HAL
open science

Etude expérimentale de la fissuration des aciers 40-NCD-16 et XC-18 par impact et usinage rapide : application à l'analyse des déformations par imagerie numérique

Laurent Faure

▶ To cite this version:

Laurent Faure. Etude expérimentale de la fissuration des aciers 40-NCD-16 et XC-18 par impact et usinage rapide : application à l'analyse des déformations par imagerie numérique. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paul Verlaine - Metz, 1997. Français. NNT : 1997METZ052S . tel-01777231

HAL Id: tel-01777231
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01777231v1

Submitted on 24 Apr 2018

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.

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

B126332

ISGMP

INSTITUT SUPERIEUR DE GENIE MECANIQUE
ET PRODUCTIQUE

THESE

Présentée à

UNIVERSITE DE METZ

PAR

Laurent Faure

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE - METZ
N° inv. 1997 1085
Cote S/M3 97/52
Loc Magasin

Pour l'obtention du grade de :

DOCTEUR de L'UNIVERSITE de METZ

SPECIALITE : *Science de l'ingénieur*
OPTION : *Mécanique*

Etude Expérimentale de la Fissuration des Aciers 40-NCD-16 et XC-18 par Impact et Usinage Rapide- Application à l'Analyse des Déformations par Imagerie Numérique.

A soutenir le 12 Mars 1997 devant le jury composé de :

KLEPACZKO J.R.	*(L.P.M.M. -Metz-)*	*Directeur*
MOLINARI A.	*(L.P.M.M. -Metz-)*	*Directeur*
DRAGON A.	*(E.N.S.M.A. -Poitiers-)*	*Rapporteur*
PINEAU A.	*(Ecole des Mines -Evry-)*	*Rapporteur*
BRAULT G.	*(D.G.A. -Paris-)*	*Examinateur*
DORMEVAL R.	*(C.E.*	*Examinateur*

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE DE METZ
022 177459 7

Laboratoire de Physique et Méca
I.S.G.M.P., Ile du Saulcy, 57045

Table des Matières Principale

Introduction Générale I

Chapitre I : Techniques Dynamiques Expérimentales en Compression, Torsion et Poinçonnage

I - INTRODUCTION 3

II - LES ESSAIS DE COMPRESSION DYNAMIQUE 5

II - 1 : LES BARRES D'HOPKINSON 5

II - 1.1 : ANALYSE DES SIGNAUX DES JAUGES 8

II - 1.2 : SECONDE CONFIGURATION DES BARRES 11

II - 2 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA TECHNIQUE 12

II - 2.1 : ONDES 12

II - 2.2 : EPROUVETTE 13

II - 3 : CONCLUSION 14

III - LES ESSAIS DE TORSION 15

III - 1 : LES MACHINES HYDRAULIQUES RAPIDES 16

III - 2 : LES MACHINES DE TORSION A CHOCS 19

III - 3 : LES BARRES DE KOLSKY 20

III - 3.1 : CONDITIONS DE CHARGEMENT DE L'EPROUVETTE 24

III - 3.2 : AVANTAGES PROCURES PAR CETTE TECHNIQUE 25

III - 3.3 : INCONVENIENTS DE LA TECHNIQUE 25

III - 3.4 : EPROUVETTE 27

IV - LE POINÇONNAGE DYNAMIQUE 28

IV - 1 : METHODE DU DOUBLE CISAILLEMENT 29

IV - 2 : PERFORATION 30

IV - 3 : POINÇONNAGE D'UNE EPROUVETTE CHAPEAU 31

V - CONCLUSION 32

Chapitre II : Résultats Expérimentaux sur la Fissuration Dynamique et les B.C.A.

I - INTRODUCTION 34

II - FISSURATION DYNAMIQUE : QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX 35

II - 1 : METHODE DES OMBRES OPTIQUES : "CAUSTICS" 36

II - 2 : PROPAGATION D'UNE FISSURE RAPIDE 37

II - 3 : COMPARAISON K_{ID} ET K_I 39

II - 4 : IMPACT ET FISSURATION 41

III - BANDES DE CISAILLEMENT ADIABATIQUE : QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX 43

III - 1 : COMPORTEMENT DES B.C.A. SOUS UN IMPACT 44

III - 1.1 : SYNTHESE 47

III - 2 : VITESSE DE PROPAGATION D'UNE B.C.A. 47
III - 3 : MESURE DES TEMPERATURES 50

IV - CONCLUSION **51**

Chapitre III : Dispositif Expérimental

I - INTRODUCTION **53**

II - BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL - PARTIE MECANIQUE **55**
II - 1 : PRINCIPE GENERAL DU FONCTIONNEMENT 55
II - 2 : LANCEUR A GAZ 57
II - 3 : TUBE DE LANCEMENT 59
II - 4 : TUBE D'HOPKINSON 60
II - 4.1 : PREMIERE FONCTION : MESURE DES EFFORTS 60
II - 4.2 : SECONDE FONCTION : SUPPORTS DES EPROUVETTES 61
II - 5 : TETE-SUPPORT DE L'EPROUVETTE 62
II - 6 : EPROUVETTE 64
II - 7 : PROJECTILE D'IMPACT 65

III - BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL - PARTIE ELECTRONIQUE **66**
III - 1 : MESURE DE LA VITESSE DU PROJECTILE 66
III - 2 : MESURE DES DEFORMATIONS DU TUBE 67
III - 3 : ETALONNAGE DU TUBE DE MESURE 69

IV - DISPOSITIF VIDEO CCD RAPIDE **71**
IV - 1 : PRINCIPE GENERAL DU FONCTIONNEMENT 72
IV - 2 : CAMERAS NUMERIQUES CCD-TV 75
IV - 3 : CONFIGURATION UTILISEE 76
IV - 4 : SYNCHRONISEUR 77
IV - 4.1 : SIGNAL DE SYNCHRONISATION 78
IV - 5 : ECLAIRAGE 79

V - ACQUISITION ET TRAITEMENT DES IMAGES **82**

VI - ASPECTS TECHNIQUES **83**
VI - 1 : SUPPORT REGLABLE 83
VI - 2 : BATI DU MONTAGE PARALLELE 83

VII - CONCLUSION **84**

Chapitre IV : Résultat des Impacts sur les Plaques Pré entaillées

I - INTRODUCTION **87**

II - PREMIERS RESULTATS : ANALYSE DU SIGNAL **88**

III - ESSAIS AVEC PREFISSURATION DES EPROUVETTES **90**

IV - ESSAIS SUR UN ACIER MI DUR XC-18 ..... **96**

IV - 1 : PREMIERE CONFIGURATION GEOMETRIQUE 96
IV - 2 : SECONDE CONFIGURATION GEOMETRIQUE 99
IV - 2.1 : 1ER CAS DE DEFORMATION POUR $V < V_c$ 100
IV - 2.2 : 2EME CAS DE DEFORMATION POUR $V = V_c$ 101
IV - 2.3 : 3EME CAS DE DEFORMATION POUR $V > V_c$ 105

V - CONCLUSION **108**

Chapitre V : Analyse Microscopique de la Déformation

I - INTRODUCTION **110**

II - PREPARATION DES ECHANTILLONS **111**

III - PROCEDURE DE L'ANALYSE D'IMAGES **113**

IV - TRAITEMENT DES DONNEES **116**
IV - 1 : PREMIERE ETAPE : DISTRIBUTION DES GRAINS 117
IV - 2 : SECONDE ETAPE : VALEURS MOYENNES 120
IV - 3 : TROISIEME ETAPE : INFLUENCE DE LA VITESSE D'IMPACT 123

V - CONCLUSION **124**

VI - RECAPITULATION DE LA PROCEDURE D'ANALYSE **125**

Chapitre VI : Usinage Très Grande Vitesse

I - INTRODUCTION **127**

II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL **127**
II - 1 : PRINCIPE DU DISPOSITIF 128
II - 2 : TETE PORTE-OUTIL ET PROJECTILE 129
II - 2.1 : TETE PORTE-OUTIL 129
II - 2.2 : PROJECTILE 130

III - RESULTATS EXPERIMENTAUX **131**
III - 1 : FORMATION D'UN COPEAU 131
III - 2 : MORPHOLOGIE DES COPEAUX 133
III - 3 : ETUDE DES EFFORTS DE COUPE 138
III - 3.1 : ACIER MI-DUR 140
III - 3.2 : ACIER DUR 142

IV - CONCLUSION **144**

Conclusion Générale **146**

Références Bibliographiques **148**

LISTE DES FIGURES

Introduction Générale

FIG. O-1 : EXEMPLE DE B.C.A. DANS UNE EPROUVETTE CHAPEAU CISAILLEE. I

FIG. O-2 : COURBE CONTRAINTE-DEFORMATION D'UN ACIER HY 100.
(D'après MARCHAND & DUFFY -1987-) IV

FIG. O-3 : PROPAGATION D'UNE ONDE UNIDIMENSIONNELLE POUR X > 0.
(D'après WU & FREUND -1984-) V

Chapitre I

FIG. I-1 : DISPOSITIF DES BARRES DE COMPRESSION. (D'après KOLSKY -1949-) 6

FIG. I-2 : CONFIGURATIONS DES BARRES DE COMPRESSION. (D'après LINDHOLM -1964-) 7

FIG. I-3 : FRONTS D'ONDES DANS LES BARRES D'HOPKINSON. 8

FIG. I-4 : REPRESENTATION DU DISPOSITIF PAR IMPACT DIRECT.
(D'après DHARAN & HAUSER -1970-) 11

FIG. I-5 : SCHEMA DU DISPOSITIF PAR IMPACT DIRECT. (D'après GORHAM -1972-) 12

FIG. I-6 : BANDES DE CISAILLEMENT DANS UNE EPROUVETTE EN COMPRESSION.
(D'après DELTORT -1993-) 15

FIG. I-7 : MACHINE HYDRAULIQUE ET EPROUVETTE UTILISEE.
(D'après LINDHOM & al. -1980-) 16

FIG. I-8 : COURBES CONTRAINTE DE CISAILLEMENT-DEFORMATION SUR DU CUIVRE.
(D'après LINDHOLM & al. -1980-) 17

FIG. I-9 : PHOTO DU PROTOTYPE ZWICK DU L.P.M.M. ET EPROUVETTE DE TORSION. 18

FIG. I-10 : SECTION DU DISPOSITIF DE TORSION PAR IMPACT ET EPROUVETTE.
(D'après CULVER -1972-) 19

FIG. I-11 : SCHEMAS DE LA MACHINE DE TORSION ET EPROUVETTE.
(D'après BAKER & YEW -1966-) 21

FIG. I-12 : SCHEMAS DES BARRES DE TORSION DYNAMIQUES ET EPROUVETTE.
(D'après DUFFY & al. -1971-) 22

FIG. I-13 : CYLINDRE ELEMENTAIRE EN TORSION. 22

FIG. I-14 : SYSTEME DE CHARGEMENT PAR EXPLOSIFS. (D'après HARTLEY & al. -1984-) 26

FIG. I-15 : EPROUVETTE DE TORSION A BORDS HEXAGONAUX. (D'après DUFFY & al. -1984-) 27

FIG. I-16 : FIXATION DE L'EPROUVETTE SUR LES BARRES DE TORSION. (D'après KLEPACZKO -1979-) 28

FIG. I-17 : DISPOSITIF DE DOUBLE CISAILLEMENT. (D'après KLEPACZKO -1994-) 29

FIG. I-18 : POINÇONNAGE. (D'après HARTMANN & al. -1981-) 30

FIG. I-19 : FORME ET DIMENSIONS D'UNE EPROUVETTE CHAPEAU. (D'après BUISSON -1986-) 31

FIG. I-20 : PROFIL DU SIGNAL TRANSMIS ET PARTIE CISAILLEE DE L'EPROUVETTE CHAPEAU. (D'après BUISSON -1986-) 31

Chapitre II

FIG. II-1 : GEOMETRIE DE LA ZONE PLASTIQUE EN POINTE DE FISSURE. (MODE II) (D'après VARFOLOMEEV & KLEPACZKO -1995-) 35

FIG. II-2 : PRINCIPE ET REPRESENTATION D'UN CAUSTIC. (D'après KALTHOFF -1987-) 36

FIG. II-3 : COMPORTEMENT D'UNE FISSURE D'UNE EPROUVETTE PREFISSUREE PENDANT LA CHUTE D'UNE MASSE. (D'après KALTHOFF & WINKLER -1983-) 38

FIG. II-4 : EVOLUTION DU COEFFICIENT K_{ID} EN FONCTION DE LA VITESSE DES FISSURES ET DU TYPE D'EPROUVETTE. (D'après KALTHOFF & WINKLER -1987-) 39

FIG. II-5 : COMPARAISON K_{ID} ET K_I (D'après KALTHOFF & al. -1980-) 40

FIG. II-6 : DISPOSITIF EXPERIMENTAL D'IMPACT. (D'après KALTHOFF & WINKLER -1987-) 41

FIG. II-7 : MODE DE FISSURATION SUIVANT LA VITESSE D'IMPACT ET DU RAYON EN FOND D'ENTAILLE. (D'après KALTHOFF & WINKLER -1987-) 42

FIG. II-8 : DISPOSITIF D'IMPACT EXPERIMENTAL. (D'après ZHOU & al. -1995-) 43

FIG. II-9 : MODES DE RUPTURE OBSERVES SUR DES EPROUVETTES PRE ENTAILLEES. 44

FIG. II-10 : VUE PLANE D'UNE B.C.A. ET D'UNE FISSURE. (D'après ZHOU & al. -1995-) 45

FIG. II-11 : HISTOIRE DE LA CONTRAINTE DE TENSION MAXIMALE DANS L'EPROUVETTE. (D'après ZHOU & al. -1995-) 46

FIG. II-12 : ENREGISTREMENT CONTRAINTE-TEMPS ; TEMPERATURE-TEMPS. (D'après MARCHAND & DUFFY -1988-) 48

FIG. II-13 : SCHEMATISATION D'UNE GRILLE AU PASSAGE D'UNE B.C.A.. 49

FIG. II-14 : ESTIMATION DES VITESSES DE PROPAGATION DE B.C.A. DANS UNE EPROUVETTE PLATE PRE ENTAILLEE. (D'après ZHOU & al. -1995-) 49

Chapitre III

FIG. III-1 : SCHEMA D'IMPLANTATION DU CANON A GAZ. 56

FIG. III-2 : LANCEUR A GAZ. 57

FIG. III-3 : COURBES D'EVOLUTION DES VITESSES DU PROJECTILE. 58

FIG. III-4 : TUBE DE LANCEMENT. 59

FIG. III-5 : FRONTS D'ONDE DANS LE TUBE D'HOPKINSON. 61

FIG. III-6 : TUBE D'HOPKINSON. 62

FIG. III-7 : TETE D'IMPACT-(FILETAGE EN COUPE). 63

FIG. III-8 : SCHEMA ET CARACTERISTIQUES DE L'EPROUVETTE D'IMPACT. 64

FIG. III-9 : PROJECTILE D'IMPACT. 65

FIG. III-10 : PRINCIPE DE LA MESURE DES VITESSES. 66

FIG. III-11 : SIGNAL D'UNE PHOTODIODE A LA COUPURE. 67

FIG. III-12 : DISPOSITION DES JAUGES SUR LE TUBE D'HOPKINSON. 68

FIG. III-13 : DISPOSITION DES ELEMENTS DU SYSTEME VIDEO. 74

FIG. III-14 : CAMERA NUMERIQUE ET UNITE DE COMMANDE. 75

FIG. III-15 : MONTAGES EN PARALLELE ET RADIAL. 76

FIG. III-16 : SYNCHRONISEUR. 78

FIG. III-17 : FLASH ELECTRONIQUE. 79

FIG. III-18 : SIGNAL D'ECLAIR DU FLASH ELECTRONIQUE EN FONCTION DU TEMPS. 80

FIG. III-19 : SYNCHRONISATION DES DIFFERENTS SIGNAUX AU COURS D'UNE PRISE DE VUES. 81

FIG. III-20 : ELEMENTS DU SYSTEME D'ACQUISITION. 82

FIG. III-21 : SUPPORT EN ALUMINIUM ET CAMERA. 83

FIG. III-22 : VUE DU MONTAGE DES CAMERAS RAPIDES. 84

Chapitre IV

FIG. IV-1 : EXEMPLES DE SIGNAUX SUR DEUX EPROUVETTES NON ENTAILLEES EN XC-18. 88

FIG. IV-2 : EVOLUTION DE LA DISTANCE DE PENETRATION EN FONCTION DE LA VITESSE D'IMPACT SUR DES EPROUVETTES EN XC-18 NON ENTAILLEES. 89

