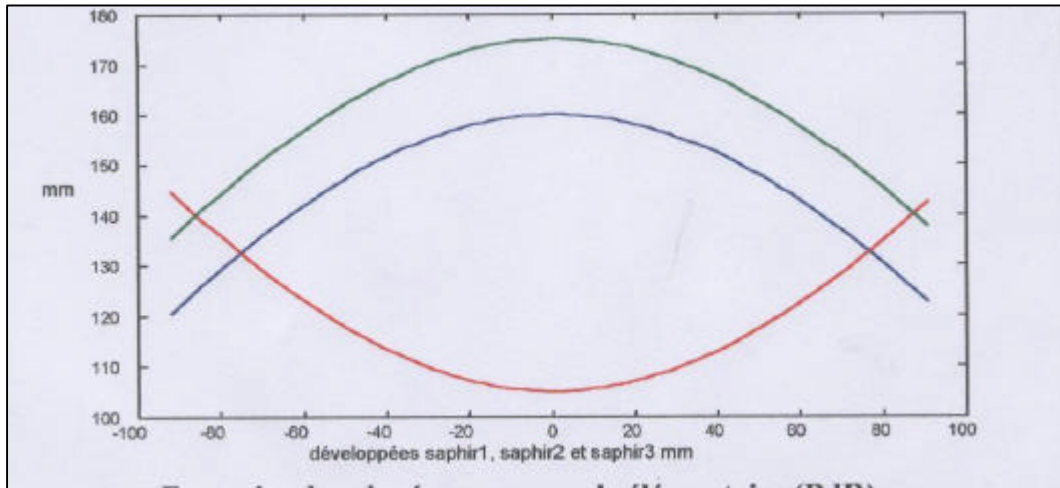


Fig. 5.9. : Exemple de saignée sur un cycle élémentaire pour la BdR

Sur plusieurs cycles de rotation, nous obtenons la superposition suivante (Fig.5.10.)

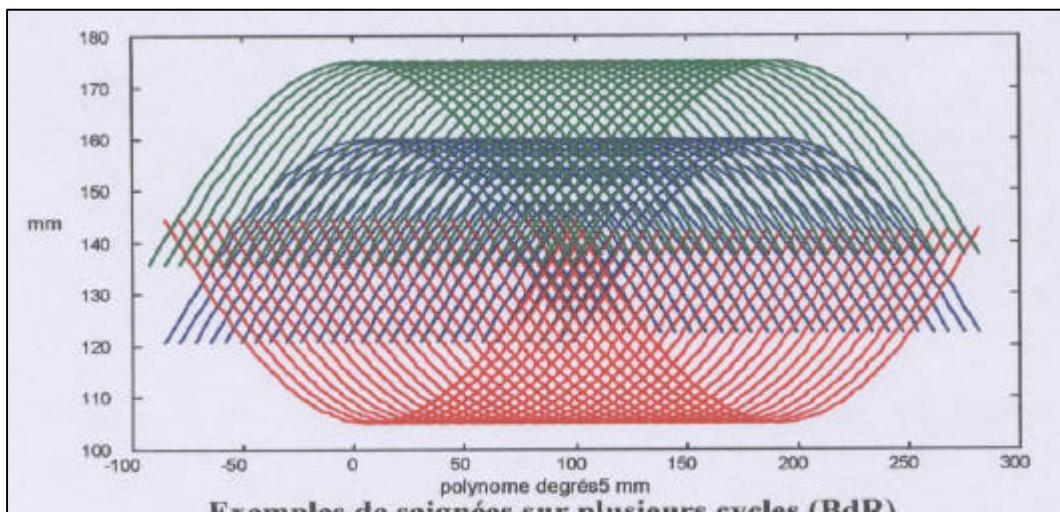


Fig.

5.10. : Exemples de saignées sur plusieurs cycles pour la BdR

Pour ce qui est des flancs, le principe est le même et nous obtenons des saignées de forme illustrée par la figure suivante (Fig. 5.11.).

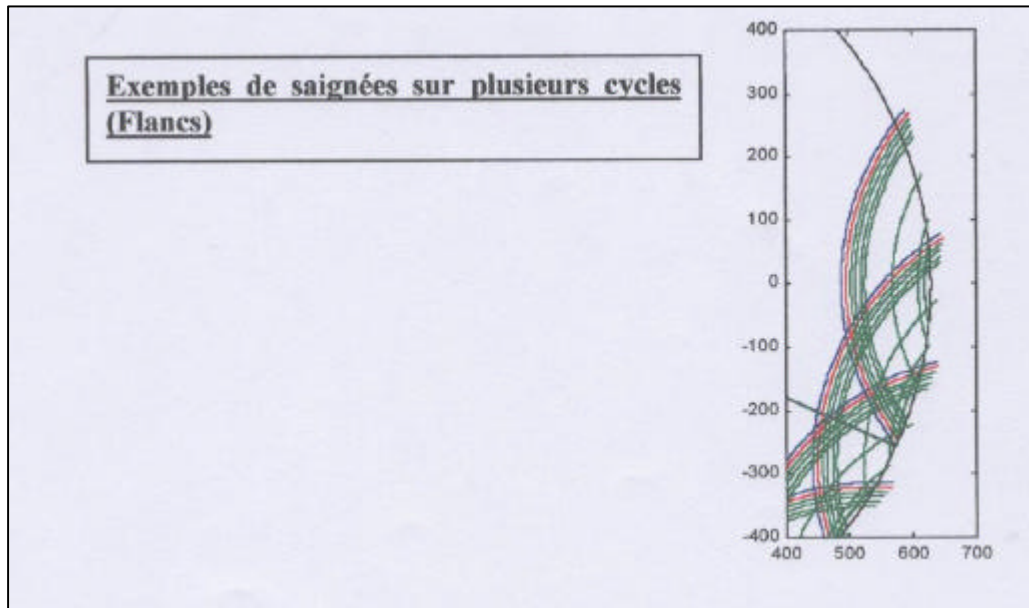


Fig.5.11. : Saignées sur les flancs

De façon à augmenter la productivité, il est possible de traiter plusieurs pneus (jusqu'à 4) en même temps, comme le montre la Fig. 5.12.

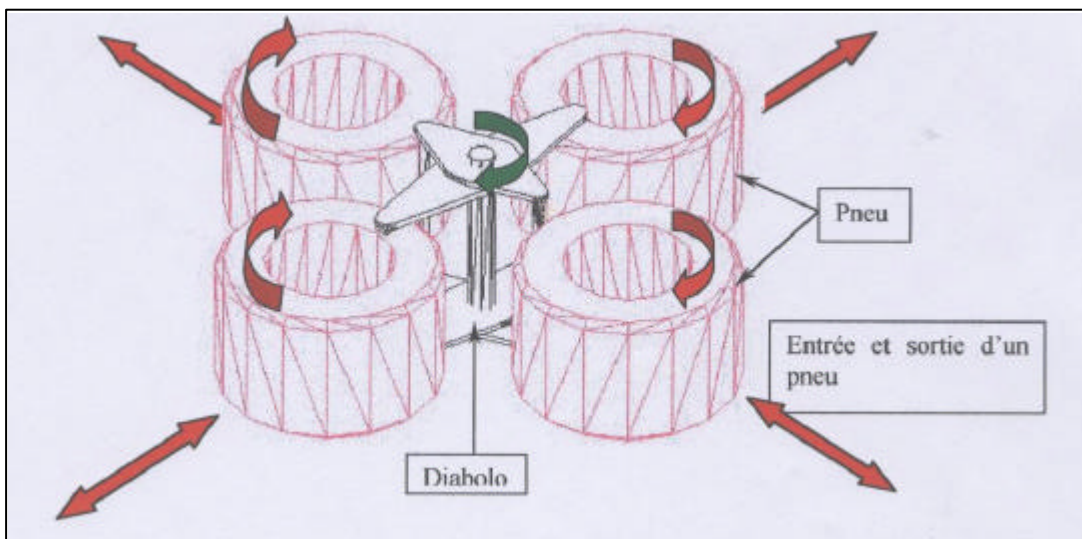


Fig. 5.12. : Principe de traitement pour plusieurs pneus



## IV. CONCLUSION

Une maquette de faisabilité, intégrant l'ensemble des solutions présentées précédemment, a été construite et est en cours de test et de développement. Elle intègre en particulier le principe du diablo, comme présenté Photo5.3.



Photo.5.3. : Vue intérieure du prototype avec le diablo d'axe vertical

Les travaux n'en sont qu'à leur tout début mais les premiers résultats semblent prometteurs, puisqu'il a été réalisé de l'enlèvement de matière sur la bande de roulement, comme le montre la photographie ci-dessous (Photo. 5.4.).

De nombreuses études restent à mener sur la base de cet équipement : En tout premier lieu sa mise au point et son utilisation, avec une pompe à grand débit, sont nécessaires, afin de valider en dimension réelle les idées développées à son sujet, avant de commencer toute action d'optimisation. Ensuite, il sera possible de concentrer les essais sur le démantèlement des flancs, peu étudiés jusqu'à maintenant. Enfin, le démantèlement complet d'un pneu nécessite plusieurs rotations du pneu, de façon à éliminer les diverses nappes de câble une à une. Avec l'évacuation de ces nappes, le pneu va devenir de plus en plus souple. C'est un problème qui n'est pas traité pour le moment et qui demande réflexion.