FIG. IV-3 : SCHEMATISATION DU MECANISME DE RUPTURE DES EPROUVETTES PRE ENTAILLEES EN ACIER 40-NCD-16. 91

FIG. IV-4 : SIGNAUX DE SORTIE DES JAUGES POUR DEUX IMPACTS A 65 M/SEC SUR UN ACIER 40-NCD-16. 92

FIG. IV-5 : PHOTOGRAPHIE DU PLAN DE CISAILLEMENT DE L'EPROUVETTE. 93

FIG. IV-6 : SURFACE DU PLAN DE CISAILLEMENT. 94

FIG. IV-7 : VUES D'UNE B.C.A. AU SEIN D'UNE EPROUVETTE 40-NCD-16 IMPACTEE. 94

FIG. IV-8 : SEQUENCE PHOTOGRAPHIQUE D'UN IMPACT SUR UNE EPROUVETTE EN 40-NCD-16 PRE ENTAILLEE. 95

FIG. IV-9 : VUE D'UNE EPROUVETTE EN XC-18 PRE ENTAILLEE IMPACTEE A 37 M/SEC. 96

FIG. IV-10 : SIGNAUX DE SORTIE DES JAUGES POUR TROIS IMPACTS SUR UN ACIER XC-18 ENTAILLE. 97

FIG. IV-11 : EVOLUTION DES EFFORTS MOYENS APPLIQUES SUR L'EPROUVETTE EN FONCTION DE LA VITESSE D'IMPACT. 98

FIG. IV-12 : SCHEMA DE L'EPROUVETTE MODIFIEE. 99

FIG. IV-13 : VUE D'UNE EPROUVETTE EN XC-18 RAINUREE IMPACTEE A 40 M/SEC. 100

FIG. IV-14 : SIGNAL DE SORTIE DES JAUGES POUR UN IMPACT A 40 M/SEC SUR UNE EPROUVETTE XC-18 RAINUREE. 101

FIG. IV-15 : VUE D'UNE EPROUVETTE EN XC-18 RAINUREE IMPACTEE A 54,7 M/SEC. 102

FIG. IV-16 : SIGNAUX DE SORTIE DES JAUGES POUR DEUX IMPACTS SUR UNE EPROUVETTE XC-18 RAINUREE. 103

FIG. IV-17 : FACIES DE RUPTURE SUR DEUX ZONES DE L'ECHANTILLON. 104

FIG. IV-18 : VUE D'UNE EPROUVETTE EN XC-18 RAINUREE IMPACTEE A 78,8 M/SEC. 105

FIG. IV-19 : SIGNAUX DE SORTIE DES JAUGES POUR UN IMPACT A 78,8 M/SEC SUR UNE EPROUVETTE XC-18 RAINUREE. 106

FIG. IV-20 : EVOLUTION DES EFFORTS MOYENS D'IMPACT EN FONCTION DE LA VITESSE POUR DES EPROUVETTES RAINUREES. 107

Chapitre V

FIG. V-1 : ZONES D'ETUDE DANS LES EPROUVETTES IMPACTEES. 112

FIG. V-2 : EXEMPLE DE L'EVOLUTION DE LA STRUCTURE DANS LES DIFFERENTES ZONES D'UNE EPROUVETTE (XC05) IMPACTEE A 48 M/SEC. 113

FIG. V-3 : DEFORMATION DES GRAINS AU COURS D'UN IMPACT. 114

FIG. V-4 : PARTICULE NUMERISEE ET SES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES. 114

FIG. V-5 : RESULTAT D'UNE ANALYSE D'IMAGE SUR UNE EPROUVETTE (XC05) IMPACTEE A 48 M/SEC. 116

FIG. V-6 : VALEURS MAXIMUM DES DIMENSIONS GEOMETRIQUES EN FONCTION DE L'ECHANTILLON ET DE LA POSITION. 117

FIG. V-7 : EXEMPLE DE DISTRIBUTION DES GRAINS DANS LA CATEGORIE "ORIENTATION" EN FONCTION DE LA POSITION DANS L'ECHANTILLON XC05. 118

FIG. V-8 : EXEMPLE DE DISTRIBUTION DES GRAINS DANS LA CATEGORIE "LARGEUR" EN FONCTION DE LA POSITION DANS L'ECHANTILLON XC05. 119

FIG. V-9 : EVOLUTIONS DES MOYENNES DES PARAMETRES DIMENSIONNELS EN FONCTION DE LA POSITION DANS L'ECHANTILLON XC05. 121

FIG. V-10 : EVOLUTION DE LA DEFORMATION DES GRAINS EN FONCTION DE LA POSITION DANS L'ECHANTILLON (XC05). 122

FIG. V-11 : EVOLUTION DE LA DEFORMATION EN FONCTION DE LA VITESSE D'IMPACT DANS LA ZONE [0 µM - 300 µM]. 123

FIG. V-12 : PROCEDURE D'ANALYSE. 125

Chapitre VI

FIG. VI-1 : REPRESENTATION DE LA COUPE ORTHOGONALE SUR LE DISPOSITIF EXPERIMENTAL. 128

FIG. VI-2 : SCHEMA DES DIFFERENTS ANGLE DE COUPE. 129

FIG. VI-3 : FORMATION D'UN COPEAU CONTINU. 131

FIG. VI-4 : FORMATION D'UN COPEAU DISCONTINU. 132

FIG. VI-5 : TABLEAU DE CLASSIFICATION DES COPEAUX. 135

FIG. VI-6 : MORPHOLOGIE DES COPEAUX EN FONCTION DES PARAMETRES DE COUPE. 137

FIG. VI-7 : OSCILLOGRAMME TYPIQUE DES EFFORTS LONGITUDINAUX DE COUPE; N°1. 139

FIG. VI-8 : OSCILLOGRAMME TYPIQUE DES EFFORTS LONGITUDINAUX DE COUPE; N°2. 139

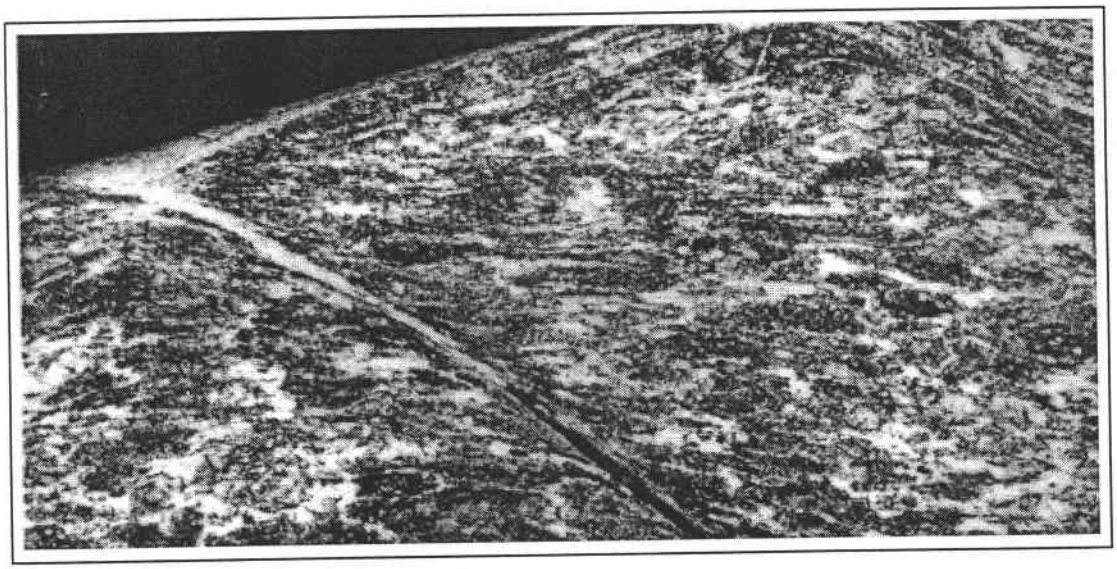
FIG. VI-9 : TABLEAU DES EFFORTS LONGITUDINAUX DE COUPE EN FONCTION DE LA VITESSE DE COUPE. 140

FIG. VI-10 : EVOLUTION DE LA FORCE LONGITUDINALE MOYENNE DE COUPE EN FONCTION DE LA VITESSE. 141

FIG. VI-11 : EFFORTS LONGITUDINAUX DE COUPE EN FONCTION DES ANGLES DE COUPE ET DE LA VITESSE DE COUPE. (COPEAUX MINCES). 143

FIG. VI-12 : EFFORTS LONGITUDINAUX DE COUPE EN FONCTION DES ANGLES DE COUPE ET DE LA VITESSE DE COUPE. (COPEAUX EPAIS). 143

INTRODUCTION GENERALE



Exemple de B.C.A. dans un copeau d'acier. (D'après G. SUTTER -1996-)

INTRODUCTION GENERALE

Le cisaillement adiabatique est un aspect de la déformation qui apparaît lorsque divers matériaux tels que les aciers, mais aussi certains métaux non ferreux ou les polymères, sont soumis à de grandes vitesses de déformation. Sa présence se caractérise par la formation de surfaces très étroites où la déformation est fortement localisée. Lorsqu'elles sont observées après attaque chimique, au microscope et par la tranche, ces surfaces apparaissent alors sous la forme de bandes très fines, parfois de couleur blanche, qui sont appelées Bandes de Cisaillement Adiabatique. (Notées aussi B.C.A. dans la suite de ce rapport)

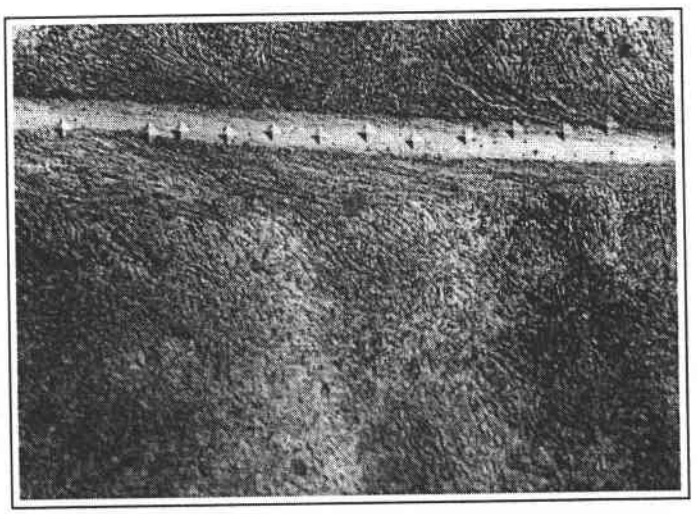


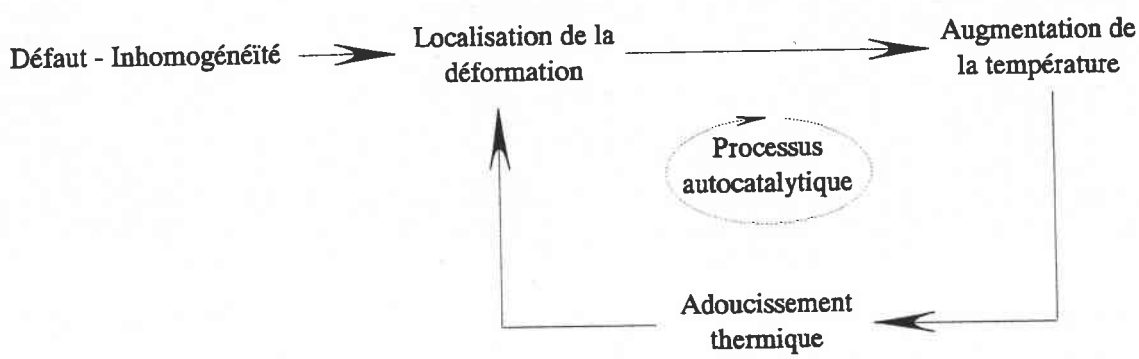
FIG. 0-1 : *Exemples de B.C.A. dans une éprouvette chapeau.*
(D'après POKORNY -1986-)

Lors de la déformation des métaux il est démontré qu'une importante fraction de l'énergie de déformation plastique, souvent prise égale à 90 %, est transformée en

chaleur puis est diffusée au sein du matériau. Dans le cas du cisaillement adiabatique, ce processus est sensiblement différent. Le terme adiabatique est ici utilisé pour indiquer qu'une large part de la chaleur générée lors de la déformation est restée confinée dans les B.C.A.. TRESCA [1]-*1878*- observe pour la première fois des B.C.A. sur des pièces forgées. Une interprétation du phénomène est émise, plus tard, par ZENER & HOLLOMON [2]-*1944*-. Ils montrent que le passage de conditions de déformations isothermes à adiabatiques est associé à l'augmentation de la vitesse de déformation.

Ils supposent qu'une déformation plastique effectuée à grande vitesse entraîne une augmentation de la température sans transfert de chaleur. Un adoucissement thermique est ainsi engendré localement qui réduit les caractéristiques mécaniques du matériau dans une zone limitée. Le processus de déformation y est alors facilité ce qui élève de nouveau la température et accentue la déformation. Le processus est dit auto catalytique.

Une explication de la formation des B.C.A. peut être fournie sur la base de cette interprétation. Une B.C.A. résulte d'une instabilité thermomécanique due à la présence d'un défaut de structure ou d'une inhomogénéïté dans la matière qui entraîne une localisation de la déformation. Sous certaines conditions de chargement, les propriétés thermiques du matériau deviennent insuffisantes pour diffuser la chaleur produite par cette déformation dans le matériau voisin, et un échauffement local est engendré. Ensuite le mécanisme de déformation suit le processus décrit par ZENER & HOLLOMON [2] pour aboutir finalement à la formation de B.C.A. dans lesquelles des fissures peuvent se propager et mener à la ruine de la structure.



Deux types de bandes de cisaillement sont répertoriés :

* *les bandes de déformation* : sont caractérisées par une très grande déformation en cisaillement (jusqu'à 100) dans une très petite zone de déformation. A l'intérieur de la bande, les grains sont fortement distordus mais aucun changement dans la microstructure du matériau n'apparaît.

* *les bandes de transformation* : dans lesquelles un changement de phase cristallographique s'est produit. Elles sont appelées "bandes blanches" en raison de leur apparence après attaque chimique.

L'apparition de B.C.A. est le signe d'un mode de transition d'une déformation homogène dans le matériau, vers une localisation. De nombreux auteurs tels que RECHT [3]-*1964*-, CULVER [4]-*1973*-, STAKER [5]-*1981*- ou MOLINARI & CLIFTON [6] -*1987*- ont proposé plusieurs critères d'instabilité appelés "*critère de contrainte de cisaillement maximum*", comme mécanisme de transition menant au cisaillement adiabatique.

Pour un matériau dont la contrainte de cisaillement τ s'exprime en fonction de la déformation γ, du taux de déformation $\dot{\gamma}$ et de la température θ, soit :

$$\tau = f(\gamma, \dot{\gamma}, \theta)$$

ce critère se traduit par $d\tau = 0$ et correspond au point dans le processus de déformation où l'effet déstabilisant de l'adoucissement thermique du matériau devient prépondérant sur celui stabilisant, de l'écrouissage.

De nombreuses données expérimentales expriment une certaine consistance avec le concept de "contrainte de cisaillement maximum" comme condition d'instabilité génératrice de B.C.A.. Leur analyse montre que le processus de cisaillement adiabatique résulte d'une succession d'états de la déformation du matériau :

(a) - Déformation en cisaillement homogène,

(b) - Instabilité menant à une déformation non homogène,

(c) - Apparition d'une zone de cisaillement faiblement localisée,

(d) - Formation complète d'une zone de cisaillement fortement localisée,

(e) - Fissuration ou rupture le long de ces zones.

Des observations effectuées par MARCHAND & DUFFY [7]-*1987*- avec un dispositif expérimental de barres de torsion confirment cette chronologie des événements. A l'aide de photographies de plusieurs éprouvettes tubulaires en acier HY 100, ils mettent en évidence trois étapes principales dans la formation de B.C.A. dans ce matériau, représentées à la figure **0-2**.

* Etape n°1 : s'interrompt au point où la contrainte de cisaillement est maximum. La déformation dans l'éprouvette est homogène, $\gamma_1 < 25\%$.

* Etape n°2 : la déformation est comprise entre γ_1 et $35\% < \gamma_2 < 45\%$. La contrainte commence à décroître légèrement et la déformation devient non homogène.

* Etape n°3 : correspond à la chute brutale de la contrainte qui coïncide avec une localisation de la déformation en de fines bandes de 20 μm de largeur pour cet acier.

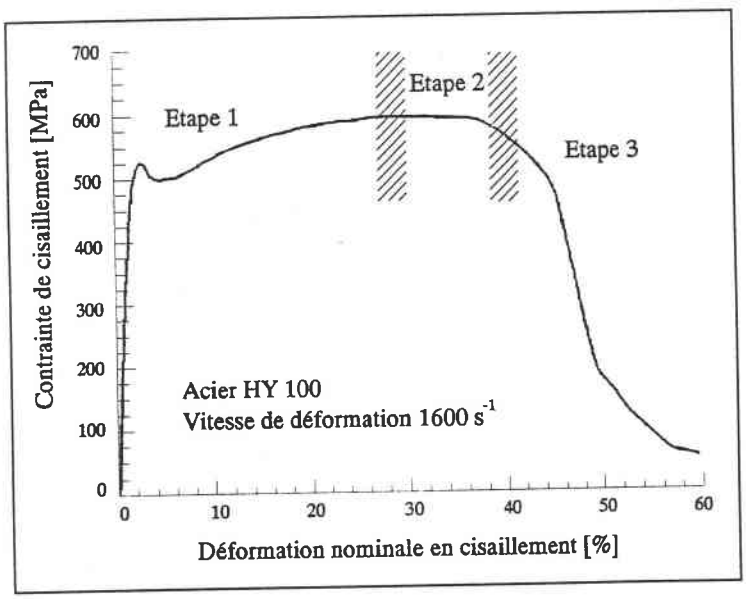


FIG. 0-2 : *Courbe Contrainte-Déformation d'un acier HY 100.*
(D'après MARCHAND & DUFFY -1987-)

Les rôles de l'écrouissage et de l'adoucissement thermique sont bien définis dans le mécanisme d'apparition du cisaillement adiabatique. Cependant ce phénomène se produit généralement lors d'événements dynamiques mettant en jeu de grandes vitesses de déformation (supérieures à 500 s^{-1}), et dans lesquels la propagation des ondes de déformation joue aussi un rôle significatif.

WU & FREUND [8]-*1984*-, étudient l'influence des ondes simples dans un milieu semi-infini, d'un matériau non linéaire. Pour une augmentation de déformation γ, la

contrainte correspondante est donnée par $\tau = f(\gamma)$. Ce matériau est soumis à sa frontière à une vitesse tangentielle $V(t)$. En théorie unidimensionnelle, il est possible de montrer que les déplacements $u(t)$ dans le milieu sont alors régis par l'équation :

$$\frac{\partial^2 u(t)}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u(t)}{\partial x^2} \quad \text{avec} \quad c = \sqrt{\frac{f'(\gamma)}{\rho}}$$

: vitesse des ondes de cisaillement ,

ρ : masse volumique du matériau.

Ainsi une déformation donnée se propage de la frontière dans le milieu à une vitesse déterminée par le niveau de contrainte correspondant. Sur une courbe classique contrainte-déformation, nous remarquons alors qu'à un accroissement de la contrainte d'écoulement correspond une diminution de la vitesse de propagation des ondes de déformation car le module tangent $f'(\gamma)$ diminue. Ainsi, aussitôt que la contrainte atteint son maximum τ^*, pour une déformation γ^*, comme montré à la figure **0-3**, ce module devient égal à zéro :

$$\frac{d\tau}{d\gamma} = f'(\gamma^*) = 0$$

et par conséquent, la vitesse de propagation correspondante des ondes devient aussi égale à zéro. Au delà de cette valeur critique τ^*, toutes les déformations provoquées par un incrément de contrainte ne se propagent plus. Elles sont "piégées" et sont accumulées à la frontière dans une bande de cisaillement. Ce phénomène est appelé "Wave Trapping".

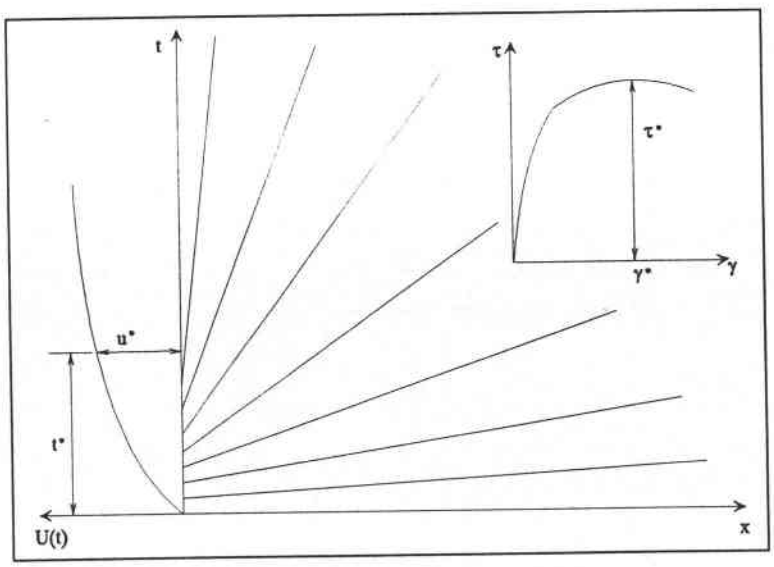


FIG. 0-3 : *Propagation d'une onde unidimensionnelle pour x>0.*
(D'après WU & FREUND -1984-)

Il est maintenant admis que les B.C.A. se créent, puis se développent au sein de la matière en se propageant à des vitesses variables, qui dépendent notamment des caractéristiques des matériaux testés et des conditions de chargement appliquées. De nombreuses études sont ainsi entreprises, visant à caractériser les conditions d'apparition du cisaillement adiabatique et à déterminer les vitesses de propagation des bandes de cisaillement au sein de différents matériaux.

Citons comme exemples les études analytiques menées par GRADY & KIPP [9]-*1987-*, [10]-*1992-*, par FREUND, WU & TOULIOS [11]-*1985-*, ou expérimentales effectuées par GIOVANOLA [12]-*1988-*, [13]-*1988-*, par ZHOU, ROSAKIS & RAVICHANDRAN [14]-*1996-* ou encore numériques réalisées par NEEDLEMAN [15]-*1989-*, BATRA & XIANGTHONG [16]-*1994-*, NEEDLEMAN & TVERGAARD [17]-1995-, ZHOU, RAVICHANDRAN & ROSAKIS [18]-*1996-*. L'analyse de l'influence de différents paramètres tels que les caractéristiques du matériau (mécaniques, physiques ou thermiques), la géométrie du défaut initial ou les conditions de chargement, est nécessaire à une meilleure compréhension du mécanisme de formation des B.C.A.. Des ouvrages tels que ceux de ROGERS [19]-*1979-*, DORMEVAL [20]-*1987-* ou de BAI & DODD [21]-*1992-*, proposent des études bibliographiques sur le cisaillement adiabatique.

Cette thèse concerne une étude expérimentale sur le cisaillement adiabatique et est focalisée plus particulièrement sur l'aspect propagatif des B.C.A..

Dans un premier temps nous avons conçu un dispositif expérimental dynamique afin de soumettre des éprouvettes parallélépipédiques à un chargement de mode II. Son fonctionnement est fondé sur le principe du canon à gaz et utilise de l'air comprimé pour propulser un projectile, à des vitesses comprises entre 10 m/sec et 100 m/sec, sur une éprouvette plane pré entaillée. Sa conception est basée en partie sur les dispositifs de double cisaillement employé par KLEPACZKO [22]-*1994-*, et celui utilisé par KALTHOFF & WINKLER [23]-*1987-*. Son originalité réside dans son tube de mesure, appelé aussi tube d'HOPKINSON, qui supporte l'éprouvette. Plusieurs jauges d'extensomètrie montées en pont complet et collées sur la circonférence mesurent les déformations lors du passage de l'onde élastique de transmission produite par l'impact.

Les ponts sont préalablement calibrés et les efforts appliqués sur l'éprouvette durant l'essai peuvent être alors déterminés.

Parallèlement aux impacts sur plaques, une seconde étude du cisaillement adiabatique, lors de l'usinage à très grande vitesse des métaux a été entreprise. Un montage permettant de simuler l'usinage rapide en coupe orthogonale a ainsi été développé. L'adaptation des deux montages d'impacts et d'usinage peut s'effectuer indifféremment et très rapidement sur le dispositif expérimental.

Notre dispositif est équipé d'un système vidéo ultra rapide. Il a été conçu sur le principe CRANTZ-SCHARDING [24]. Nous employons plusieurs caméras équipées de cellules numériques C.C.D.. Au cours d'un essai, chacune d'entre elles agit comme un appareil photographique et ne prend qu'une seule image. Nous employons six caméras de ce type avec un temps d'exposition minimum de 1 μsec. Elles sont synchronisées par un ensemble de cartes électroniques qui permet au final d'obtenir une série de six photographies sur une durée minimum de 6 μsec.

L'objectif est de photographier, au moyen de ce dispositif vidéo, les différentes étapes de la déformation des éprouvettes au cours des impacts. Un réseau de lignes ou de cercles est préalablement déposé sur les échantillons. L'apparition d'une bande de cisaillement déforme ce réseau. L'observation de l'évolution de cette déformation permet de suivre le trajet de la bande de cisaillement dans le temps et de définir ainsi sa vitesse de propagation.

Les résultats sur des plaques en 40-NCD-16 traité et en XC-18 non traité, aciers de duretés très différentes, sont ensuite présentés. Ils font apparaître des comportements très inégaux pour une géométrie d'éprouvette identique. Sous certaines conditions de chargement, des B.C.A. se forment dans les deux cas, cependant les directions de propagation diffèrent suivant le matériau testé. Pour l'XC-18 la propagation correspond à la direction de l'impact, mais pour le 40-NCD-16, elle est située dans un plan incliné à environ 45° par rapport au plan formé par la surface. Les B.C.A. s'initient au centre de la face d'impact et se propagent symétriquement vers les deux surfaces planes de l'éprouvette.

Lors des impacts sur certaines éprouvettes en XC-18, une empreinte due à la pénétration du projectile est créée. Les parties impactées de ces échantillons sont soumises à un examen microscopique de la déformation. Celle-ci est basée sur une méthode numérique d'analyse d'images. Les photographies de la texture des zones déformées sont numérisées et traitées par un logiciel spécifique. Un programme que nous avons développé recueille les données obtenues. Nous déterminons alors l'évolution des déformations et des orientations moyennes des grains au sein des éprouvettes en fonction de la distance par rapport à la partie impactée. L'influence de la vitesse d'impact sur ces paramètres est aussi étudiée.

Dans une dernière partie, nous décrivons les résultats obtenus lors des essais en usinage à grande vitesse. L'effet de la vitesse de coupe sur le niveau des efforts est présenté dans le cas de l'acier XC-18. L'existence d'un domaine de vitesse où les efforts de coupe sont minimaux est montrée. La nature des copeaux est ensuite étudiée et une classification est proposée. Une corrélation entre les différents paramètres comme l'angle de coupe, la vitesse ou la profondeur de passe et la nature des copeaux est établie.

Pour débuter ce rapport nous présentons une revue bibliographique des différentes méthodes expérimentales, parmi les plus utilisées, permettant de générer des B.C.A.. Les résultats sur le comportement de ces bandes créées par un chargement de mode II sont ensuite décrits.

CHAPITRE I

TECHNIQUES DYNAMIQUES EXPERIMENTALES EN COMPRESSION, TORSION ET POINÇONNAGE

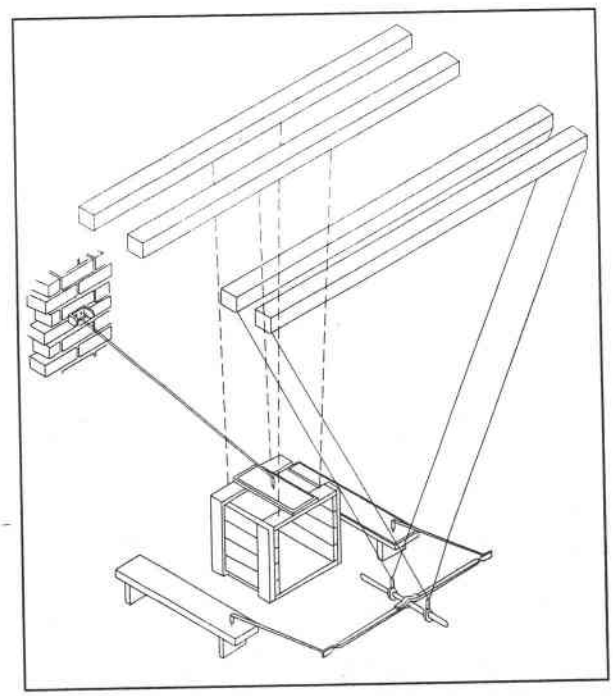


Illustration du dispositif expérimental d'HOPKINSON -1914-

CHAPITRE I

TECHNIQUES DYNAMIQUES EXPERIMENTALES EN COMPRESSION, TORSION ET POINÇONNAGE

Table des Matières

I - INTRODUCTION **3**

II - LES ESSAIS DE COMPRESSION DYNAMIQUE **5**

II - 1 : LES BARRES D'HOPKINSON 5

II - 1.1 : ANALYSE DES SIGNAUX DES JAUGES 8

II - 1.2 : SECONDE CONFIGURATION DES BARRES 11

II - 2 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA TECHNIQUE 12

II - 2.1 : ONDES 12

II - 2.2 : EPROUVETTE 13

II - 3 : CONCLUSION 14

III - LES ESSAIS DE TORSION **15**

III - 1 : LES MACHINES HYDRAULIQUES RAPIDES 16

III - 2 : LES MACHINES DE TORSION A CHOCS 19

III - 3 : LES BARRES DE KOLSKY 20

III - 3.1 : CONDITIONS DE CHARGEMENT DE L'EPROUVETTE 24

III - 3.2 : AVANTAGES PROCURES PAR CETTE TECHNIQUE 25

III - 3.3 : INCONVENIENTS DE LA TECHNIQUE 25

III - 3.4 : EPROUVETTE 27

IV - LE POINÇONNAGE DYNAMIQUE **28**

IV - 1 : METHODE DU DOUBLE CISAILLEMENT 29

IV - 2 : PERFORATION 30

IV - 3 : POINÇONNAGE D'UNE EPROUVETTE CHAPEAU 31

V - CONCLUSION **32**

SYMBOLES UTILISES DANS CETTE SECTION

A_b : Section initiale des barres d'HOPKINSON.