Photo. 5.4. : Enlèvement de gomme sur le pneu posé sur son système rotatif

Pour la modélisation de l'enlèvement de matière, l'approche décrite au chapitre 4 n'a pas encore été adaptée à la cinématique spécifique du prototype. Ceci reste à faire car une approche prédictive de la productivité d'un tel système de production, en fonction du pneumatique à détruire, est importante pour l'approche économique de cette filière. Ce modèle ne pourra bien sur être valide que pour la masse de caoutchouc ne comportant pas de nappes métalliques, soit d'une façon générale la bande de roulement. Il n'est pas exclus de penser qu'une telle installation soit spécialisée dans la production de poudre fine, en travaillant uniquement sur la bande de roulement, une autre installation de broyage traitant ensuite de façon plus grossière le reste du produit. Une autre solution est peut être de travailler en deux temps, avec un premier passage à une vitesse optimale pour fabriquer de la poudre fine, et ensuite plus rapidement pour réaliser la séparation des nappes de câbles de la gomme. C'est un des avantages de cet équipement de pouvoir définir le niveau de finesse du résultat recherché, par un simple réglage de vitesses de rotation. Tout ceci fera l'objet d'études spécifiques dans les prochains mois.

## **CONCLUSION GENERALE**

Le travail présenté dans ce document aborde un domaine original à un double titre : il concerne d'une part le procédé Jet d'Eau Haute Pression, outil de découpe relativement peu étudié dans le cadre de ses applications à l'eau pure, et d'autre part le démantèlement de produits en fin de vie, problème encore peu traité sous ses aspects purement mécaniques, et encore moins dans le cadre de l'utilisation du jet d'eau comme outil de broyage. Le broyage mécanique est en effet l'outil classique de démantèlement de produits en fin de vie. Son objectif est d'obtenir des résidus suffisamment fins, pour que toute liaison entre les différents matériaux constituants soit brisée, ce qui permet ensuite de trier les différents éléments. Nous avons vu que broyer très fin posait un problème économique et que le tri après broyage n'était pas toujours facile à réaliser, à cause de la taille de broyats, mais également à cause de la nature même des matériaux à traiter.

De plus, la réutilisation de l'un des composants est impossible. Toutes les pièces sont détruites. Le jet d'eau haute pression permet d'apporter certaines réponses à ces différents points. Il doit donc trouver sa justification pour le démantèlement sélectif de produits « composites » rassemblant au moins deux matières intimement liées, pour lesquels on souhaite éventuellement récupérer intact l'un des composants. Ceci nous a amené à définir ce broyage comme la superposition de deux phases :

- Enlèvement de matière par usinage jet d'eau du composant d'enrobage,
- Séparation et nettoyage de la matrice par rapport au matériau usiné, ce point étant en général spécifique au produit étudié.

La relative jeunesse des problèmes de recyclage et l'exotisme du procédé explique le peu de travaux présentés dans la littérature internationale. La plupart des travaux concernant le jet d'eau H.P. touchent en effet plutôt les phénomènes d'abrasion, lorsqu'il est chargé d'abrasif, et relativement peu les applications à l'eau pure, cas retenu pour notre travail. De plus, les études menées sont destinées à la découpe et les actions les plus nombreuses se retrouvent dans le secteur de la mine, pour de l'extraction de roches, ce qui est une forme d'usinage mais également de démantèlement. Nous avons choisi de nous appuyer, pour la phase usinage, sur ces travaux de découpe, et plus particulièrement sur ceux de Graham et Wilkins pour développer notre travail en procédant en deux étapes :

-La première a permis, par une approche expérimentale, de comprendre les phénomènes physiques mis en jeu. Il a ainsi été possible de vérifier qu'une modélisation basée sur la découpe était acceptable. De même, l'analyse de la superposition de saignées, issues du passage répété de jets sur la matière, a permis de poser les bases d'un modèle de découpe s'appuyant sur cette multi-exposition. L'enlèvement de matière obtenu semble lié aux différents angles d'incidence des différentes buses balayant la surface. Les saignées obtenues, en fonction de la cinématique propre de la tête rotative, se rejoindraient alors dans la profondeur du matériau, libérant ainsi un copeau de matière.

-La deuxième étape a consisté à mettre en place un modèle d'enlèvement de matière adossé à ces hypothèses, en utilisant la théorie de Graham et Wilkins. Une première théorie dite « des pyramides » a été développée. Elle s'est avérée rapidement très ambitieuse pour notre application. Les phénomènes dynamiques, liés à la grande vitesse de passage des jets sur la matière, avec des pas incrémentaux réduits, sont apparus trop complexes pour être abordés et transcrits immédiatement, sans même aborder le développement futur de la théorie des pyramides.

Nous avons donc préféré retenir une démarche plus globale. Elle intègre les lois régissant les trajectoires des différentes buses, la loi de découpe de Graham et Wilkins, et un facteur d'amplification décrivant la profondeur atteinte en un point par plusieurs passages de jets. En appliquant cette méthode sur l'ensemble de la surface altérée par la tête rotative, nous obtenons une fourchette de la section de matière enlevée qui nous permet de calculer le débit de matière.

Cette méthode a permis d'obtenir de bons résultats, corrélés avec l'expérimentation, pour différents types de têtes rotatives. Ceci ne doit pas masquer qu'il reste encore beaucoup à faire pour atteindre un résultat complètement satisfaisant et complet. Les simplifications retenues ne permettent pas encore de décrire complètement l'enlèvement de matière. Ceci amène une imprécision sur la section de matière enlevée. Sur le fond de la saignée, de nombreux copeaux et filaments de matière restent accrochés. Ceux-ci, en quantité variable selon les conditions de tir, ne peuvent être considérés par notre modèle et faussent en partie nos résultats. Il serait intéressant d'étudier les copeaux obtenus, ainsi que ceux restant adhérents à la pièce. Leur géométrie, en fonction des différents paramètres du procédé et des équipements utilisés, devrait permettre de mieux comprendre les phénomènes de découpe et de broyage mis en jeu. Cette approche, menée dans un matériau présentant une orientation fibreuse marquée donc lisible, permettrait d'appréhender les phénomènes dynamiques que nous avons été obligé de laisser de côté dans cette toute première approche. Il serait alors possible de voir si un mouvement des lamelles, s'inclinant sous l'action des jets, pourrait les orienter pour que le jet suivant les coupe en un point quelconque de leur longueur. Ce travail est complexe à réaliser, en particulier du point de vue de la récupération de copeaux avant analyse.

La géométrie de ces copeaux est un enjeu de nos futures études. Nous avons indiqué l'influence de la granulométrie de la poudrette sur son prix de vente. Maîtriser cette granulométrie, par réglage des paramètres cinématiques du procédé, est une perspective intéressante. L'intégration de cette granulométrie dans notre modélisation doit être notre prochain travail. Si la relation entre granulométrie et dimension des pyramides paraît immédiate dans notre approche théorique, elle paraît moins directe dans le modèle plus global que nous avons développé.

Il est malgré tout raisonnable de penser que la densité de passage des jets en un point de la surface de la pièce, exprimée par un facteur d'amplification, doit pouvoir être corrélée avec cette granulométrie mais tout reste à faire dans ce domaine.

La bonne connaissance de tous ces facteurs, et des phénomènes physiques d'enlèvement de matière associés, devrait permettre enfin, dans un futur assez proche, de développer des outils de démantèlement adaptés au produit à traiter, et optimisés du point de vue de la productivité et de la qualité du broyat réalisés. Les têtes rotatives ne permettent pas, avec leur cinématique simple (rotation de même axe sur des diamètres différents), de traiter, de façon homogène, l'ensemble de la surface. Il n'est donc pas possible de produire des copeaux calibrés avec une granulométrie resserrée. Des cinématiques plus complexes, avec des systèmes à trains épicycloïdaux par exemple, permettraient d'améliorer ceci. Les problèmes technologiques, associés à ces cinématiques, risquent par contre de rapidement poser problème.

Nous avons abordé en toute fin de notre document le cas des pneumatiques automobiles usagés. Ils sont d'une forme complexe et, si nous avons réussi à proposer une cinématique adaptée à leur morphologie, beaucoup de travail reste à faire. Tout ceci montre que, dans ce domaine assez nouveau, les axes de développement sont nombreux et, comme l'étude présentée ici amène au moins autant de nouvelles questions qu'elle n'apporte de réponses à celles que nous avons posé à l'origine, les opportunités d'activité s'annoncent captivantes.

## Références bibliographiques

- [**Abo.(1999)**] L. Aboussouan, P. Russo, M.N. Pons, D. Thomas, J.P. Birat, D. Leclerc, “Steel Scrap Fragmentation by Schredders”, Powder Technology (105), pp.288-294
- [**Abra.(1963)**] G.N. Abramovich, «The Theory of Turbulent Jets », M.I.T. press, Cambridge, Massachusetts
- [**Adler.(1995)**] W.F. Adler, « Waterdrop Impact Modeling », WEAR 186-187, pp : 341-351
- [**Alb.Hash.Lil.(1994)**] D.G. Alberts, M. Hashish, R.C. Lilley, “Experimental studies on Deep-Ocean Cutting with Abrasive Jet Systems”, 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen, France, pp.711-722
- [**Bam.Ste.(1993)**] J.A. Bamberger, D.E. Steele, « Developping a Scarifier to Retrieve Radioactive Waste from Handford Single-Schell Tanks”, 7<sup>th</sup> American Water Jet Conference, Seattle, USA, pp.737-745
- [**Ber.(1996)**] H. Berthiaux, C. Varinot, J. Dodds, « Approximate Calculation of Breakage Parameters from Batch Grinding Tests », Chemical Engineering Science 51 (19), pp.4509-4516
- [**Bitt(1963)a**] J.G.A. Bitter, « A Study of Erosion Model Phenomen-part I, Wear, n°6, pp.5-21
- [**Bitt(1963)b**] J.G.A. Bitter, « A Study of Erosion Model Phenomen-part II, Wear, 1963, pp.169-190
- [**Bow.Brun.(1961)**] F.P. Bowden, J.H. Brunton, “The Deformation of Solids by Liquid Impact at Supersonic Speed”, Proceedings Royal Society London, Series A, Vol.263, pp.433-450
- [**Bow.Fie.(1964)**] F.P. Bowden, J.E. Field, «The Brittle Fracture of Solids by Liquid Impact, by solid impact and by shock”, Proceedings Royal Society London. Series A Vol. 282, pp.331-352
- [**Brandt et al. 1997**] C. Brandt, H. Louis, G. Tebbing, C. Witzsche, « Abrasive Water Suspension Jets for Nuclear Decommissioning: Final Investigations for the first Application”9<sup>th</sup> American Waterjet Conference, St-Louis, USA, pp.657-671
- [**Bru.Cam.(1970)**] J.H. Brunton, J6J. Camus, « The Flow Liquid of a drop During Impact », 3<sup>rd</sup> International Conference Rain Erosion Association Phenomenia, RAE Farnborough, pp.327-346
- [**Bru.Roc.(1979)**] J.H. Brunton, M.C. Rochester, «Erosion of Solid Surfaces by Impact of Liquid Drops”, CM Preece (ed.), erosion, Academic Press, New York, pp.185-248