A_{ep} : Section initiale de l'éprouvette.

C_o : Célérité des ondes élastiques de compression dans les barres.

C_2 : Célérité des ondes élastiques de torsion dans les barres.

D_0 : Diamètre de l'éprouvette de compression.

E_b : Module d'YOUNG des barres d'HOPKINSON.

$F_1(t)$: Force appliquée sur l'éprouvette à l'interface avec la barre incidente.

$F_2(t)$: Force appliquée sur l'éprouvette à l'interface avec la barre de transmission.

I_o : Moment quadratique des barres de KOLSKY.

L_0 : Longueur initiale de l'éprouvette de compression.

M : Moment appliqué dans la barre de KOLSKY incidente.

r_b : Rayon de la barre d'HOPKINSON.

$u_1(t)$: Déplacements à l'interface barre incidente-éprouvette.

$u_2(t)$: Déplacements à l'interface éprouvette-barre de transmission.

α : Angle de prérotation de la barre de Kolsky incidente.

$\mathcal{E}_I$: Déformation dans la barre d'HOPKINSON due à l'onde incidente.

$\mathcal{E}_R$: Déformation dans la barre d'HOPKINSON due à l'onde réfléchie.

$\mathcal{E}_T$: Déformation dans la barre d'HOPKINSON due à l'onde transmise.

$\mathcal{E}_{ep}$: Déformation moyenne dans l'éprouvette de compression.

$\dot{\mathcal{E}}_{ep}$: Vitesse de déformation moyenne dans l'éprouvette de compression.

λ : Longueur d'onde du signal incident.

μ : Module de COULOMB des barres de KOLSKY.

ν_{ep} : Coefficient de POISSON de l'éprouvette de compression.

ρ_o : Masse volumique de la barre de KOLSKY.

ρ_{ep} : Masse volumique de l'éprouvette de compression.

τ_{ep} : Contrainte moyenne dans l'éprouvette de compression.

Chapitre I

TECHNIQUES DYNAMIQUES EXPERIMENTALES EN COMPRESSION, TORSION ET POINÇONNAGE

I - INTRODUCTION

Le cisaillement adiabatique joue donc un rôle important dans le comportement des matériaux aux grandes et très grandes vitesses de déformation. Etudié lors de la 2ème guerre mondiale, l'analyse de ce phénomène fut quasiment abandonnée pendant les années qui suivirent. Cependant, lors de ces deux dernières décennies, les chercheurs, en constatant la présence de bandes de cisaillement adiabatique dans de nombreuses applications industrielles ou militaires découvrirent un nouvel intérêt à son étude. Effectivement, des B.C.A. peuvent se former au cours de l'élaboration d'un matériau par formage rapide, par poinçonnage, par emboutissage ou encore lors d'impact ou de perforations sur des aciers de blindage.

Les conséquences de l'apparition de B.C.A. lors de ces différentes opérations sont très diverses. Lors d'un procédé de mise en forme rapide par exemple, leur présence est le plus souvent néfaste. La concentration de la déformation qui en résulte sur une zone très réduite, peut mener à la rupture prématurée du matériau et au rebut de la pièce en fabrication. Au contraire, le phénomène de cisaillement adiabatique peut être bénéfique dans d'autres domaines. Lors d'une opération d'usinage à très grande vitesse, l'apparition de B.C.A. dans un copeau provoque sa segmentation et facilite ainsi le processus d'usinage.

En fait, la variété et la complexité des domaines où le cisaillement adiabatique peut se produire ne facilitent pas son étude. Il a donc fallu créer en laboratoire des méthodes expérimentales qui permettent d'analyser des B.C.A. sous des modes de sollicitation relativement simples et facilement reproductibles.

Ces différentes techniques doivent être capables de générer les vitesses de déformation nécessaires à la formation de bandes de cisaillement. Certaines expériences montrent qu'elles peuvent apparaître dès 10^2 sec^{-1}. La déformation dans l'éprouvette doit être élevée tout en évitant l'apparition d'inhomogénéités telles que la striction (lors de tests en traction) ou l'effet tonneau (lors de tests en compression). Enfin, lors d'un essai, le comportement créé dans la partie active de l'éprouvette doit être le plus simple possible, comme du cisaillement simple ou de la traction-compression uniaxale. Ceci est important pour pouvoir comparer les données expérimentales entre elles.

En résumé, au cours des essais, il est nécessaire d'atteindre une déformation élevée sous une grande vitesse de déformation tout en appliquant un état de contrainte simple et bien défini. Ces conditions réunies, un état de cisaillement adiabatique peut être atteint au sein d'une éprouvette.

Nous pouvons alors distinguer trois principaux types d'essais se déroulant en laboratoire et respectant ces conditions qui sont :

* les essais de compression dynamique,
* les essais de torsion dynamique,
* les essais par poinçonnage.

L'ensemble des essais appartenant à ces catégories permet de couvrir un large intervalle de vitesses de déformation. Toutes les méthodes développées n'assurent pas forcément au mieux la totalité des exigences requises et citées ci-dessus pour générer des B.C.A., néanmoins elles se révèlent quand même efficaces pour l'étude du cisaillement adiabatique. La présentation de certaines techniques dynamiques expérimentales est l'objet des paragraphes suivants.

II - Les Essais de Compression Dynamique

Les tests de compression simple sont très utilisés pour l'étude dynamique des matériaux et notamment du cisaillement adiabatique. En effet ce sont les conditions d'essais qui se rapprochent le plus d'applications industrielles telles que l'emboutissage, le forgeage ou le poinçonnage. De ce fait les résultats obtenus et les lois de comportement déterminées en laboratoire peuvent être reliés directement à ces applications spécifiques. Il existe deux techniques générales pour effectuer ces essais. La première catégorie comprend par exemple des expériences par chute de masse, ou inclut des machines à volant d'inertie ou encore des machines à cames. Elles ont été conçues pour étudier le comportement des matériaux dans des conditions proches des opérations industrielles, mais rares sont celles qui atteignent des performances suffisantes nécessaires à la formation des bandes de cisaillement.

La seconde technique est celle des barres d'Hopkinson, et permet d'effectuer des essais jusqu'à des vitesses de déformation d'environ 1.10^3 sec^{-1}, ce qui en fait la méthode la plus couramment utilisée pour l'étude des B.C.A. en compression. Sa mise au point est malgré tout délicate car liée à de nombreux problèmes de propagation d'ondes et de géométrie d'éprouvette.

II - 1 : Les Barres d'Hopkinson

Historiquement, ces barres de compression détiennent leur nom de leur concepteur Hopkinson [25]-*1914*- qui utilisa une longue barre élastique pour étudier les pressions produites par l'impact d'une balle ou par la détonation d'un explosif dans une éprouvette. Il remarqua alors que, tant que la barre reste élastique, les déplacements dans celle-ci sont directement reliés aux contraintes dans l'éprouvette.

Quelques années plus tard, Davies [26]-*1948*- reprend l'étude des barres, décrit la procédure expérimentale et discute des problèmes liés à la propagation des ondes élastiques dans les barres. Puis, Kolsky [27]-*1949*- développe un dispositif expérimental où il place une éprouvette entre deux barres élastiques alors que le chargement est produit par un explosif placé à l'extrémité d'une des barres comme montré à la figure **I-1**.

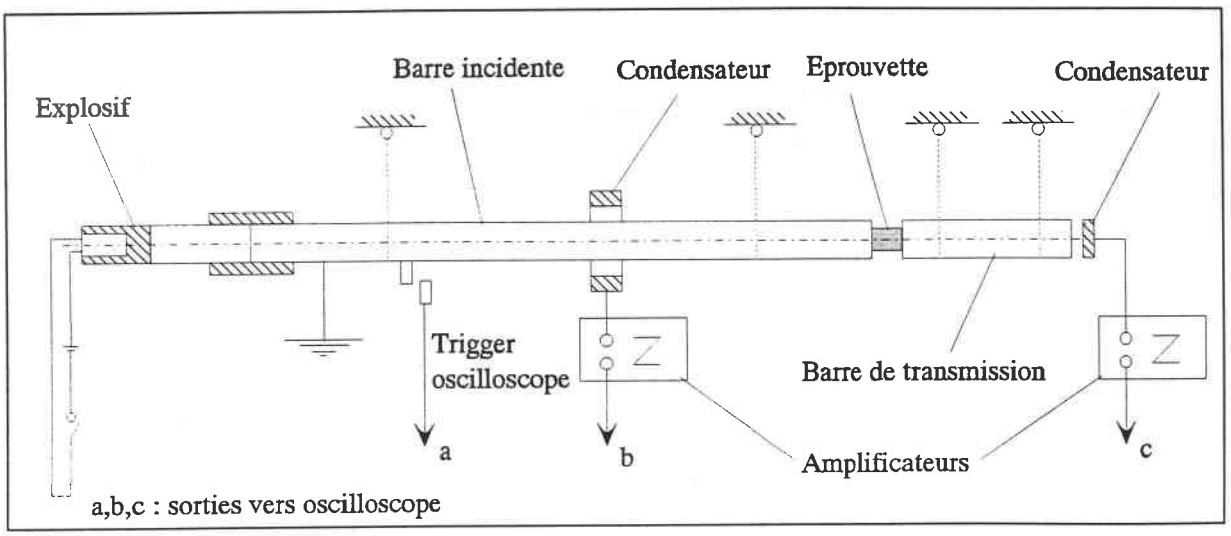


FIG. I-1 : *Dispositif des barres de compression. (D'après KOLSKY -1949-)*

Une onde élastique de compression est générée par l'explosion. Elle se propage à la vitesse C_0 dans la première barre, appelée barre incidente. Arrivée au niveau de l'interface avec l'éprouvette, une partie de l'onde incidente est réfléchie et se propage de nouveau dans la barre incidente en sens inverse, à la même vitesse C_0 en tant qu'onde de tension. Une autre partie est transmise à travers l'éprouvette dans la deuxième barre, appelée barre de transmission.

Notons que si l'éprouvette est courte, le temps de transit de l'onde transmise d'une face à l'autre de l'éprouvette est faible par rapport à la longueur de l'onde de chargement. De nombreuses réflexions internes se produisent donc dans l'éprouvette pendant le passage de l'onde incidente. Par conséquent, nous pouvons dans ces conditions considérer que les états de contrainte et de déformation dans l'échantillon deviennent très rapidement uniformes.

KOLSKY [27] montre alors comment les contraintes et les déformations à l'intérieur de l'éprouvette peuvent être reliées aux déformations dans les barres, dues aux passages des différentes ondes.

L'instrumentation qu'il utilise alors, mesure les déplacements à la surface des barres. Il est donc nécessaire de dériver les signaux fournis par les oscilloscopes pour déterminer les déformations des barres et définir les états de contrainte et de déformation dans l'échantillon.

Un dispositif conçu par LINDHOLM [28]-*1964*- et schématisé à la figure **I-2** utilise pour la première fois des jauges d'extensomètrie qui mesurent directement les déformations des barres, et qui reste la méthode encore utilisée de nos jours.

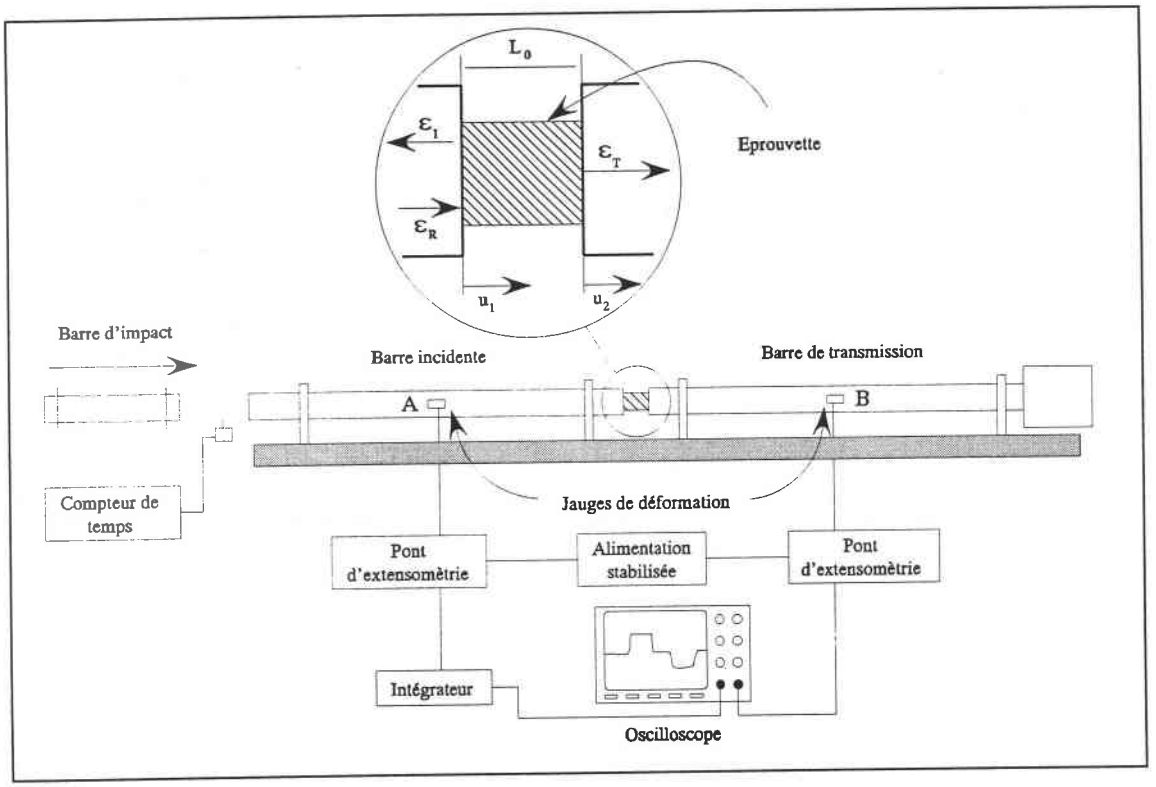


FIG. I-2 : *Configurations des barres de compression. (D'après LINDHOLM -1964-)*

Le chargement est réalisé par un projectile qui vient impacter la barre incidente à une vitesse V_0. Cette méthode génère une onde d'une amplitude constante dans la barre et d'une durée définie par la longueur du projectile.

Au moment de l'impact, une onde élastique de compression se propage dans la barre incidente ainsi que dans le projectile mais en sens inverse (à la même vitesse s'il est composé d'un matériau identique aux barres). Puis le projectile déchargera la barre incidente après que l'onde de compression, réfléchie par son extrémité libre comme une onde de tension de même amplitude, soit revenue sur la face d'impact. Ainsi la longueur de l'onde de chargement est égale à deux fois celle du projectile. Son amplitude est directement proportionnelle à la vitesse d'impact.