**[Cook(1928)]** S.S Cook, « Erosion by Water Hammer », Proceedings Royal Society London Series A, Vol. 119, pp.481-488

**[Chu. et al.(2000)]** A.N. Chukov, A.V. Mihaylov, V.A. Sladkov, V.A. Brenner, A.E. Pushkarev, K.A. Golodin, « Water and Ice Technology for Removing Explosives from Unused Ammunition », 15th International Conference on Jetting technology, Ronneby, Sweden, pp.77-92

**[Cor.Froe.(2002)]** A. Cornier, S. Cornier, D. Froelich, « Automobile tyres dismantling by High Pressure Water Jet », 16th International Conference on Water Jetting, Aix-en-Provence, France, pp.567-581

**[Cor.et al.(2004)]** A. Cornier, S. Cornier, D. Froelich, “Rubber Dismantling Model for Rotary Nozzle: Application at the Automobile Tyres Dismantling” 17<sup>th</sup> International Conference on Water Jetting; Maintz, September 2004 Allemagne, proposé

**[Crow(1973)]** S.C. Crow, « A Theory of Hydraulic Rock Cutting », International Journal of Mechanical Mining Sci and Geomech, Abstracts. Vol.11, pp.103-105, Pergamon Press

**[Crow(1974)]** S.C. Crow, « The effect of Porosity on Hydraulic Rock cutting », International Journal of Mechanical Mining Sci. and Geomech, Abstracts Vol.10, pp.567-584, Pergamon Press

**[Dec.Dia.(1984)]** F. DEcrocq, M. Diallo, “Modélisation de l’action des jets d’eau sous pression sur les roches”, Rapport d’option”sol et sous-sol, TEML/OPT 84/2, édité par ENSMP/CGES, Juillet 84

**[Ehrig(1992)]**, R.J. Ehrig ed., « plastics Recycling : Products and processes », ISBN446-15882-0 3

**[Fan.et al.(2001)]** Y. Fang, M. Zhan, Y. Wang, “The status of Recycling of Waste Rubber”, Journal of Materials and Design vol. 22 (2001), pp.123-127

**[Fer.Cor.(2002)]** S. Ferrendier, A. Cornier, G. Cognet "influence of an abrasive's characteristics on cutting capability in abrasive waterjet cutting" 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Water Jetting, Aix-en-Provence, France 16-18 October 2002. pp.299-313

**[Field.al.(1974)]** J.E. Field, J.J. Camus, D.A. Gorham, D.G. Rickerby, “Impact Damage Produced by Large Water Drops”, 4<sup>th</sup> International Conference Rain Erosion Association Phenomenae, RAE Farnborough, pp.395-420

**[Field. et al.(1979)]** J.E. Field, D.A. Gorham, J.T. Hagan, M.J. Matthewson, M.V. Swain, S. Van der Zwaag, “Liquid Jet Impact and Damage Assessment for Brittle Solid”, STP 664, American Society Testing Material, Philadelphia, USA, pp.11-13



**[Fin.(1958)]** I. Finnie «the Mechanism of Erosion of Ductile Metals », Journal of Engineering Material and Technology, p.527-532

**[Fos. Sum.(1994)]** R.R. Fossey, D.A. Summers, J.G. Blaine, L.J. Tyler, “The New Generation Waterjet Explosives Cutting System”, 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen, France, pp.691-698

**[Fos.(2002)]** R.D. Fossey, D.A. Summers, J.G. Blaine, G. Galecki, S. Dorle, “A Multi-Use Waterjet Tool for Humanitarian Demining”, 16th International Conference on Water Jetting, Aix-en-Provence, France, pp.557-566

**[Fos. et al.(1994)]** R.D. Fossey, D.A. Summers, J.G. Blaine, L.J. Tyler, « The New Generation Water Explosives Cutting System”, 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen, France, pp.691-698

**[Gadd et al.2000]** M.W. Gadd, R. Baolin, H. Zawzaw, “Abrasive Suspension Jet Cutting Sytem for the Ship Repair Industry”, 15th International Conference on Jetting technology, Ronneby, Sweden, pp.93-109

**[Gal. et al.(1991)]** G. Galecki, M. Mazurkiewicz, D.A. Summers, «preparation of Secondary Fiber Stock by High Pressure Waterjets », 6th American Water Jet Conference, Houston, USA, pp.505-513

**[Gal.Sum.(1994)]** G. Galecki, D.A. Summers, J. Sprung, J. Yount «Development of a Waste Excavation End Effector », 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen, France, pp.637-647

**[Geskin et al 2002]** E.S. Geskin, B. Goldenberg, R. Caudill;”Development of Advanced CRT Disassembly Technology”, 16th International Conference on Water Jetting, Aix-en-Provence, France, pp.583-593

**[Gund. et al.]** I.H. Gundeler, J.D. Lutz, W.T. Wheelis, «Recovery and Recycling of Aluminium, Copper and Precious Metals from Dismantled Weapon Components”, EPD Congress 1995, Las Vegas, USA, 12-16 Feb. 1995

**[Has(1977)]** M. Hashish, M.P. Plessis, «Theoretical and Experimental Investigations of High Velocity Water Jet Cutting », ASME WAM, Nov. 1977, Paper n° 77WA/Prod-38, Journal of Engineering for Industry

**[Has(1979)]** M. Hashish, M.P. Plessis, “Prediction Equations Telating High Velocity jet Cutting Performance to Stand Off Distance and Multipasses”, Journal of Engineering for Industry, August 1979, Vol. 101, pp. 311-318

**[Hash.(1987)]** M. Hashish, “An improved Model of Erosion by Solid Particle Impact”, 7<sup>th</sup> Internationale Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact, Cambridge, paper 66

**[Has.(1989)]** M. Hashish, “A Model for Abrasive-waterjet Machining”, Transactions of the ASME-Journal of Engineering Materials and technology, Vol.111, pp.221-228

**[Has.Mil.(2000)]** M. Hashish, P. Miller, “Cutting and Washout of Chemical Weapons with High Pressure Ammonia Jets”, 15th International Conference on Jetting technology, Ronneby, Sweden, pp.81-92

**[Hlav.Vas.(1994)]** L. Hlavac, J. Vasek, «Physical Model of High Energy Liquid Jet for Cutting Rock», International journal of Water Jet Technology, Vol 2, n°1, June 1994, pp.39-50

**[Hood.(1990)]** M. Hood, R. Nordlund, E. Thimons, “A Study of Rock Erosion using High Pressure Water Jets”, International Journal of Rock. Mech. Min. Sci.and Geomech., Abstracts Vol. 27, pp.77-86, Pergamon Press

**[Hua.al.(1973)]** Y.C. Huang, F.G. Hammit, W-J. Yang, “Hydrodynamic Phenomena During High-Speed collision Between liquid Droplet and Rigid Plane” Trans. ASME, Journal of fluid engine. pp 276-292

**[Kik.et al.(2000)]** M. Kikukawa, S. Matsunaga, T. Inaba, O. Iwatsu, T. Takeda, “Development of Spherical Fine Powders by High Pressure Water Atomization Using Swirl Water jet” Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, Vol. 47 (2000), No 5, pp.453-457, ISSN 0532-8799

**[Kni. et al.(1998)]** M. Knirsch, R. Meyer-Pittroff, M. Weis, “Recovery of Materials from Carpeing”, Brevet Allemand DE19636845 , 1998

**[Knu.Bun.(1995)]** J.R. Knudson, T.H. Bunch, “Water Jet Stripping Head”, United States Patent 5 421 517

**[Less.(1981)]** M.B. Lesser, «Analytic Solutions of Liquid-Drop impact Problems”, Proc. Roy. Soc. London, A377, pp.289-308

**[Leu.Men.(1998)]** M.C. Leu, P. Meng, E.S. Geskin, L. Tismeneskiy, «Mathematical Modeling and Experimental Verification of Stationary waterjets Cleaning Process », Transactions of the ASME-Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol.120, pp. 571-579

**[Lou.Sch.(1982)]** H. Louis, W. Schikorr, «Fundamental Aspects in Cleaning with High Speed Waterjets”, 6<sup>th</sup> International Conference on Jetting Technology, Guildford, pp. 217-228

**[Louis et al. (2000)]** H. Louis, M. Oppermann, F. Pude, »Application of a hand-controlled Abrasive Water-Jet System for Dismantling of Metal Components”, 15th International Conference on Jetting technology, Ronneby, Sweden, pp.69-76

**[Mab.Cor.(1998)]** T. Mabrouki, A. Cornier, K. Raïssi, “The study of impact as the Elementary Mechanism in H.P. Pure Waterjet Paint Decoating Process”, 14th International Conference on Water Jetting, Brugge,Belgium,pp.563-577

**[Mab.Cor.(2000)]** T. Mabrouki, A. Cornier, K. Raïssi, “Experimental Investigation and Numerical Modelling of H.P. Pure Waterjet Impingement in the Aeronautical Decoating process”, 13<sup>th</sup> In. Conf. on Surface Traitments in the Aeronautical Industries, Surfair 2000, Cannes 14-16 June 2000,

- [Mab.Rai.(2000)]** T. Mabrouki, K. Raïssi, A. Cornier, «A numerical Simulation and Experimental Study of the interaction between a pure High-Velocity Waterjet and Targets : Contribution Investigate the Decoating Process », *Wear* 239 (2000) pp.260-273
- [Men.Ges.(1996)]** P. Meng, E.S. Geskin, M.C. Leu, L. Tismenetskiy, « Waterjet in-situ Reactor Cleaning », 13th Int. Conf. on Jetting Technology, Sardinia, Italy, pp.347-358
- [Men.Leu.(1996)]** P. Meng, M.C. Leu, E.S. Geskin, L. Tismenetskiy, “Cleaning with High-Pressure Directed Jets”, Japan-USA symposium on Flexible Automation, Boston, MA
- [Men.Ges.(1998)]** P. Men, E.S. Geskin, M.C. Leu, F. Li, L. Tismenetskiy, «An Analytical and Experimental Study of Cleaning With Moving Waterjets », *Transaction of ASME-Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.120, pp. 580-589
- [Mill.et al.(1994)]** D.S. Miller, D.H. Saunders, E. Claffey, « High Performance DIAJET Cutting System », 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen, France, pp.387-400
- [Mill.(2000)]** D.S. Miller, “Development of micro-abrasive water-jets”, 15th International Conference on Jetting technology, Ronneby, Sweden, pp.31-45
- [Mill.(2002)]** D.S. Miller, “Micromachining with abrasive waterjets”, 16th International Conference on Water Jetting, Aix-en-Provence, France, pp.59-74
- [Momber(1993)]** A.W. Momber, «Recent Developments in Water Jet Usage in Ground and Traffic Area Rebuilding », 7th American Water Jet Conference, Seattle, USA, pp.561-571
- [Mom.Kov.(1995)]** A.W. Momber, R. Kovacevic, “Statistical character of the failure of Multiphase Materials due to High Pressure Water Jet impingement”, *International Journal Of Fracture* 71 (1995), 1, S. 1-14
- [Mom. Kov.(1998)]** A.W. Momber, R. Kovacevic ; “Principles of Abrasive Water Jet Machining”, Springer ed. ISBN 3540-76239-6
- [Neusen et al(1994)]** K.F. Neusen, T.J. Gores, R.S. Amano, «Axial Variation of Particle and Drop Velocities Downstream from Abrasive Water Jet Mixing Tube», 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen, France, pp.93-104
- [Oba. et al.(1995)]** T. Obara, N.K. Bourne, J.E. Field, “Liquid Jet Impact on Liquid and Solid Surfaces”, *Wear* 186-187, pp.388-394
- [Pawan et al.(1994)]** J.S. Pawan, J. Munoz, W.L. Chen, W.R. Kratochvil, “Ultra High Pressure Waterjet Removal of Thermal Spray, Coatings”,
- [Piet.(1994)]** Y. Pietrasanta, “Livre Blanc sur le Recyclage des Matières Plastiques” Erec Editeur, 1994, ISBN 2-905519-20-7
- [Ran.(1958)]** W.E. Ranz, «Some Experiments on orifice sprays», *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 36, pp.171-175

**[Rehb.(1976)]** G. Rehbinder, “some Aspects on the Mechanical of Rock with a High Speed Water Jet”, 3th International Symposium on Jet Cutting Technology, 1976, Chicago, USA, pp. E1-1-E1-20

**[Rehb.(1977)]** G. Rehbinder, «Slot Cutting in Rock with a high Speed Water Jet », International Journal of Rock. Mechanical Mining Sci. and Geomechanical, Abstracts Vol. 14, pp.229-234, Pergamon Press

**[Remisz (1993)]** J. Remisz, W. Remisz, «Hydrodemolition : Why « Yes » and Why «No » », 7th American Water Jet Conference, Seattle, USA, pp.573-582

**[Rou.Sim.(1963)]** H. Rouse, I. Simon, “History of Hydraulics”, Dover Books, New York, n° 215

**[Shen.(1998)]** H. SHEN, R.J. PUGH, , E. FORSSBERG, “A review of plastics waste recycling and the flottation of plastics.” Resources, Conservation and Recycling 25: pp.85-109.

**[Shen(2001)]** H. Shen, E. Forsberg, R.J. Pugh, “Selective Flotation separation of Plastiques by Particle Control”, Ressources, Conservation and Recycling,(33), pp. 37-50

**[Shi.Field.(1997)]** H-H. Shi, J.E. Field, C.S.J. Picles, “High-Speed Liquid Impact on to Solid Targets with Differents Surface Geometries”, 21<sup>st</sup> International Symposium on Shock Waves, Great Keppel Island, Australia, paper : 5190

**[Spath, Klimmek(1996)]** D. Spath, M. Klimmek, “Waterjet Technology as a Tool for Efficient Dismantling of Technical Products-a New Application”, 13th Int. Conf. on Jetting Technology, Sardaigne, Italy, pp.655-662

**[Sprin.(1976)]** G.S. Springer, «Erosion by Liquid Impact », Scripta Publishing Co., Washington, DC.

**[Sum.(1990)]** D.A. Summers, “The Applications of waterjets to Hards Rock Cutting”, MINTECH-90, The Annual Review of International Mining Technology and Developpment, 1990, USA

**[Sum.Gal.(1996)]** D.A. Summers, G. Galecki, M. Rinker, J. Randolph, “The Development of a Ligh-Weight System for Excavating High Level Radioactive Waste from Underground Storage Tanks”, 13th Int. Conf. on Jetting Technology, Sardaigne, Italy, pp.393-403

**[Taz. Et al (1994)]** A. Tazibt, F. Parsy, N. Abriak, A. Schmitt, B. They, «Hydrodynamic Investigations and Prediction of Abrasive Acceleration Process in abrasive water jet Cutting », 12th International Conference on Jet Cutting Technology, Rouen, France, pp.67-80

**[Thiru.(1967)]** A. Thiruvengadam, «The Concept of Erosion Stength », Erosion by Cavitation or Inpingement, ASTM STP 408

- [Tieu et al.(2002)]** A. Tieu, W. Yan, M.M. Vijay, «Chemical and Radioactive Decontamination of Armored vehicles using high-frequency Forced Pulsed Waterjet Machine” 16th International Conference on Water Jetting, Aix-en-Provence, France,pp.609-626
- [Weiss(1998)]** M. Weiss, “Carpet Recycling with High Pressure Water Jets”, 14th International Conference on Water Jetting, Brugge, Belgium, pp.391-402
- [Weiss(2001)]** M. Weiss, «Separation of Fibre-Nonfibre-Compounds by High Pressure Waterjet », Journal of International Society of Water Jet Technology (ISWJT), 2001
- [Wil.Gra.(1993)]** R.J. Wilkins,E.E. Graham,”An Erosion Model for Water Jet Cutting”,Journal of Engineering of Industry,Vol.115, pp.53-61
- [Wit.( 1998)]** J. Witzel, « Recycling Compact Discs Using High Pressure Water Jets démantèlement CD”, 14th International Conference on Water Jetting, Brugge, Belgium, pp.418-431
- [Wri.et al.(1999)]** D. Wright, J. Wolgamott, G. Zink, “Nozzle performance in Rotary Applications”, 10<sup>th</sup> American Waterjet Conference, 14-17 August, 1999, Houston,, texas, paper 73
- [Wu. et al.(1986)]** K.J. Wu, R.D. Reitz, F.V. Bracco, ‘Measurements of Drop Size at the Spray Edge near Nozzle in Atomizing, Physics Fluid, n°29, pp.941-951
- [Yan.(1974)]** K. Yanaida, «Flow characteristics of Water jets”, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Jet Cutting Technology, paper A2
- [Yan. et al.(1978)]** K. Yanaida, A. Ohashi, «Flow Characteritics of Water Jets in Air », 4<sup>th</sup> International Symposium on Jet Cutting Technology, paper A3
- [Yan.Oha.(1978)]** K. Yanaida, A. Ohashi, «Flow, Characteristics of Water Jets », 4th International Symposium on Jet Cutting Technology, BHRA Fluid Eng., Cambridge, England, A2, pp.19-32
- [Wu.Kim.(1995)]** S.S. Wu, T.J. Kim, An Application Study of Plain Waterjet Process for Coating Removal”, 8<sup>th</sup> International Confernce on Jetting Technology, Houston, USA, pp. 941-951
- [Zel.et.al.(1958)]** A.N. Zelenin, G.M. Vesselov, Y.G. Konijasin, “Rock Breaking with Jet-Stream under Pressure up to 2000 Atmosphere”, problems of mining, Terpigorev Volume, pp.112-122,Moscow, 1958
- [Zhang(1997)]** S. Zhang, E. Forsberg, «Mechanical Separation-oriented Characteization of Electronic Scrap », Ressources, Conservation and Recycling,(21), pp. 247-269
- [Zhang(1999)]** S. Zhang, E. Forsberg, “Intelligent Liberation and Classification of Electronic Scrap”, Powder Technology (105), pp.295-301

## Thèses

[**Lat.(1998)**] B. Latif, «Etude et Modélisation de la Découpe d'un Matériau Ductile par Jet d'Eau Abrasif », Thèse de Doctorat soutenue à l'ENSAM, Paris

[**Fer.(2001)**] S. Ferrendier, «Influence de l'Evolution Granulométrique des Abrasifs sur l'Enlèvement de la Matière », Thèse de Doctorat soutenue le 14-12-2001 à l'ENSAM-Chambéry

[**Mab.(2000)**] T. Mabrouki, « Exploration Expérimentale et Modélisation Numérique des Impacts Fluidiques : Contribution à l'Etude du Décapage par Jet d'Eau Pure HP », Thèse de Doctorat soutenue le 6 Juin 2000 à l'ENSAM, Paris

[**Gor.(1997)**] D. Gordine, «Découpage de Roches Dures par jet d'Eau Haute Pression », Thèse de Doctorat soutenue le 23 Septembre 1997 à l'Ecole des Mines, Paris