Ce comportement des ondes est illustré à la figure **I-3**. Les amplitudes relatives de ces différentes ondes vont dépendre des propriétés physiques de l'éprouvette.

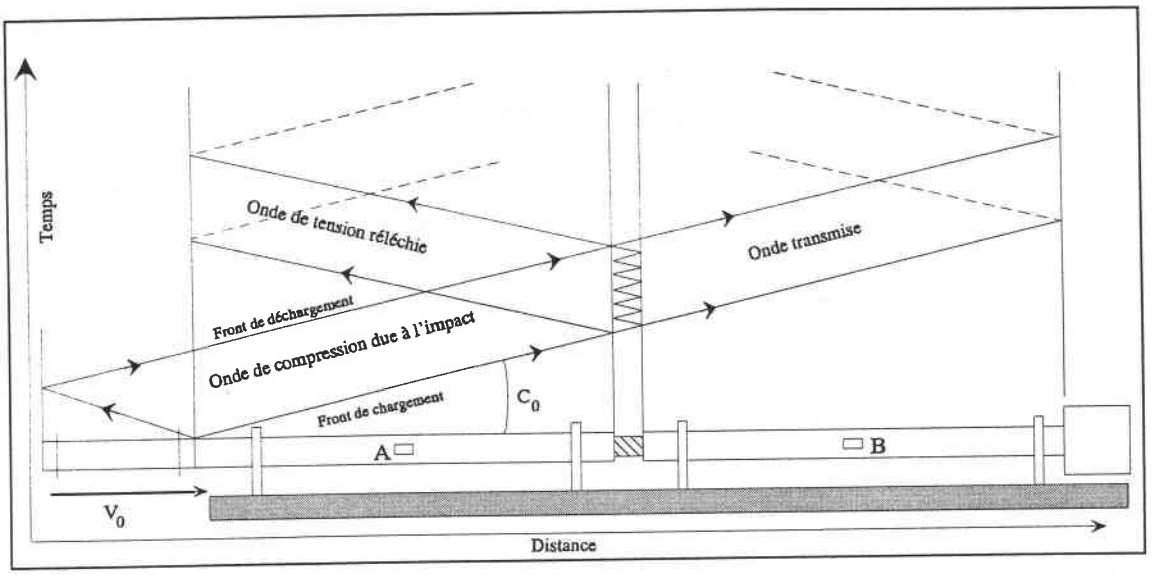


FIG. I-3 : *Fronts d'ondes dans les barres d'HOPKINSON.*

Les jauges d'extensomètrie mesurent en plusieurs points des deux barres les différentes déformations au cours du temps dues aux ondes incidente, réfléchie et transmise (notées respectivement $\varepsilon_I(t)$, $\varepsilon_R(t)$, $\varepsilon_T(t)$). Au point A de la barre incidente, une première déformation $\varepsilon_I(t)$ due au passage de l'onde incidente est enregistrée. Puis au même point, une deuxième déformation $\varepsilon_R(t)$ est mesurée après réflexion de l'onde à l'interface barre-éprouvette. De la même manière au point B de la barre de transmission, est enregistrée la déformation $\varepsilon_T(t)$ due à l'onde transmise.

En ce qui concerne la barre incidente, on remarquera que la mesure de la déformation incidente $\varepsilon_I(t)$ doit être terminée avant le retour de l'onde réfléchie afin d'éviter toute interférence entre les deux signaux.

Une démonstration des équations de propagation des ondes dans les barres élastiques est proposée par KOLSKY [29].

II - 1.1 : ANALYSE DES SIGNAUX DES JAUGES

Une fois que les différentes déformations sont enregistrées, nous pouvons établir les conditions de déplacement aux interfaces barres-éprouvette, et ainsi déterminer la contrainte et la vitesse de déformation dans l'éprouvette.

Il est possible de démontrer par la théorie de la propagation des ondes élastiques que les déplacements $u(t)$ dans un milieu sont reliés aux déformations $\varepsilon(t)$ par la relation :

$$\Rightarrow u(t) = C_0 \int_0^t \varepsilon(t')\, dt' \qquad (1)$$

avec C_0 : célérité des ondes élastiques dans la barre.

Le déplacement $u_1(t)$ sur la face de la barre incidente, à l'interface avec l'éprouvette est la conséquence de deux déformations; $\varepsilon_I(t)$ se propageant dans la direction des "x positifs" et $\varepsilon_R(t)$ qui se propage dans la direction des "x négatifs". D'où :

$$u_1(t) = C_0 \int_0^t \varepsilon_I(t')\, dt' + (-C_0) \int_0^t \varepsilon_R(t')\, dt' \qquad (2)$$

$$\Rightarrow u_1(t) = C_0 \int_0^t [\varepsilon_I(t') - \varepsilon_R(t')]\, dt' \qquad (3)$$

De même, le déplacement $u_2(t)$ sur la face de la barre de transmission est obtenu à partir de la déformation $\varepsilon_T(t)$ se propageant vers les "x positifs" et :

$$u_2(t) = C_0 \int_0^t \varepsilon_T(t')\, dt' \qquad (4)$$

Connaissant donc les déplacements à ses interfaces, la vitesse de déformation moyenne dans l'éprouvette $\dot{\varepsilon}_{ep}(t)$ peut être déterminée par la relation suivante :

$$\dot{\varepsilon}_{ep}(t) = \frac{\partial}{\partial t}\left[\frac{u_1(t) - u_2(t)}{L_0}\right]$$
$$= \frac{C_0}{L_0}\left[\varepsilon_I(t) - \varepsilon_R(t) - \varepsilon_T(t)\right] \qquad (5)$$

avec L_0 : longueur initiale de l'éprouvette.

Cette expression peut être simplifiée si nous considérons l'éprouvette comme suffisamment petite pour que puisse y être appliquée l'hypothèse d'une contrainte et d'une déformation constantes au moment du passage des ondes.

Cette hypothèse se traduit par la relation au niveau des déformations :

$$\varepsilon_R(t)+\varepsilon_I(t)=\varepsilon_T(t) \tag{6}$$

Après substitution dans l'équation (5), la vitesse de déformation moyenne $\dot{\varepsilon}_{ep}(t)$ dans l'échantillon est alors égale à :

$$\dot{\varepsilon}_{ep}(t)=-\frac{2C_0}{L_0}\varepsilon_R(t) \tag{7}$$

Finalement, la déformation nominale dans l'éprouvette $\varepsilon_{ep}(t)$ peut être déterminée par intégration de la vitesse de déformation par rapport au temps :

$$\varepsilon_{ep}(t)=-\frac{2C_0}{L_0}\int_0^t \varepsilon_R(t')\,dt' \tag{8}$$

De même, pour trouver la contrainte à laquelle est soumise l'éprouvette, considérons les forces appliquées sur chacune de ses faces.

Soit $F_1(t)$ la force sur la face de l'échantillon en contact avec la barre incidente :

$$F_1(t)=E_b\,A_b\left[\varepsilon_I(t)+\varepsilon_R(t)\right] \tag{9}$$

et $F_2(t)$ la force sur la face en contact avec la barre de transmission :

$$F_2(t)=E_b\,A_b\,\varepsilon_T(t) \tag{10}$$

avec E_b : module d'YOUNG des barres de compression,
A_b : section des barres.

La contrainte moyenne dans l'éprouvette $\sigma_{ep}(t)$ est donc égale à :

$$\begin{aligned}\sigma_{ep}(t)&=\frac{F_1(t)+F_2(t)}{2A_{ep}}\\&=\frac{E_b}{2}\,\frac{A_b}{A_{ep}}\left[\varepsilon_I(t)+\varepsilon_R(t)+\varepsilon_T(t)\right]\end{aligned} \tag{11}$$

avec A_{ep} : section initiale de l'éprouvette.

Suivant l'hypothèse décrite à l'équation (6), cette expression se simplifie et finalement la contrainte nominale dans l'éprouvette est donnée par la relation :

$$\sigma_{ep}(t) = E_b \left(\frac{A_b}{A_{ep}} \right) \varepsilon_T(t) \tag{12}$$

II - 1.2 : SECONDE CONFIGURATION DES BARRES

Il existe une seconde configuration des barres d'HOPKINSON, dans laquelle, il n'y a plus de barre incidente. Cette technique est utilisée par DARHAN & HAUSER [30] *-1970-*. Un projectile considéré comme rigide, vient frapper directement une éprouvette, comme représenté à la figure **I-4.**

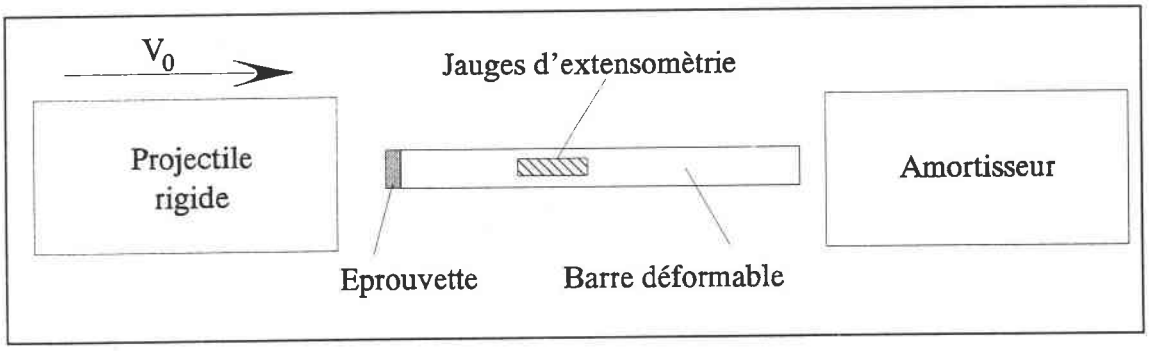


FIG. I-4 : *Représentation du dispositif par impact direct. (D'après DHARAN & HAUSER -1970-)*

L'onde réfléchie est produite dans le projectile sur lequel il n'est pas possible de coller des jauges de résistance. Néanmoins il est possible de déterminer la déformation dans l'échantillon en calculant la variation de longueur de l'éprouvette $\Delta l(t)$ au cours d'un essai, qui est donnée par :

$$\Delta l(t) = V_0 . t - C_0 \int_0^t \varepsilon_T(t')dt' \tag{13}$$

La déformation de l'éprouvette est ensuite obtenue par : $\varepsilon_{ep}(t) = \dfrac{\Delta l(t)}{l}$ (14)

Une autre technique pour connaître la vitesse de déformation dans l'échantillon est décrite par GORHAM [31]. La méthode consiste à mesurer directement l'expansion radiale de l'éprouvette par une technique photographique à grande vitesse, afin d'en déterminer la déformation. Son dispositif est illustré à la figure **I-5.**

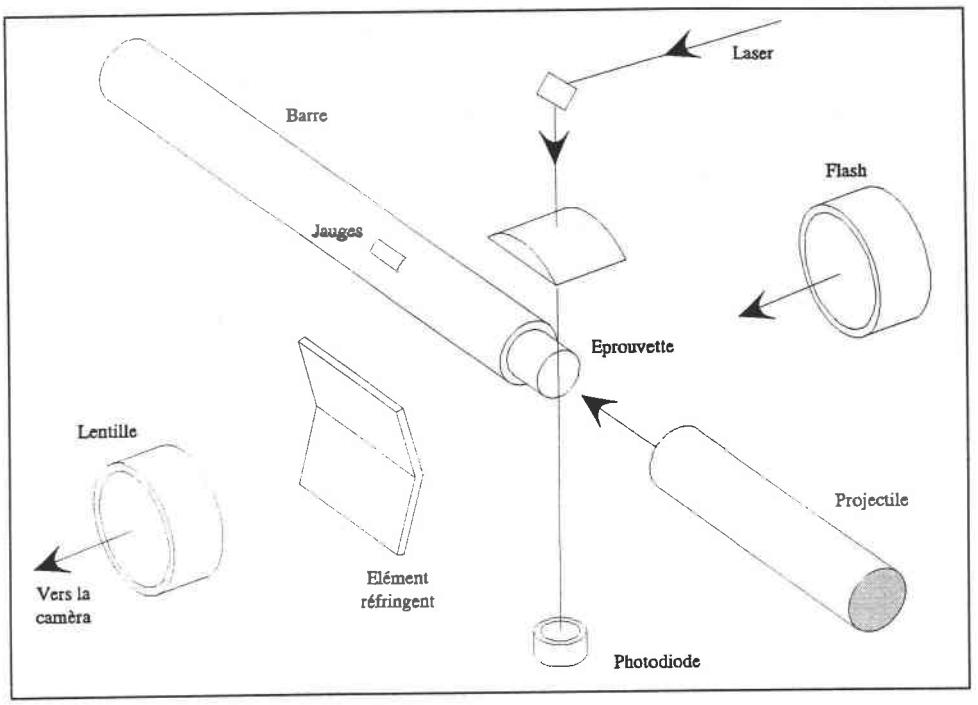


FIG. I-5 : *Schéma du dispositif par impact direct. (D'après GORHAM -1972-)*

II - 2 : AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA TECHNIQUE

II - 2.1 : ONDES

La mesure de déformations à la surface de deux barres afin de déterminer l'état de contrainte et de déformation dans une éprouvette semble une méthode très sûre et efficace. Cependant, elle est soumise à quelques conditions qui doivent être respectées sous peine d'obtenir des résultats erronés.

Expérimentalement, les déplacements ou les déformations sont mesurés à la surface de la barre. Ils doivent correspondre théoriquement au déplacement axial d'une section entière de cette barre. Or ce n'est effectivement le cas que si la propagation de l'onde à l'intérieur de la barre est unidimensionnelle, c'est-à-dire que les déplacements de tous les points d'une section sont uniformes. Or lors de l'impact du projectile sur la barre incidente, l'onde générée est très complexe au départ. Ceci est dû en particulier aux non uniformités géométriques à l'interface barre-projectile, et à la propagation d'autres types d'ondes élastiques. Néanmoins, ces effets parasites s'amenuisent lorsque les ondes ont parcouru une distance équivalente à environ 10 rayons de barre. Nous voyons donc ici la nécessité de ne pas placer les jauges de déformation trop proches du

point d'impact. Il faut les coller à une distance supérieure à 10 rayons de barre afin que l'onde soit "propre". Le comportement de l'onde de compression dans la barre est décrit par POCHAMMER [32]-*1876*- et CHREE [33]-*1889*-.

DAVIES [26]-*1948*- a aussi montré que pour une onde générée de forme sinusoïdale, les déplacements et les contraintes dans la barre sont uniformes sous la condition que le rapport r_b/λ soit très petit devant 1; avec r_b : rayon de la barre et λ : la longueur d'onde de chargement. Pour un rapport plus grand, les déplacements à la surface sont différents de ceux du centre de la section d'au moins 5 %. L'onde n'est plus unidimensionnelle.

Un autre problème important est celui lié à la dispersion de l'onde de longitudinale. C'est-à-dire que la vitesse de propagation n'est pas constante mais varie avec la longueur d'onde. Les hautes fréquences composant un signal se propagent moins vite que les basses fréquences. Ce phénomène a pour effet de créer des petites oscillations appelées les oscillations de POCHAMMER & CHREE derrière le front d'onde principal. Néanmoins FOLLANSBEE & FRANTZ [34]-*1983*- ont démontré que l'effet de ces oscillations était très limité sur les mesures.