## Revue industrielle et techniques-Rapports d'étude

[**Cor.(2003)**] A. Cornier, « Le jet d'eau haute Pression se recycle », Environnement Magazine n°1616, Avril 2003, p.58

[**Cor.et al.(1992)**] A. Cornier, G. Basile, «Usinage de Génération au Jet d'Eau Abrasif : Cas du Tournage » Deuxième conférence en jet d'eau abrasif, Aquarèse Industries, Béthune, 18 Juin 1992,

**F. Mabrut, 1991**, « Les Applications Industrielles du Jet d'eau Haute Pression », CINELLI, France

**R. Werle, 1995**, « équipements à Jet d'eau sous haute Pression », INRS, France

« La Découpe par Jet d'Eau », AXIOME, France, 1998

« La Découpe par Jet d'Eau », Pôle Technologique, CRITT Amifop, Bar-le Duc, France

« Le Jet d'Eau-Outil de Développement des PME », SERAM, Technologie et Développement n]15, ANVAR, France, Novembre 1990

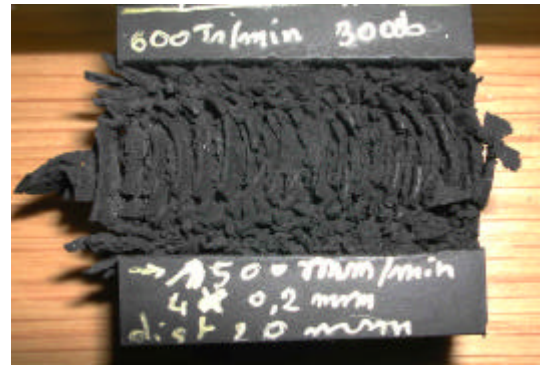
« Les Techniques de Découpe Par Jet d'Eau », Innovation 128, Centre de Prospective et d'Etude, Ministère de la Recherche et de la Technologie, France

Projet de Fin d'études : « démantèlement de pneus par jet d'eau H.P. », F. Lebreton, A. Ramoni, ENSAM Paris, 1999

Projet de Fin d'Etudes : « Démantèlement par jet d'eau H.P. », A. Stoeckel, L. Vincent, ENSAM Chambéry, 2003

# **ANNEXES**

Annexe 1 : Photos plan d'expériences initial

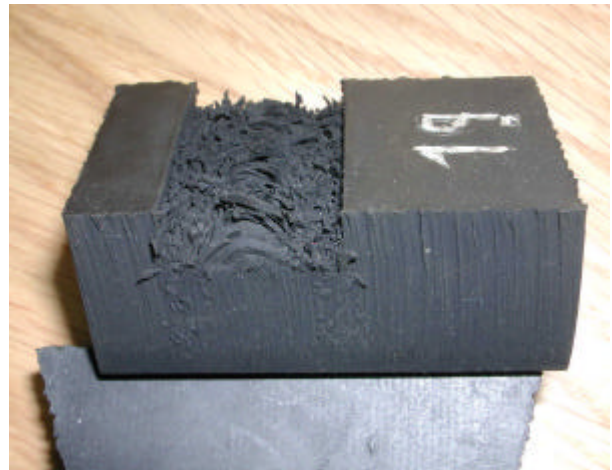




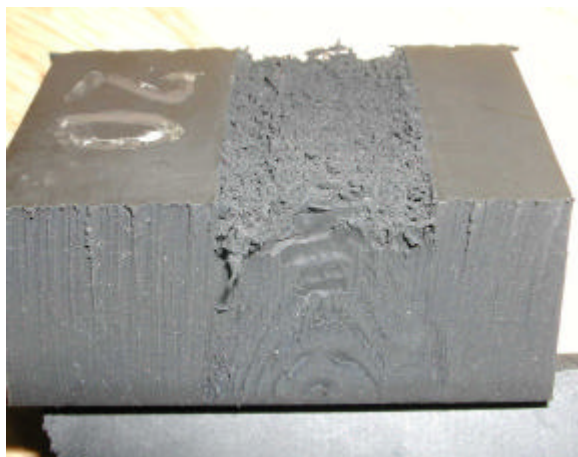
## Annexe 2 : Essais expérimentations ponctuelles



Essai 17



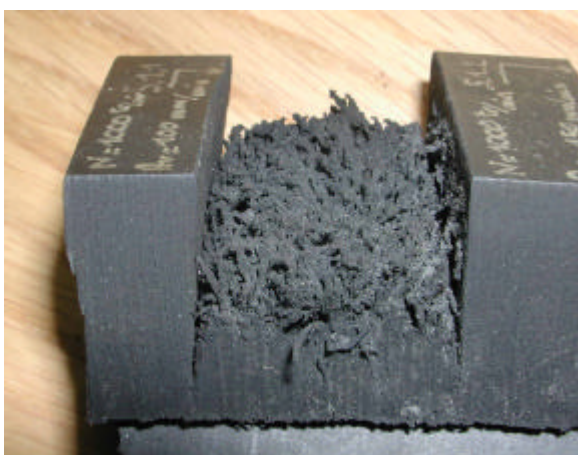
Essai 19



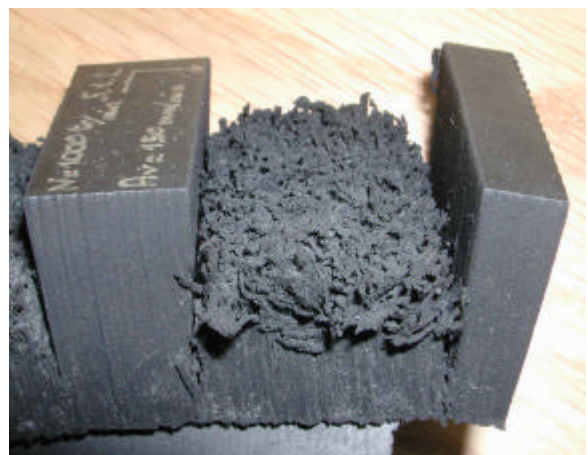
Essai 20



Essai 30



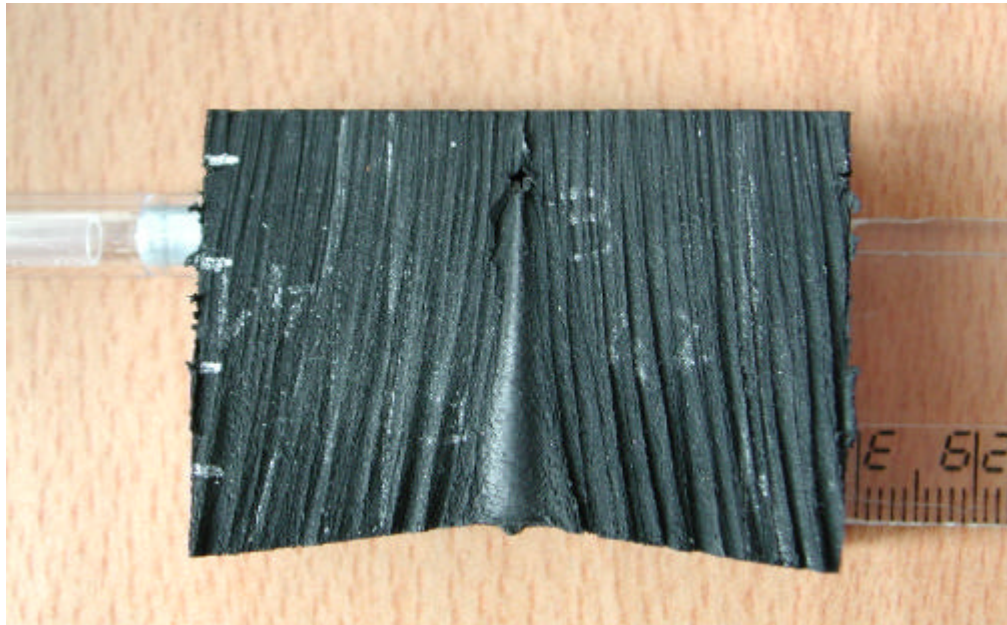
Essai 5.1.1.



Essai 5.1.2.

Annexe 3:

3.1 Photo agrandie du front de coupe, mesure angles et calcul Cf



Annexe 3.2. Vitesse linéaire :  $u = 2000 \text{ mm/min}$

s photo (mm)	a photo (mm)	Echelle	s (mm)	a (mm)	r (mm)	? (rad)	? (°)	$\sin(?)^{(1/6)}$
20	1	0,37736	0,0075	0,0004	0,07566	0,09992	5,725	0,09975062
30	2	0,37736	0,0113	0,0008	0,08528	0,13314	7,628	0,13274336
40	3	0,37736	0,0151	0,0011	0,10119	0,14972	8,578	0,14916097
50	4	0,37736	0,0189	0,0015	0,11868	0,15966	9,148	0,15898251
60	5	0,37736	0,0226	0,0019	0,13679	0,16628	9,527	0,16551724
70	6,5	0,37736	0,0264	0,0025	0,14346	0,18518	10,61	0,18412666
80	8,3	0,37736	0,0302	0,0031	0,14705	0,20676	11,85	0,20529024
90	9,5	0,37736	0,034	0,0036	0,16267	0,21033	12,05	0,20878484
100	11	0,37736	0,0377	0,0042	0,1736	0,21912	12,55	0,21736983
107	12,5	0,37736	0,0404	0,0047	0,17517	0,23259	13,33	0,23049913

D0 (m) = 0,0005

$u$  (m/s) = 0,0333

Ro (Kg/m<sup>3</sup>) = 1000

P (Bar) = 3000

Coef. dir.	3,6353
Ord. ori.	0,0865

V = 774,6

<b>Cf = 4,20E-02</b>	
<b>Ksi = 5,00E+07</b>	

## Annexe 41-CAMPAGNE D'ESSAIS pour la modélisation du démantèlement de caoutchouc

Numéro de campagne d'essai	Numéro de lopin	Numéro de l'essai	Caractéristiques :				
			Pression (Bar)	Diamètre (mm)	Hauteur de tir (mm)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse d'avance (mm/min)
1 : Calcul du coefficient de friction	1	1,1,1	3000	0,5	1	Découpe	2000
		1,1,2	3000	0,5	1	Découpe	1500
		1,1,3	3000	0,5	1	Découpe	1000
	2	1,2	3000	0,5	1	Découpe	2000
	3	1,3	3000	0,5	1	Découpe	2500
2 : Essai à un seul jet (R=8,06mm)	1 N=1000tr/mn	2,1,1	3000	0,2	20	1000	100
		2,1,2	3000	0,2	20	1000	600
		2,1,3	3000	0,2	20	1000	300
	2 N=500tr/mn	2,2,1	3000	0,2	20	500	100
		2,2,2	3000	0,2	20	500	600
		2,2,3	3000	0,2	20	500	300
3 : Un seul jet (R=5,7mm)	1	3,1	2500	0,2	20	1000	600
	2	3,2	2500	0,2	20	500	300
4 : Découpe avec la buse rotative	1	4,1,1	2500	0,2	20	Découpe	1000
		4,1,2	2500	0,2	20	Découpe	2000
		4,1,3	2500	0,2	20	Découpe	3000
		4,1,4	2500	0,2	20	Découpe	5000
	2	4,2,1	2500	0,2	20	Découpe	7000
		4,2,2	2500	0,2	20	Découpe	10000
		4,2,3	2500	0,2	20	Découpe	12000
5 : Essai à un seul jet (R=8,06mm)	1	5,1,1	2500	0,2	20	1000	100
		5,1,2	2500	0,2	20	1000	150
		5,1,3	2500	0,2	20	1000	200
	2	5,2,1	2500	0,2	20	750	75
		5,2,2	2500	0,2	20	750	112,5
		5,2,3	2500	0,2	20	750	150
	3	5,3,1	2500	0,2	20	500	100
6 : Essai à 4 jets	1	6,1,1	2500	0,2	20	1000	1000
		6,1,2	2500	0,2	20	1000	600
	2	6,2,1	2500	0,2	20	500	500

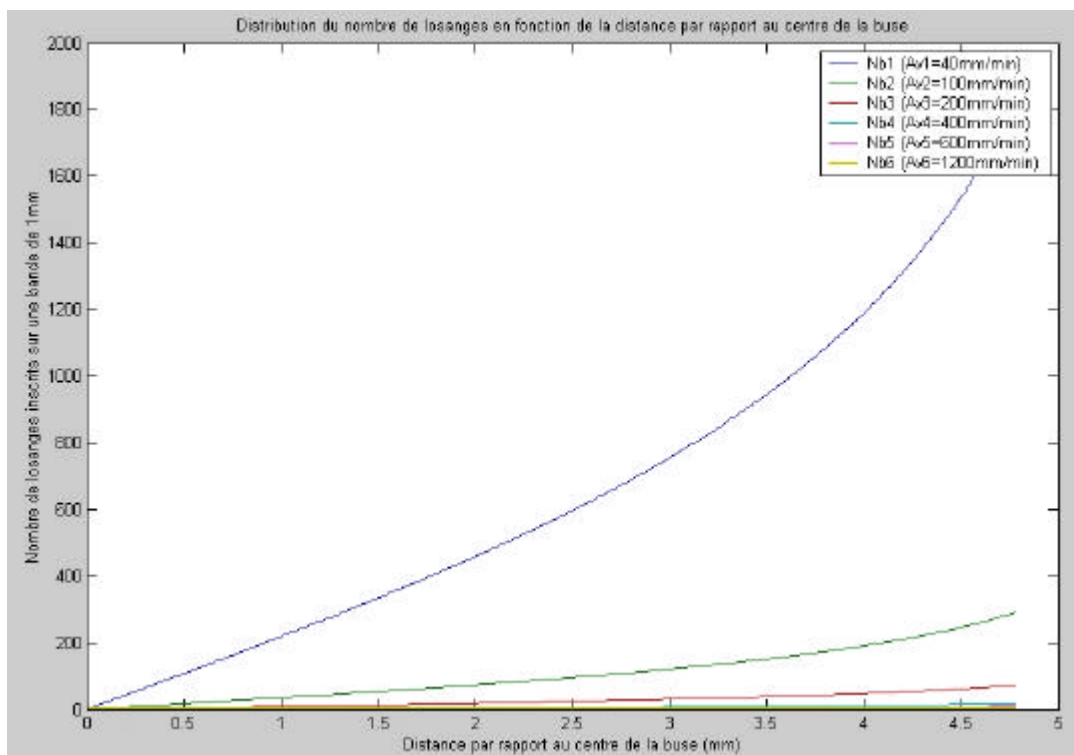
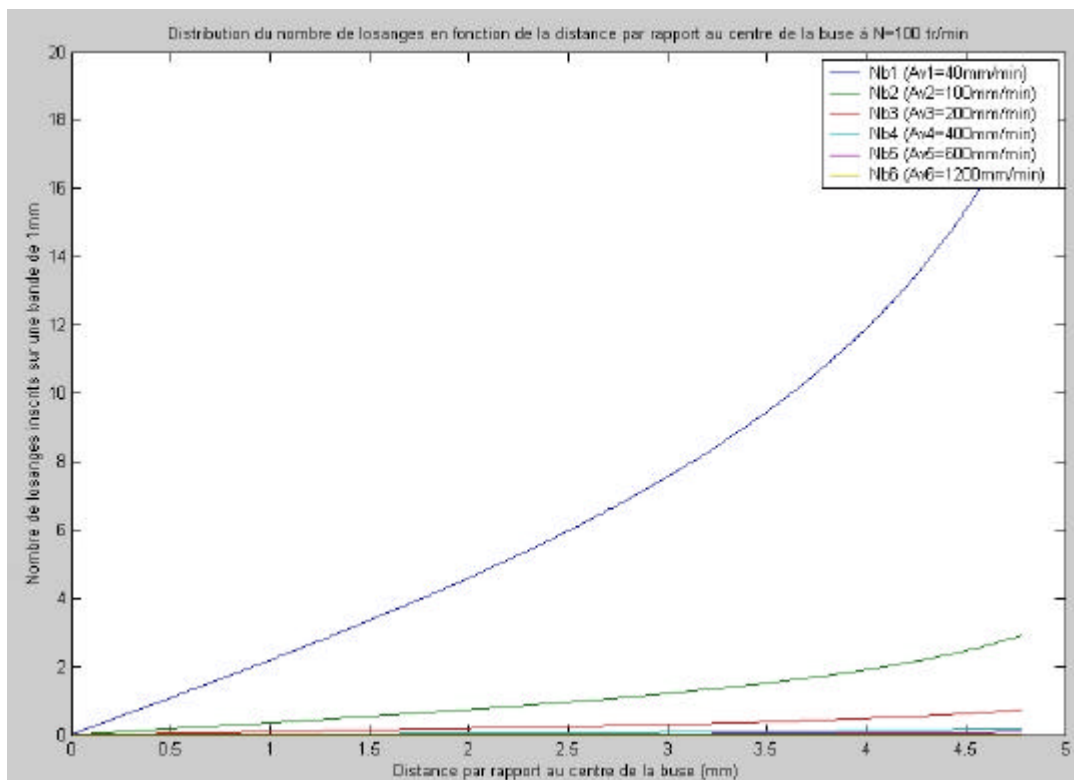
## Annexe 4.2. Calcul de la profondeur de pénétration du jet dans le caoutchouc

<b>Données :</b>				
<b>Angles limites de déviation :</b>				
?min (°)	10			K= 0,5
?max (°)	15			
N (tr/min)	100	<u>Vitesse linéaire</u>		<b>Profondeur de pénétration</b> : (mm) smin = 20,1 smax = 22,1 <b>Découpe</b>
Ksi	5,00 <sup>E</sup> +07	u = 0,1256637	(m/s)	
P (Bar)	2400			
Cf	4,20 <sup>E</sup> -02	<u>Vitesse en sortie de buse</u>		<b>Profondeur de pénétration</b> : (mm) smin = 10,1 smax = 11,1 <b>Rotatif</b>
Ro (Kg/m3)	1000	V0 = 692,82032	(m/s)	
D0 (mm)	2,00 <sup>E</sup> -01			
R (mm)	12	A(u) = 1,91 <sup>E</sup> -04		

<b>Données :</b>				
<b>Angles limites de déviation :</b>				
?min (°)	10			K= 0,5
?max (°)	15			
N (tr/min)	500	<u>Vitesse linéaire</u>		<b>Profondeur de pénétration</b> : (mm) smin = 13,1 smax = 14,7 <b>Découpe</b>
Ksi	5,00 <sup>E</sup> +07	u = 0,6283185	(m/s)	
P (Bar)	2400			
Cf	4,20 <sup>E</sup> -02	<u>Vitesse en sortie de buse</u>		<b>Profondeur de pénétration</b> : (mm) smin = 6,6 smax = 7,3 <b>Rotatif</b>
Ro (Kg/m3)	1000	V0 = 692,82032	(m/s)	
D0 (mm)	2,00 <sup>E</sup> -01			
R (mm)	12	A(u) = 9,55 <sup>E</sup> -04		

<b>Données :</b>				
<b>Angles limites de déviation :</b>				
?min (°)	10			K= 0,5
?max (°)	15			
N (tr/min)	1000	<u>Vitesse linéaire</u>		<b>Profondeur de pénétration</b> : (mm) smin = 10,7 smax = 12,1 <b>Découpe</b>
Ksi	5,00 <sup>E</sup> +07	u = 1,2566371	(m/s)	
P (Bar)	2400			
Cf	4,20 <sup>E</sup> -02	<u>Vitesse en sortie de buse</u>		<b>Profondeur de pénétration</b> : (mm) smin = 5,3 smax = 6,0 <b>Rotatif</b>
Ro (Kg/m3)	1000	V0 = 692,82032	(m/s)	
D0 (mm)	2,00 <sup>E</sup> -01			
R (mm)	12	A(u) = 1,91 <sup>E</sup> -03		

## Annexes 5.1. Distribution nombre losanges par rapport à l'axe de la tête



## ANNEXE 5.2. Notice explicative de Matlab :

Les calculs présentés sont réalisés pour une vitesse de rotation de 1000 tr/min et pour différentes vitesses d'avance.