En compression, la propagation de l'onde dans les barres joue un rôle primordial. Elle détermine la position des jauges collées sur la barre incidente. Sa longueur d'onde doit être assez importante par rapport au rayon de la barre pour qu'elle soit considérée comme unidimensionnelle dans une section.

II - 2.2 : EPROUVETTE

Lors du passage de l'onde à l'interface barre incidente-éprouvette, il peut se produire du frottement qui induit un effort radial, créant un état de contrainte non parfaitement uniaxial dans l'échantillon. Il faut donc employer du lubrifiant sur les faces de l'éprouvette pour réduire au minimum le coefficient de frottement. La reproductibilité des essais est donc liée entre autres aux conditions de contact à l'interface qui ne doivent pas changer d'un essai à l'autre. Si elles ne sont pas maintenues, une dispersion importante dans les résultats peut apparaître.

Un autre facteur qui apparaît lors de la mise en place des relations démontrées précédemment est l'hypothèse que la déformation est uniforme dans l'échantillon. Or lors de son chargement, les vitesses de déformation importantes imposent de fortes accélérations aux particules de l'éprouvette. Les inerties radiales et longitudinales peuvent influencer les résultats. Les erreurs dues à ces deux paramètres associées au frottement à l'interface barre-éprouvette ont été analysées par MALINOWSKY & KLEPACZKO [35]-*1986*-. Ils ont établi une correction sur le rapport $S=h/d$ en déterminant une valeur optimale S_{opt} qui s'exprime de la manière suivante :

$$S_{opt} = \left[\frac{2\,\mu\,\sigma_z}{\rho\, d^2 (\dot{\varepsilon}^2 + \ddot{\varepsilon})} \right]^{1/3} \qquad (15)$$

Avec : σ_z : Contrainte axiale moyenne mesurée.

$\dot{\varepsilon}$: Vitesse de déformation.

$\ddot{\varepsilon}$: Accélération de la déformation.

h : Epaisseur de l'éprouvette.

d : Diamètre de l'éprouvette.

S_{opt}: Rapport optimal h/d.

Puisque durant le processus de déformation, les termes $\mu\sigma_z$ et $(\dot{\varepsilon}^2 + \ddot{\varepsilon})$ changent continuellement, une valeur particulière de S_{opt} est adéquate pour seulement un couple de valeurs $\mu\sigma_z$ et $(\dot{\varepsilon}^2 + \ddot{\varepsilon})$. Ainsi, S_{opt} doit être calculée pour les régions de déformation et de vitesses de déformation qui présentent un intérêt pour l'expérimentateur. La relation (15) montre clairement qu'il n'existe pas qu'une seule valeur optimale de S_{opt}, mais qu'elle varie en fonction des conditions expérimentales.

II - 3 : CONCLUSION

En compression les interprétations des signaux des jauges peuvent être très délicates à cause de tous ces inconvénients. Cependant la technique est très efficace pour générer des B.C.A.. Les observations microscopiques et macroscopiques montrent que la rupture des éprouvettes apparaît suivant des surfaces inclinées à 45° par rapport à l'axe de compression. AFFOUARD [36]-*1984*- a montré qu'il existe essentiellement deux types de ruptures, corrélées à la dureté initiale du matériau. Dans le cas des matériaux à hautes duretés, le développement de la B.C.A. et de la fissure associée s'effectue suivant l'aspect d'un diabolo. D'autre part pour des matériaux de plus faible

dureté, cet aspect est celui d'une cloche. Dans le chapitre suivant nous verrons comment cette technique des barres d'HOPKINSON a été adaptée à la torsion pour cisailler une éprouvette.

Un exemple de B.C.A. dans une éprouvette de compression est donné à la figure I-6, d'après DELTORT [37]-*1993*-.

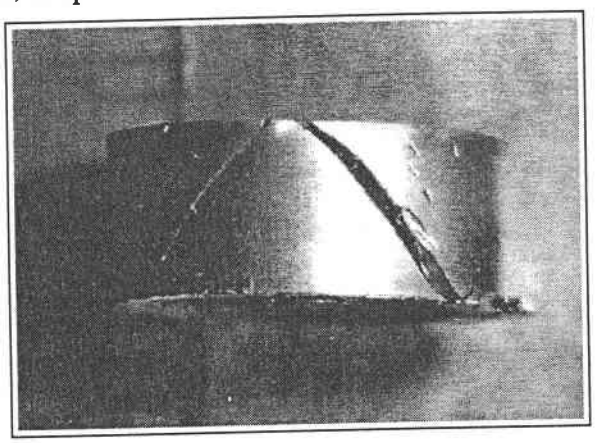


FIG. I-6(a)

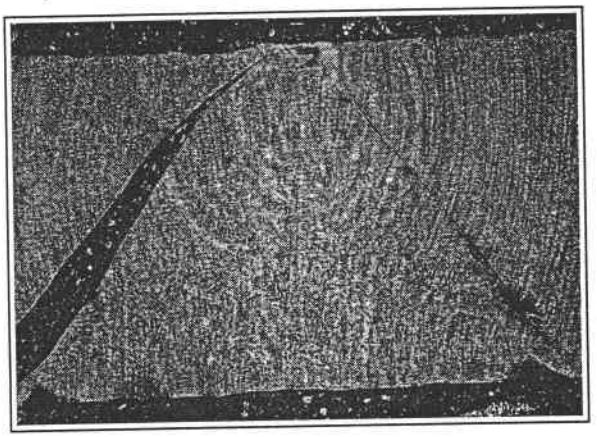


FIG. I-6(b)

FIG. I-6 : *Bandes de cisaillement dans une éprouvette en compression. (D'après DELTORT -1993-)*

III - LES ESSAIS DE TORSION

Les essais de torsion sont très employés et répandus. Ils possèdent plusieurs avantages intrinsèques. Le chargement en torsion produit un état de cisaillement pur et exempt de dilatation radiale dans une éprouvette. De grandes déformations en cisaillement peuvent être atteintes sans que des instabilités géométriques, telles que la striction ou l'effet tonneau ne se produisent. De plus une déformation relativement homogène peut être obtenue dans une éprouvette tubulaire à parois minces très utilisée en torsion.

Il est possible de classer les essais de torsion en trois catégories qui couvrent un intervalle de vitesses de déformation allant de 10^1 sec^{-1} à 10^3 sec^{-1} :

* les machines hydrauliques,
* les machines à choc,
* les barres de Kolsky.

III - 1 : Les Machines Hydrauliques Rapides

Un prototype de ce type de machines illustré à la figure I-7(a), a été développé au début des années 80 par Lindholm, Nagy, Jonhson & Hoegfeldt [38]-*1980*-. Un vérin rotatif applique sur une éprouvette tubulaire à parois hexagonales représentée à la figure I-7(b), un couple maximum de 340 mN. Une grande vitesse de rotation du vérin est obtenue par la décharge instantanée d'un accumulateur hydraulique.

Une des extrémités de l'éprouvette est attachée à un collier de maintien hexagonal fixé au bâti, l'autre est reliée au vérin rotatif. Contrairement à certaines machines à chocs que nous verrons plus tard, l'éprouvette est fixée en permanence par ses deux extrémités. Ceci assure la parfaite coaxialité des différents éléments, collier-éprouvette-vérin. La rotation du vérin est commandée par deux mécanismes indépendants, suivant la gamme de vitesse de déformation désirée. Deux cellules permettent de recueillir les données, une cellule de charge qui enregistre l'effort appliqué et une cellule de déplacement qui mesure la rotation du vérin. Il est alors possible de tracer les courbes de contrainte et de rotation en fonction du temps.

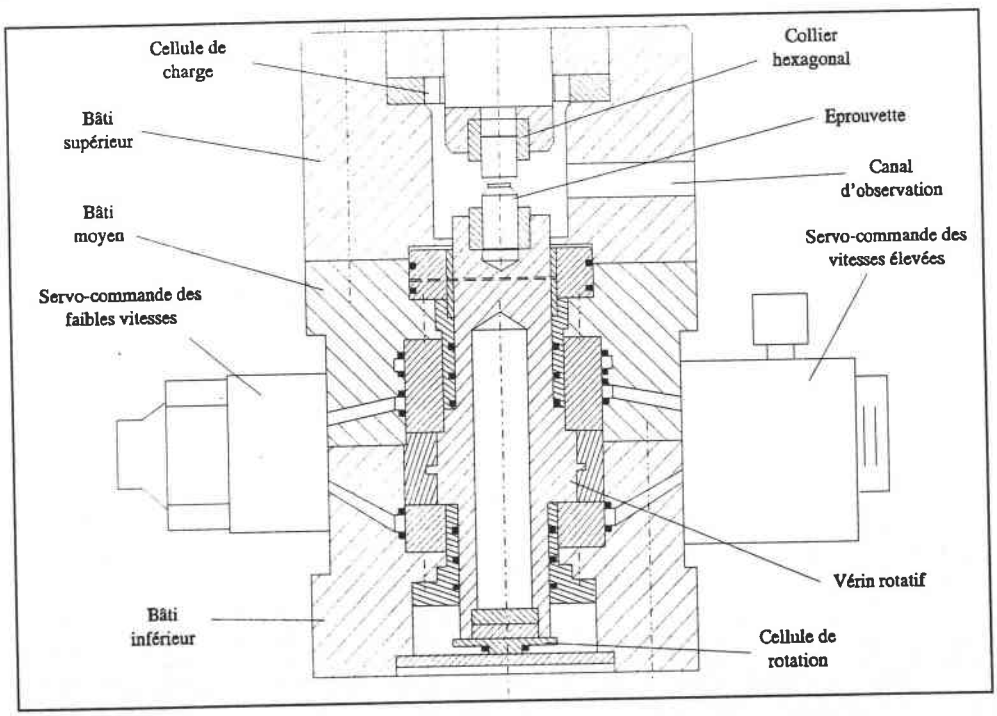


Fig. I-7(a)

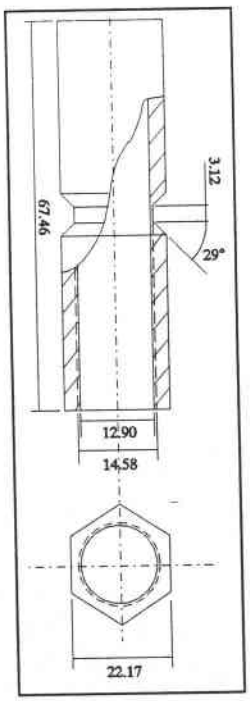


Fig. I-7(b)

Fig. I-7 : *Machine hydraulique et éprouvette utilisée.*
(D'après Lindholm & al. -1980-)

Bien que les vitesses de déformation pouvant être atteintes au sein de l'éprouvette par cette méthode soient assez élevées (300 sec^{-1} au maximum), cette technique

hydraulique est plus utilisée pour son aptitude à créer de grandes déformations. Le vérin peut en effet appliquer à l'éprouvette une rotation d'environ 180°. De plus, lorsque l'éprouvette est chargée très rapidement les parties mobiles sont soumises à une forte accélération ce qui peut entraîner des effets d'inertie et des vibrations qui sont alors enregistrés par la cellule de charge. Des oscillations parasites peuvent ainsi apparaître sur les courbes d'enregistrement.

Un exemple de résultats obtenus par cette technique est présenté à la figure **I-8**. Ces courbes exprimées en contrainte-déformation sont des essais effectués sur du cuivre par LINDHOLM & al. [38].

Ces courbes montrent une sensibilité à la vitesse de déformation positive, jusqu'à une valeur de vitesse de déformation proche de 10 sec^{-1}. Pour des taux de déformation plus élevés (supérieurs à 170 sec^{-1}), les conditions adiabatiques sont approchées. Il apparaît alors une instabilité brutale de la contrainte d'écoulement pour une déformation $\gamma=5$ environ. L'analyse post-mortem des éprouvettes montre qu'une forte localisation de la déformation s'est produite au niveau de leur partie active. L'étude cristallographique fait apparaître des B.C.A. dans les zones fortement cisaillées. La chute de la contrainte d'écoulement est donc associée à la formation de B.C.A..

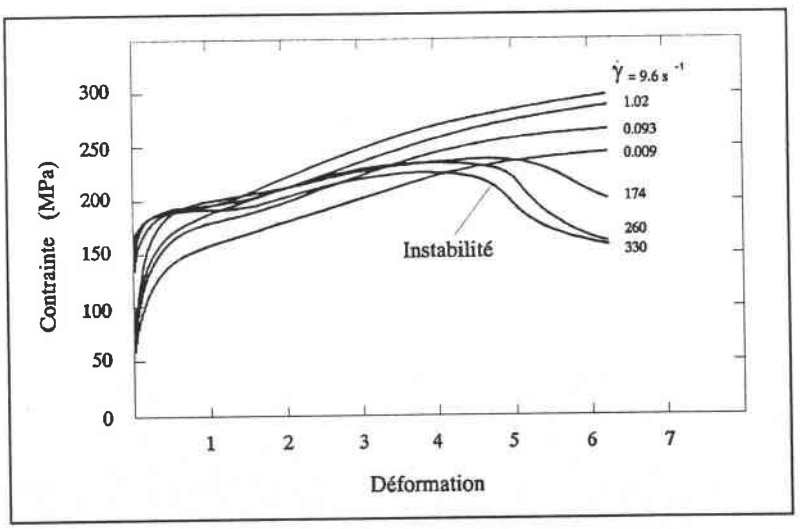


FIG. I-8 : *Courbes contrainte de cisaillement-déformation sur du cuivre. (D'après LINDHOLM & al. -1980-)*

Un second exemple de machine hydraulique utilisée pour des essais dynamiques peut être donné par le prototype ZWICK installé au L.P.M.M. de Metz et représenté à la figure **I-9**. Il se présente d'une manière plus classique, comme une machine d'essais

traditionnelle. Elle est munie d'un vérin rotatif pour les essais de torsion, qui admet un angle de rotation maximum de 100° et une vitesse de rotation de 2000 °/sec. Il peut appliquer dans ces conditions un couple de 150 mN. Cette machine possède de plus la particularité d'être équipée d'un vérin linéaire de traction-compression pouvant soumettre une éprouvette à une charge de 100 KN à une vitesse de 10 m/sec. Les deux vérins parfaitement coaxiaux offrent la possibilité d'effectuer des essais combinés traction-rotation. De la même manière que le prototype de LINDHOLM, elle est équipée de cellules de charge et de déplacement pour enregistrer les données expérimentales au cours du temps.

KLEPACZKO [39]-*1991*- utilise avec cette machine des éprouvettes de forme tubulaire à parois minces. Elles sont maintenues en place par deux clavettes qui sont engagées avant l'essai dans deux rainures pratiquées sur ses faces opposées. Les vitesses de déformation qu'il est possible d'atteindre avec cette géométrie sont de l'ordre de 200 sec^{-1}.

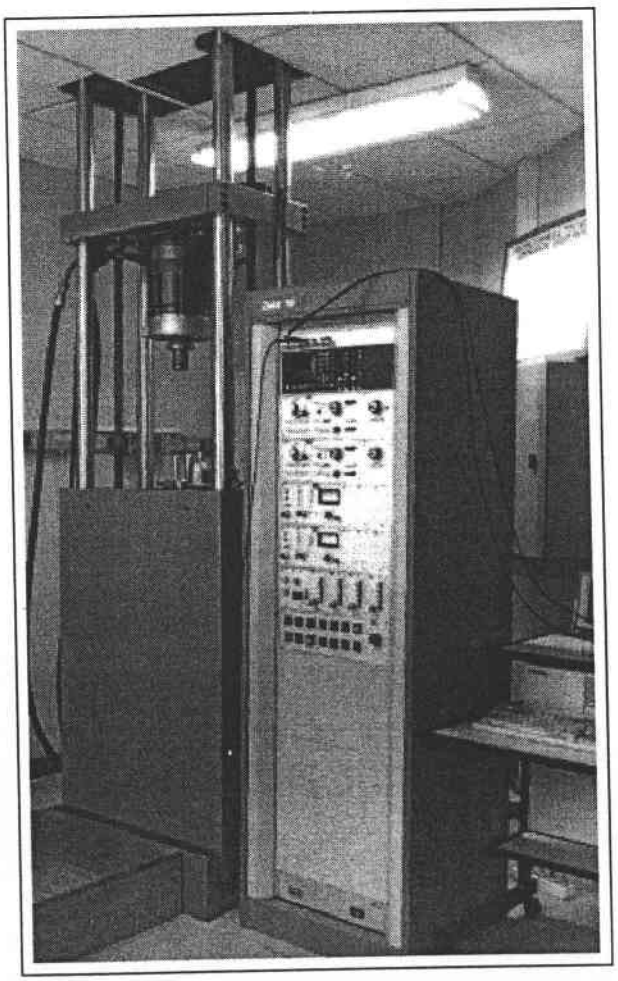


FIG. I-9(a)

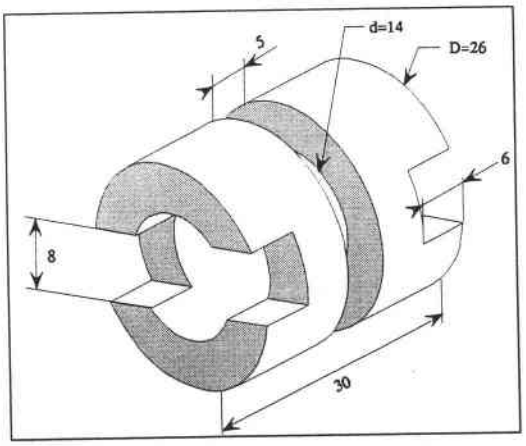


FIG. I-9(b)

FIG. I-9 : *Photo du prototype ZWICK du L.P.M.M. et éprouvette de torsion.*

Les machines hydrauliques de torsion sont une alternative efficace pour l'étude dynamique des matériaux. Cependant les vitesses de déformation qu'il est possible d'atteindre dans de bonnes conditions (environ 10^2 sec^{-1}), sont un peu faibles pour permettre la formation de B.C.A.. Pour des vitesses plus élevées, celles-ci peuvent apparaître mais alors, des problèmes de forces d'inertie et de vibrations viennent perturber les enregistrements des données.

III - 2 : Les Machines de Torsion a Chocs

Il est donc nécessaire de faire appel à d'autres types d'essais pour des gammes de vitesses de déformation supérieures à 10^2 sec^{-1}. Le concept des machines de torsion par impact utilisant un volant d'inertie a été développé dès les années cinquante. Une technique utilisant un tour a été conçue par Culver [40]-*1972*-. Une schématisation du principe est donnée à la figure **I-10**.

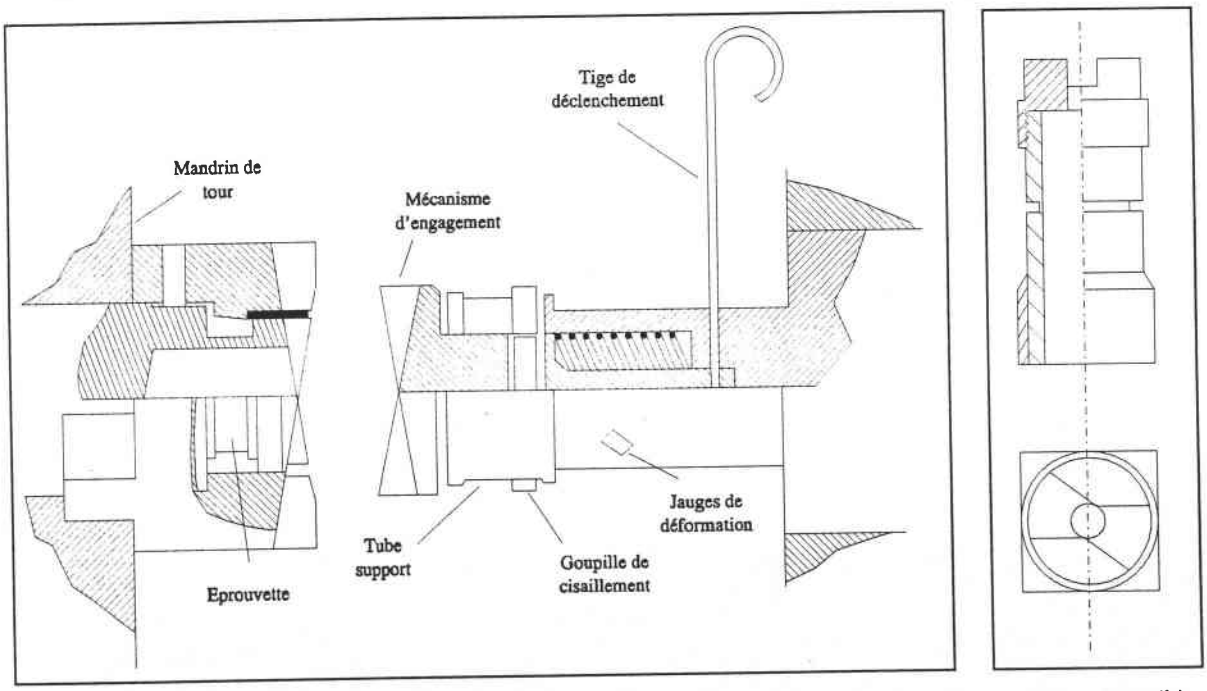


Fig. I-10(a) **Fig. I-10(b)**

Fig. I-10 : *Section du dispositif de torsion par impact et éprouvette. (D'après Culver -1972-)*

Une éprouvette, représentée à la figure **I-10**(b), de forme tubulaire, courte et à parois minces est fixée à l'une de ses extrémités. L'autre extrémité est libre et possède

une géométrie particulière en forme de rampe. La forme complémentaire se trouve sur un système de blocage placé en vis à vis de l'éprouvette. L'éprouvette est mise en rotation par le mandrin du tour. Lorsque la vitesse angulaire désirée est établie, un mécanisme permet de libérer le dispositif de blocage. Celui-ci va s'engager rapidement dans l'extrémité libre de l'éprouvette et l'immobiliser en rotation, provoquant ainsi un fort cisaillement dans la partie utile de l'échantillon.

L'instrumentation de mesure consiste en plusieurs jauges de résistance, montées sur le tube de maintien du dispositif de blocage, pour évaluer le couple appliqué. Pour mesurer les déformations, une ligne est gravée sur les éprouvettes le long de leur axe avant chaque test. Après l'essai, la pente de cette ligne est mesurée à intervalles réguliers pour déterminer la distribution finale de la déformation.

Il est possible d'atteindre avec cette technique des vitesses de déformation de l'ordre de 1000 sec^{-1}. Cependant l'inconvénient majeur provient du fait que l'éprouvette n'est pas forcément toujours rigoureusement alignée avec le mécanisme d'engagement. Ceci peut provoquer une légère flexion de l'éprouvette et supprimer l'état de cisaillement pur.

III - 3 : Les Barres de Kolsky

La technique expérimentale des barres de Kolsky est basée sur le principe des barres d'Hopkinson que nous avons décrites précédemment. La différence fondamentale se situe au niveau des ondes générées, qui ne sont plus de compression, mais de torsion. La mesure des déformations de barres élastiques, induites par la propagation d'une onde de torsion, est utilisée pour évaluer la contrainte et la vitesse de déformation moyenne au sein d'une éprouvette.

Ces barres de torsion portent le nom de Kolsky en raison des travaux qu'il a effectué sur la théorie de la propagation d'ondes élastiques dans des barres. Néanmoins, les premières barres de torsion ont été développées par Baker & Yew [41]-*1966*-. Le principe est illustré sur la figure **I-11**.

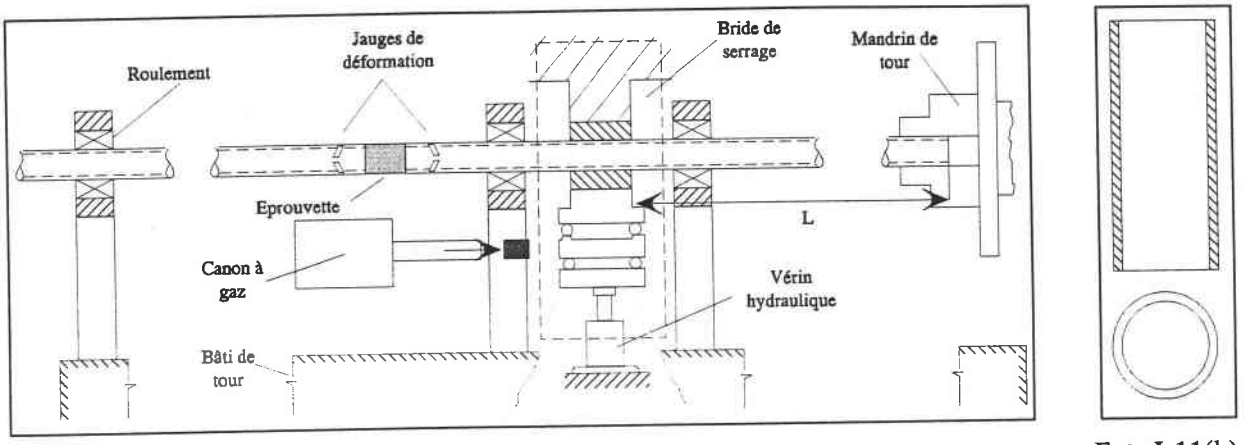


FIG. I-11(a) FIG. I-11(b)

FIG. I-11 : *Schémas de la machine de torsion et de l'éprouvette. (D'après BAKER & YEW -1966-)*

Leur banc d'essai expérimental est adapté sur le bâti d'un tour horizontal. L'extrémité d'un premier tube (le tube de chargement), est solidement fixée au mandrin du tour. Une éprouvette est brasée entre ce tube et un autre de dimension identique (le tube de mesure). Le tube de chargement est bloqué en rotation par une bride de serrage.

La technique pour générer l'onde de torsion est simple. La bride placée à une distance L de l'extrémité du tube de chargement est maintenue serrée par un mécanisme hydraulique. Elle le bloque ainsi en rotation en ce point. Le mandrin du tour entre alors en action et imprime un angle de rotation α à l'extrémité du tube. Un couple M est ainsi stocké dans cette partie du tube.

D'une manière analogue aux barres de compression développée par LINDHOLM, la durée du chargement de l'éprouvette est déterminée par le temps que met l'onde de torsion pour parcourir deux fois la distance L, séparant la bride de l'extrémité de la barre.

De nombreux auteurs ont contribué au développement de cette technique. DUFFY, CAMPBELL & HAWLEY [42]-*1971*- par exemple ont conçu le dispositif qui est représenté à la figure **I-12**. Ils utilisent des barres au lieu de tubes. Le chargement s'effectue au moyen de deux systèmes indépendants liés aux deux tubes suivant les vitesses de déformation désirées dans l'éprouvette. Ainsi des essais dans des conditions quasi statiques peuvent aussi être réalisés avec le même appareillage.

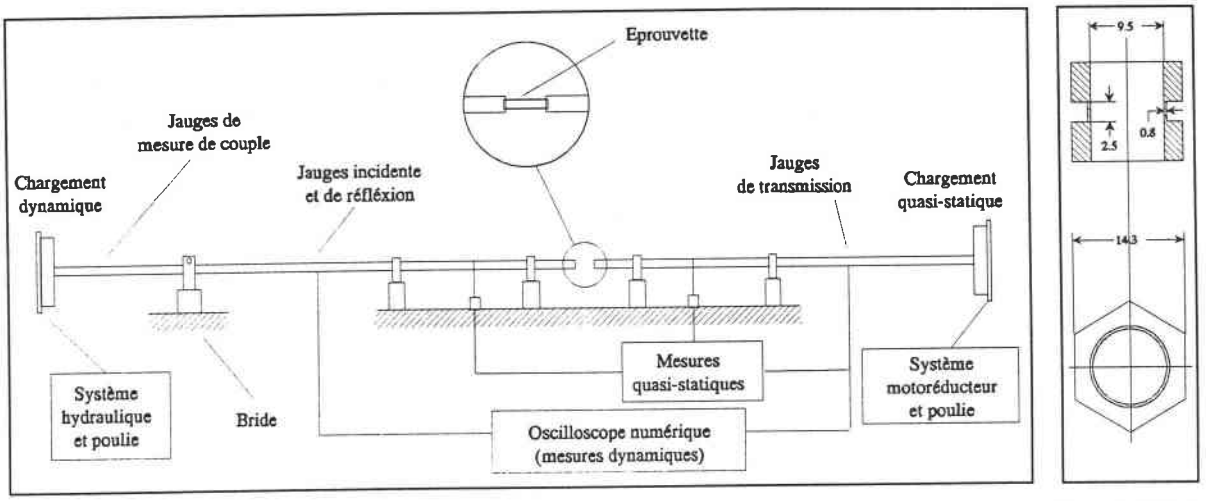


FIG. I-12(a) **FIG. I-12**(b)

FIG. I-12 : *Schémas des barres de torsion dynamique et de l'éprouvette. (D'après DUFFY & al. -1971-)*

Le moment M de torsion appliqué à la barre peut facilement être calculé. Nous savons qu'il est relié à l'angle de rotation α par la relation :

$$M = \mu\, I_0 \frac{\partial \alpha}{\partial x} \quad avec \begin{cases} M : \text{Moment appliqué (mN)} \\ \mu : \text{Module de Coulomb (N / m}^2) \\ I_0 : \text{Moment quadratique (m}^4) \\ \alpha : \text{Angle de rotation (rad)} \end{cases} \tag{16}$$

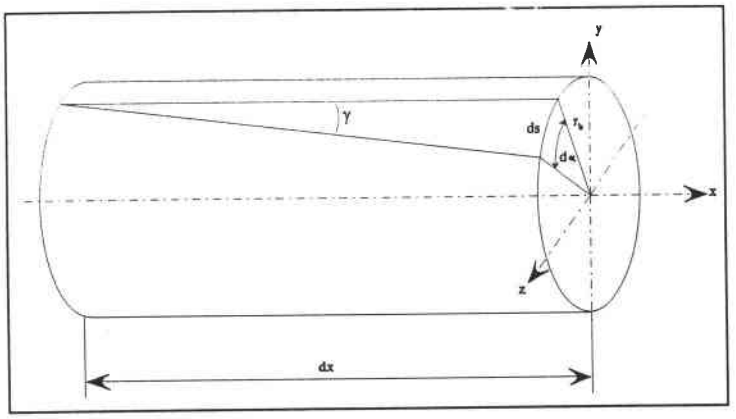


FIG. I-13 : *Cylindre élémentaire en torsion.*

Sur la figure **I-13**, la déformation dans la barre est notée γ. Elle est reliée à l'angle α par :

$$tg\,\gamma = r_b \frac{\partial \alpha}{\partial x} \qquad \text{avec} \quad r_b : \text{Rayon de la barre} \tag{17}$$

Cette déformation est toujours située dans la limite élastique. Nous sommes donc dans le cas des petites déformations et nous pouvons alors écrire que :

$$tg\gamma = \gamma \qquad \Rightarrow \qquad \frac{\partial \alpha}{\partial x} = \frac{\gamma}{r_b} \tag{18}$$

Ainsi d'après les relations (16) et (18), la déformation produite dans la barre de torsion est liée au couple appliqué par :

$$M = \mu\ I_0\ \frac{\gamma}{r_b} \tag{19}$$

Une fois que le couple désiré est atteint, l'effort de serrage de la bride est soudainement relâché, le couple stocké est ainsi libéré dans la barre. Par un calcul analogue à celui effectué sur les barres de compression, il est possible de montrer que l'expression :

$$\frac{\partial^2 \alpha}{\partial t^2} = \frac{\mu}{\rho}\frac{\partial^2 \alpha}{\partial x^2} \quad \text{avec } \rho \text{ : Masse volumique de la barre} \tag{20}$$

régit alors la rotation des sections dans la barre. Elle caractérise la propagation d'une onde de torsion qui se propage avec la célérité $C_2 = \sqrt{\mu/\rho}$. La solution générale de cette équation est de la forme :

$$\alpha = f(C_2\, t - x) + g(C_2\, t + x) \tag{21}$$

où la fonction $f(x,t)$ représente la propagation d'une onde se déplaçant vers les "x positifs" et la fonction $g(x,t)$, une onde se déplaçant en sens opposé.