- Calcul du nombre de losanges inscrits dans un carré d'un millimètre sur un millimètre par rapport à la distance au centre de la buse

% Calcul de la densité de losange selon le rayon de passage pour une buse un jet de rayon 5,7mm et d'angle 5,7°

% Hauteur de tir

H=20;

% Rayon de du jet

d=5.7;

% Inclinaison en °

Betadeg=5.7;

% Calcul de la distance d'impact par rapport au centre de la buse

R=d+tan(Betadeg\*pi/180);

% Entrée des différentes avances

Av1=40;

Av2=100;

Av3=200;

Av4=400;

Av5=600;

Av6=1200;

% Variable 'distance par rapport au centre de la buse

r=0.01:0.01:R-1;

% Vitesse de rotation

N=1000;

% Calcul du nombre de losange en fonction de la distance par rapport au centre de la buse

Nb1=2./((Av1/N)^2\*tan(acos(r/R)));

Nb2=2./((Av2/N)^2\*tan(acos(r/R)));

Nb3=2./((Av3/N)^2\*tan(acos(r/R)));

Nb4=2./((Av4/N)^2\*tan(acos(r/R)));

Nb5=2./((Av5/N)^2\*tan(acos(r/R)));

Nb6=2./((Av6/N)^2\*tan(acos(r/R)));

% Représentation graphique de cette distribution

plot(r,Nb1,r,Nb2,r,Nb3,r,Nb4,r,Nb5,r,Nb6)

- Calcul de la densité de passage dans un carré d'un millimètre sur un millimètre par rapport à la distance au centre de la buse

```

% Calcul de la densité (longueur) de passage sur une bande de 1 mm de large pour une buse
un jet (d=5.7mm et Béta=5.7°)
%Hauteur de tir
H=20;
% Rayon de du jet
d=8.06;
% Inclinaison en °
Betadeg=9.55;
% Calcul de la distance d'impact par apport au centre de la buse
R=d+tan(Betadeg*pi/180);
% Entrée des différentes avances
Av1=40;
Av2=100;
Av3=200;
Av4=400;
Av5=600;
Av6=1200;
% Variable 'distance par rapport au centre de la buse
r=0.01:0.01:R-0.1;
% Vitesse de rotation
N=1000;
% Calcul du nombre de losange en fonction de la distance par rapport au centre de la buse
L1=2*N/Av1*1./(sin(acos(r/R)));
L2=2*N/Av2*1./(sin(acos(r/R)));
L3=2*N/Av3*1./(sin(acos(r/R)));
L4=2*N/Av4*1./(sin(acos(r/R)));
L5=2*N/Av5*1./(sin(acos(r/R)));
L6=2*N/Av6*1./(sin(acos(r/R)));
% Représentation graphique de cette distribution
plot(r,L1,r,L2,r,L3,r,L4,r,L5,r,L6)

```

- Calcul de la densité de passage pour une buse 4 jets inscrits dans un carré d'un millimètre sur un millimètre par rapport à la distance au centre de la buse

```

% Calcul de la densité (longueur) de passage sur une bande de 1 mm de large pour le jet2
(d2=8.06mm et Béta=9.55°)
%Hauteur de tir
H=20;
% Rayon du jet
d2=8.06;
% Inclinaison en °
Betadeg2=9.55;
% Calcul de la distance d'impact par rapport au centre de la buse
R2=d2+tan(Betadeg2*pi/180);
% Entrée des différentes avances

```

```

Av1=40;
Av2=100;
Av3=200;
Av4=400;
Av5=600;
Av6=1200;
% Variable 'distance par rapport au centre de la buse
r=0.01:0.01:R2-0.1;
% Vitesse de rotation
N=1000;
% Calcul de la longueur de passage pour le jet 2
L21=2*N/Av1*1./(sin(acos(r/R2)));
L22=2*N/Av2*1./(sin(acos(r/R2)));
L23=2*N/Av3*1./(sin(acos(r/R2)));
L24=2*N/Av4*1./(sin(acos(r/R2)));
L25=2*N/Av5*1./(sin(acos(r/R2)));
L26=2*N/Av6*1./(sin(acos(r/R2)));

% Calcul de la densité (longueur) de passage sur une bande de 1 mm de large pour le jet1
(d1=5.7mm et Béta=5.7°)
% Rayon de du jet
d1=5.7;
% Inclinaison en °
Betadeg1=5.7;
% Calcul de la distance d'impact par rapport au centre de la buse
R1=d1+tan(Betadeg1*pi/180);
% Calcul de la longueur de passage pour le jet 1
if r>R1-1
L11=0;
L12=0;
L13=0;
L14=0;
L15=0;
L16=0;
else
L11=2*N/Av1*1./(sin(acos(r/R1)));
L12=2*N/Av2*1./(sin(acos(r/R1)));
L13=2*N/Av3*1./(sin(acos(r/R1)));
L14=2*N/Av4*1./(sin(acos(r/R1)));
L15=2*N/Av5*1./(sin(acos(r/R1)));
L16=2*N/Av6*1./(sin(acos(r/R1)));
end

% Calcul de la densité (longueur) de passage sur une bande de 1 mm de large pour le jet3
(d3=7mm et Béta=8.53°)
% Rayon de du jet
d3=7;

```



```

% Inclinaison en °
Betadeg3=8.53;
% Calcul de la distance d'impact par rapport au centre de la buse
R3=d3+tan(Betadeg3*pi/180);
% Calcul de la longueur de passage pour le jet
if r>R3-1
L31=0;
L32=0;
L33=0;
L34=0;
L35=0;
L36=0;
else
L31=2*N/Av1*1./(sin(acos(r/R3)));
L32=2*N/Av2*1./(sin(acos(r/R3)));
L33=2*N/Av3*1./(sin(acos(r/R3)));
L34=2*N/Av4*1./(sin(acos(r/R3)));
L35=2*N/Av5*1./(sin(acos(r/R3)));
L36=2*N/Av6*1./(sin(acos(r/R3)));
end

% Calcul de la densité (longueur) de passage sur une bande de 1 mm de large pour le jet4
(d4=8.04mm et Béta=7.26°)
% Rayon de du jet
d4=8.04;
% Inclinaison en °
Betadeg4=7.26;
% Calcul de la distance d'impact par rapport au centre de la buse
R4=d4+tan(Betadeg4*pi/180);
% Calcul de la longueur de passage pour le jet 4
if r>R4-1
L41=0;
L42=0;
L43=0;
L44=0;
L45=0;
L46=0;
else
L41=2*N/Av1*1./(sin(acos(r/R2)));
L42=2*N/Av2*1./(sin(acos(r/R2)));
L43=2*N/Av3*1./(sin(acos(r/R2)));
L44=2*N/Av4*1./(sin(acos(r/R2)));
L45=2*N/Av5*1./(sin(acos(r/R2)));
L46=2*N/Av6*1./(sin(acos(r/R2)));
End

```

```
% Superposition des 4 densités
L1=L11+L21+L31+L41;
L2=L12+L22+L32+L42;
L3=L13+L23+L33+L43;
L4=L14+L24+L34+L44;
L5=L15+L25+L35+L45;
L6=L16+L26+L36+L46;
% Représentation graphique
plot(r,L1,r,L2,r,L3,r,L4,r,L5,r,L6)
```

## **Annexe 6 : Contexte industriel du recyclage des pneumatiques**

### **Contexte réglementaire**

Les pneus usagés sont des déchets banals, et sont classés dans la rubrique 16 01 03 de la liste des déchets. Le décret n°2002-1563 du 24 décembre 2002 définit les principales dispositions relatives à l'élimination des pneus usagés. Tous les types de pneus sont concernés, exceptés ceux équipant les cycles (vélos) et les cyclomoteurs (<50 cm<sup>3</sup> et vitesse maxi de 45 km/h), car les quantités correspondantes sont relativement faibles et les circuits de distribution sont différents de ceux visés par ce décret.

Les acteurs concernés sont :

#### **-Les producteurs**

Ce sont pour l'essentiel les manufacturiers de pneumatiques (Michelin, GoodYear, Pirelli, ...) mais aussi certaines enseignes de centres autos qui mettent sur le marché des pneus à leur marque (Norauto par exemple) et les importateurs d'engins équipés de pneus (Volkswagen par exemple). Les entreprises de rechapage de pneus ne sont pas considérées comme producteurs au sens du décret. Le décret demande à ces producteurs d'organiser et de financer la collecte et l'élimination des pneus usagés, dans la limite des tonnages qu'ils mettent sur le marché français. Pour remplir collectivement leurs obligations, les sept principaux manufacturiers ont créé début 2002 la société ALIAPUR, chargée de mettre en place la filière de collecte et de traitement.

#### **Les distributeurs**

Ce sont principalement les vendeurs de pneumatiques (garages, centres autos, enseignes spécialisées dans le montage de pneus, ...). Le décret demande à ces distributeurs d'assurer la reprise gratuite des pneus usagés aux consommateurs et détenteurs de pneus usagés. Cette reprise gratuite devra être effective dès le 29 décembre 2003.

Les distributeurs ont la possibilité de remettre leurs pneus usagés, soit à des collecteurs agréés, soit directement aux entreprises exploitant des installations d'élimination agréées ou utilisant les pneus pour des travaux publics, remblaiement, génie civil ou ensilage.

#### Les détenteurs

Ce sont les entreprises qui détiennent directement des pneus usagés, en raison de leurs activités professionnelles (exemple d'une entreprise de transport qui achète des pneus neufs et qui procède elle-même au montage de ces pneus, ...). Cette catégorie couvre également les communes (ou leurs groupements), qui procèdent à la collecte sélective des pneus usagés (cas des déchèteries). Les détenteurs ont la possibilité de remettre leurs pneus usagés soit à des collecteurs agréés, soit directement aux entreprises exploitant des installations d'élimination agréées, ou utilisant les pneus pour des travaux publics, remblaiement, génie civil ou ensilage.

#### Les collecteurs

Comme pour les ramasseurs d'huiles usagées, les collecteurs de pneus devront, outre un centre stockage de pneus en règle par rapport à la législation sur les installations classées pour l'environnement, être agréés sur la base d'un cahier des charges défini dans un arrêté d'application qui doit encore être rédigé par les services du MEDD.

#### Les exploitants d'installations d'élimination

Les exploitants d'installations d'élimination devront eux aussi être agréés. Contrairement aux collecteurs, la procédure d'agrément de ces exploitants n'a pas besoin d'être précisée dans un arrêté d'application car elle est déjà prévue dans un décret de 1977.

En l'absence de Directive spécifique, les PUNR relèvent des Directives génériques, en particulier la Directive N° 75/442 du 15 juillet 1975 relative aux déchets. La Directive 99/31 du 26 avril 1999 relative à la mise en décharge des déchets précise que :

-les PUNR entiers ne seront pas admis en décharge, à compter du 16 juillet 2003, à l'exclusion des pneus utilisés en tant que matériau et des pneus usés broyés ;

-aucun PUNR ne sera pas admis en décharge à compter du 16 juillet 2006, hormis les pneus de bicyclette et ceux de diamètre extérieur supérieur à 1 400 mm.

## **Filières existantes**

### **Valorisation énergétique**

Le pneumatique, de par son origine polymérique, à un excellent pouvoir calorifique, (3 tonnes de pneus = 2 tonnes de fuel). Sa composition homogène en fait par ailleurs un combustible de substitution stable. La valorisation énergétique est cependant limitée en France – 18 % des pneus usagés valorisés -, contre 63 % au Japon, 44 % en Allemagne et 29 % en Grande-Bretagne ! Elle repose de surcroît, quasi essentiellement, sur les cimenteries. Le recours à des installations dédiées est très faible. L'industrie cimentière a commencé à utiliser des pneus usagés, en substitution partielle des combustibles traditionnels en 1992 – 1993. Ces pneus sont le plus souvent utilisés broyés, plus rarement entiers. En 1998, 26 000 tonnes de pneus usagés ont été valorisées en cimenterie. Les quantités pourraient progresser, mais les pneus sont concurrencés par d'autres déchets beaucoup plus rémunérateurs (comme les farines animales), dont la destruction peut présenter un caractère prioritaire pour la collectivité.

### **Valorisation matière par transformation mécanique**

La voie la plus prometteuse est le broyage en vue de l'obtention de poudrettes ou de granulés. Ces produits sont utilisés en combinaison avec d'autres matériaux. Ils peuvent prendre les formes suivantes :

- Poudrettes : il s'agit de particules de caoutchouc dont la dimension est inférieure à 2mm. Son coût d'obtention dépend de sa finesse, de son origine chimique et de l'absence ou non de corps étrangers. Les poudrettes sont utilisées comme charges, dans des mélanges servant à produire des pièces ne subissant pas de contraintes mécaniques ou dynamiques élevées.

Nous pouvons citer par exemple la fabrication de bandages et de roues pleines ("caddie", poubelles, tondeuses, brouettes...), l'intégration à des revêtements routiers (diminution du bruit et de l'aquaplaning du fait d'un drainage en surface)...

-Granulés : Ce sont des particules de caoutchouc d'une taille supérieure à celle des poudrettes. Les granulés peuvent être agglomérés par des résines, colorées ou non, et permettent, par moulage, de réaliser facilement des feuilles ou des plaques.

La valeur de cette poudrette dépend essentiellement de sa granulométrie, comme illustré Fig.5.1.

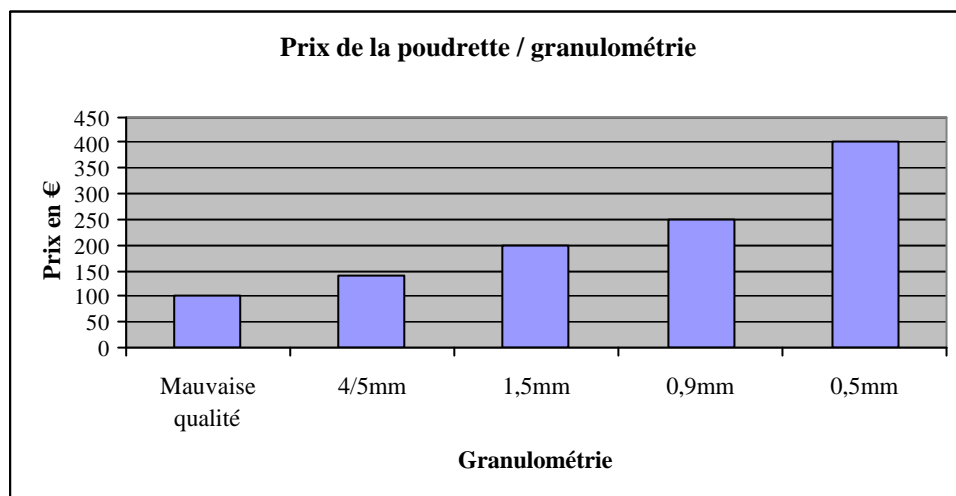


Fig.5.1. : Valeur de la poudrette selon sa taille

### Valorisation matière par transformation chimique

Plusieurs voies existent, dont certaines sont relativement anciennes. Les principales sont :

-Régénération : Elle résulte d'une combinaison d'actions chimiques, mécaniques et thermique. Cette technique a pour but de "casser" les liaisons soufrées et de diminuer la longueur des chaînes de polymères. Comme la poudrette, la régénération abaisse aussi les caractéristiques mécaniques des mélanges, ce qui limite son emploi.

-Pyrolyse – Thermolyse : l'action de la chaleur, en l'absence partielle ou totale d'oxygène, provoque une décomposition des polymères. A l'issue de cette réaction, nous retrouvons les monomères d'origine, ainsi que beaucoup d'autres molécules.

Le développement industriel de cette solution est cependant freiné par son coût de mise en œuvre.

# DEVELOPPEMENT D'UN MODELE D' ENLEVEMENT DE MATIERE PAR GRANULATION UTILISANT LE JET D'EAU HAUTE PRESSION : APPLICATION AU DEMANTELEMENT DE PNEUMATIQUES

**RESUME:**Le démantèlement de produits en fin de vie s'appuie le plus souvent sur des opérations de broyage, afin de libérer les principaux matériaux les uns des autres, avant tri et recyclage de chacun d'entre eux. Le jet d'eau haute pression trouve son intérêt, dans ce cadre, pour des produits multi-matériaux intimement mêlés, afin de réaliser un démantèlement sélectif permettant de séparer la matière d'enrobage, avec une granulométrie fine, de la matrice sans endommager cette dernière. Nous avons identifié deux phases principales :

-L'enlèvement de matière par usinage du matériau d'enrobage

-Le nettoyage de la matrice, très spécifique au produit à traiter.

L'objectif du travail, présenté dans ce document, est de modéliser cet enlèvement de matière, dans le cas d'utilisation de têtes multi-jets rotatives, de façon à pouvoir prédire le débit de matière. Nous avons mené en premier lieu une approche expérimentale, afin d'étudier de façon différentielle l'action d'un jet unique sur la matière et celle de jets multiples passant à de nombreuses reprises sur la matière. Ceci a permis de mettre en place un certain nombre d'hypothèses, relatives en particulier à l'influence du nombre de passages des jets par unité de surface, et au facteur d'amplification d'enlèvement de matière qui en découle. En intégrant, sur la largeur complète de la tête, ce nombre de passages, ce facteur d'amplification et le modèle de découpe par jet d'eau développé par Graham et Wilkins, il a été possible de mettre en place, sous forme d'un logiciel, un modèle d'enlèvement de matière permettant de calculer le débit de matière en fonction des paramètres procédés. Ceci a ensuite été appliqué au démantèlement de pneumatiques automobiles, pour lesquels a été développé une cinématique originale permettant également un nettoyage complet de la carcasse métallique.

**Mots-clés:** *Jet d'eau H.P., recyclage, enlèvement de matière, modélisation usinage,, interaction matériau / procédé, démantèlement de pneus*

## Water Jetting Milling Model : Application at the Automobile Tyres Dismantling

**Abstract :** *Actually, the principal recycling solution at the end of the life of the old materials is the shredding, in order to separate all the various materials as well as possible. The difficulties of this last solution are the capacities of the crushers, and the re-use possibilities of materials after crushing, the geometric and dimension forms are generally too important for a good valorisation.*

*In our study, we tried to show the interest of using the high pressure water jet technology as a dismantling tool, with the possibility to obtain a very small material powder, completely separated from the others element. In the first experimental approach we studied the parameters process. In order to explain all the phenomena. Our proposition consisted in setting up a simulator computing system in order to forecast the flow rate matter. We worked for the experimental approach with a multi - jet rotary nozzles, usually used for stripping applications. The tests were realized on small size rubber sample with the objective to have different section of matter with different waterjet parameters. This experimental approach proved that there is an important difference between the depth of kerf of one nozzle in cutting application and the depth with the multi-jet rotatory system. The depth is very more important with the last one. We have a sort of "amplification factor". It was calculated for all the section of rotary systems. We obtained like that the "kerfs concentration" for all the points of the surface sample, representing by the addition of length of the kerfs for 1 mm<sup>2</sup>. We used for the theoretical study the cutting model of Graham and Wilkins. It is possible like that to obtain a depth of kerf for all the nozzles. We used the kerfs concentration and the amplification factor to obtain the removal section of matter. An application was realised for tyres.*

**Keywords:** *Water Jetting; recycling; machining model, tyres dismantling, material / process interaction*