A partir de la bride, deux ondes de torsion de même amplitude $M'=M/2$ (si M est le couple initial) vont donc se propager à la vitesse C_2, une en direction de l'éprouvette, l'autre vers l'extrémité de la barre. Le couple présent dans les barres peut être exprimé en fonction de la vitesse de propagation C_2, et d'après l'équation (19) :

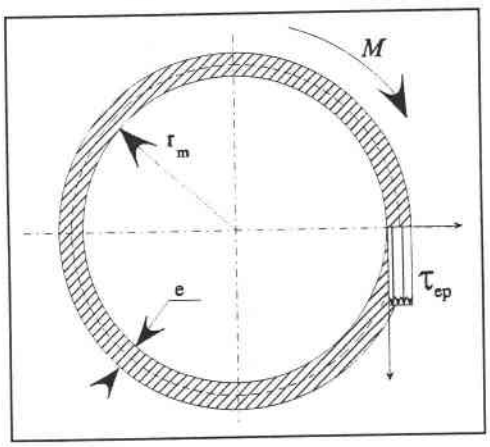
$$M'(t) = C_2^2\ \rho\ I_0\ \frac{\gamma(t)}{r_b} \tag{22}$$

D'une manière analogue aux barres d'HOPKINSON, le premier front d'onde atteindra l'éprouvette et va la charger en torsion. Le deuxième front va être réfléchi à l'extrémité de la barre incidente et revenir vers l'éprouvette comme une onde de torsion de déchargement. L'amplitude de l'onde incidente (l'intensité du couple) est contrôlée par l'angle de torsion initial qui est imprimé à la barre de chargement, alors que son temps de montée est déterminé par le temps nécessaire pour libérer entièrement la barre de la bride de blocage.

Le principe d'analyse est équivalent à celui des barres d'HOPKINSON. A l'interface barre-éprouvette, l'onde incidente est divisée en deux parties, une onde réfléchie et une onde transmise. La mesure des déformations sur la barre incidente $\gamma_R(t)$ dues à l'onde réfléchie nous donne la vitesse de déformation moyenne dans l'éprouvette, tandis que la contrainte de cisaillement moyenne est donnée par les déformations sur la barre de transmission $\gamma_T(t)$. Les mesures sont effectuées par deux montages de jauges d'extensomètrie placés de chaque cotés de l'éprouvette.

III - 3.1 : CONDITIONS DE CHARGEMENT DE L'EPROUVETTE

Lors des essais sur les barres de KOLSKY, la plupart des éprouvettes utilisées sont de type tubulaire à parois minces.



Lorsqu'elles sont soumises à un couple *M*, la contrainte de cisaillement peut donc être considérée comme constante sur l'épaisseur de la paroi égale à :

$$\tau_{ep} = \frac{M}{2\pi r_m^2 e} \tag{23}$$

et la déformation homogène dans la section.

Par un calcul analogue à celui effectué sur les barres d'HOPKINSON, il est possible de montrer que la contrainte moyenne dans l'éprouvette $\tau_{ep}(t)$ est alors égale à :

$$\tau_{ep}(t) = \frac{C_2^2 \rho I_0}{2 \pi r_m^2 e r_b} \gamma_T(t) \tag{24}$$

et que la vitesse de déformation $\dot{\gamma}_{ep}(t)$ à laquelle elle est soumise est égale à :

$$\dot{\gamma}_{ep}(t) = \frac{2 C_2 r_m}{r_b l_{ep}} \gamma_R(t) \tag{25}$$

avec l_{ep} : longueur de la partie active de l'éprouvette.

Des calculs plus détaillés sont fournis par HARTLEY, DUFFY & HAWLEY [43]-*1984*-.

III - 3.2 : AVANTAGES PROCURES PAR CETTE TECHNIQUE

Cette méthode des barres de torsion a été développée en raison des nombreux avantages qu'elle possède par rapport à celle des barres de compression. Le plus remarquable se situe au niveau de l'éprouvette. En effet, nous savons que lors de la compression l'état de contrainte n'est pas purement uniaxial. Ce fait est dû principalement à l'effet POISSON, qui accompagne la compression axiale par une expansion radiale, mais aussi aux frottements à l'interface barre-éprouvette. Dans les tests de torsion, ce problème n'apparaît pas. L'état de contrainte est de la torsion pure.

Un autre avantage se situe au niveau de la nature des ondes. Les ondes de torsion ne subissent pas de dispersion géométrique dans leur premier mode de propagation. C'est à dire que toutes les fréquences composant le signal se propagent à la même vitesse. Les signaux restent donc identiques et ne changent pas de forme au cours d'un essai. Ceci a des conséquences sur l'installation des jauges. Elles peuvent être collées à n'importe quelle distance de l'éprouvette. Or en compression, des jauges placées trop près de l'éprouvette sont soumises à des effets de bord tridimensionnels, alors que des jauges placées plus loin, lors d'essais en température par exemple, sont sujettes aux effets de la dispersion géométrique.

Un appareillage comme celui de DUFFY & al. [42] peut aussi être utilisé pour effectuer des essais en quasi statique en n'utilisant que le moto-réducteur. Différents tests couvrant une large gamme de contraintes, de déformations, de vitesses de déformation ou de températures peuvent ainsi être réalisés avec des conditions expérimentales identiques (Forme de l'éprouvette, état de contrainte...) ce qui est très important pour le dépouillement et la comparaison des résultats obtenus.

III - 3.3 : INCONVENIENTS DE LA TECHNIQUE

Le principal inconvénient se situe au niveau de la bride de maintien. Elle doit être capable de bloquer la barre en rotation, sans glissement, et de plus doit la libérer très rapidement, quasi instantanément pour que le temps de montée du front de l'onde incidente soit le plus court possible. Idéalement l'onde devrait atteindre instantanément une amplitude constante et devrait retomber tout aussi vite à zéro.

Nous aurions alors une onde "carrée" qui déformerait l'éprouvette avec une vitesse de déformation constante. En réalité il existe toujours un temps de montée et un temps de descente du signal. De plus, cette bride doit être positionnée correctement sur la barre incidente pour éviter d'introduire une flexion parasite dans celle-ci. Différentes solutions ont été proposées par BAKER & YEW [41], DUFFY & al. [42] ou encore KLEPACZKO [44]-*1979*- ou DELTORT [37]. Tous ces systèmes mécaniques ou hydrauliques permettent d'obtenir des temps de montée compris entre 20 et 40 μsec.

Une alternative pour réduire ces temps de montée a été proposée par HARTLEY, DUFFY & HAWLEY [43]. Elle consiste non plus en un chargement par blocage avec bride, mais à un chargement par explosifs.

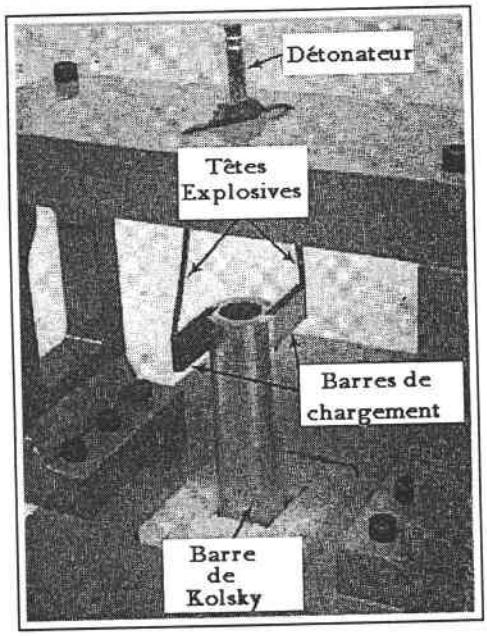


FIG. I-14 : *Système de chargement par explosifs.*
(D'après HARTLEY & al. -1984-)

Cette configuration est illustrée à la figure **I-14**. Deux petites charges diamétralement opposées sont placées à l'extrémité de la barre incidente. Leur explosion simultanée génère une onde de torsion pure. Le temps de montée est très court entre 7 et 10 μsec, et les vitesses de déformation sont proches de celles atteintes avec la méthode du couple stocké. Cependant, l'amplitude du signal n'est pas constante dans le temps. Cet effet est indésirable car ainsi l'éprouvette n'est plus chargée à vitesse de déformation constante. Pour réduire l'amplitude des plus hautes fréquences, un filtre mécanique en aluminium est disposé sur la barre incidente qui lisse le signal.

III - 3.4 : EPROUVETTE

Au contraire des barres de compression, l'éprouvette doit être fixée très fermement aux barres incidente et de transmission. Une solution illustrée à la figure **I-15**(a), est proposée par DUFFY & al. [42] pour laquelle la partie utile de l'éprouvette tubulaire est comprise entre deux parties hexagonales qui vont venir s'insérer dans des bagues liées aux barres. Des vis servent de plus à bloquer ces parties hexagonales.

Une ligne droite est gravée sur cette éprouvette le long de son axe avant l'essai. La figure **I-15**(b) montre le résultat après un test. La ligne présente une pente provoquée par la déformation en cisaillement dans la partie centrale de l'éprouvette, ainsi qu'un décalage produit par l'apparition d'une bande de cisaillement, qui a entraîné la rotation des deux parties de l'échantillon l'une par rapport à l'autre.

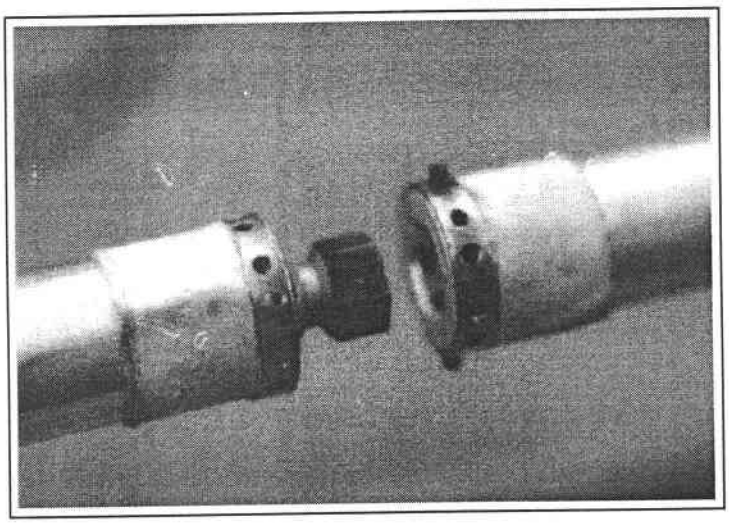


FIG. I-15(a)

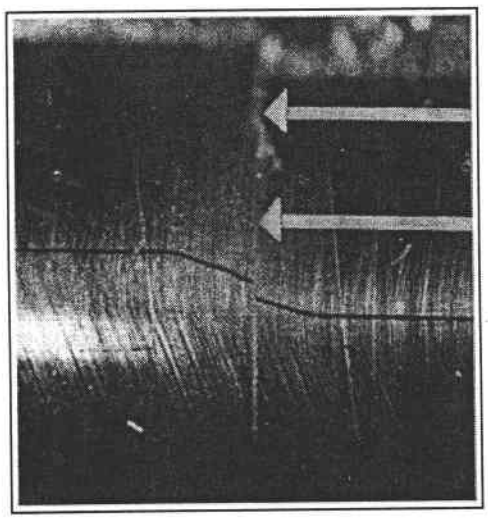


FIG. I-15(b)

FIG. I-15 : *Eprouvette de torsion à bords hexagonaux.*
(D'après DUFFY & al. -1984-)

Une autre méthode, montrée à la figure **I-16** utilisée par KLEPACZKO [44] consiste à usiner des rainures dans l'éprouvette et de les ajuster dans des clavettes fixées aux barres. L'éprouvette peut ainsi garder sa forme circulaire. Ceci est un avantage car l'impédance mécanique des barres $(I_0 \rho c)_b$ doit être la plus proche possible de celles des éprouvettes $(I_0 \rho c)_{ep}$ sous peine d'obtenir des réflexions parasites. De plus l'usinage est plus aisé et le coût de chaque éprouvette s'en trouve par conséquent diminué.

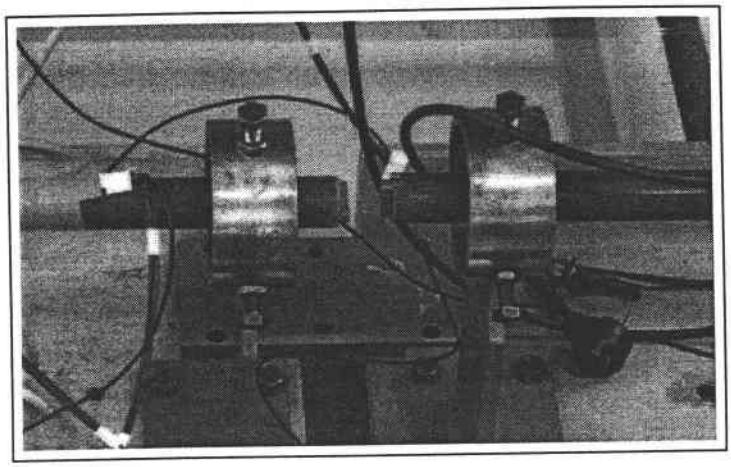


FIG. I-16 : *Fixation de l'éprouvette sur les barres de torsion. (D'après KLEPACZKO -1979-)*

IV - LE POINÇONNAGE DYNAMIQUE

Les méthodes basées sur le concept des barres d'HOPKINSON, comptent parmi les plus répandues pour l'étude dynamique des matériaux. Cependant, cette technique a aussi ses limites. Les principaux problèmes que l'on peut rencontrer apparaissent lorsqu'on essaye d'atteindre des vitesses de déformation situées au delà de 10^3 sec^{-1}. En effet les temps de montée d'une onde incidente, en compression t_m = 20 μsec ou en torsion 20 μsec $\leq$ t_m $\leq$40 μsec, limitent non seulement la vitesse maximum de déformation qu'il est possible d'atteindre, mais sont aussi la cause de variation de cette vitesse de déformation durant le processus de déformation de l'échantillon.

Une autre restriction est la déformation maximum de l'éprouvette. En traction, la déformation est limitée par la striction de l'éprouvette à un certain stade, tandis que dans le cas de la compression, la friction à l'interface barre-éprouvette et l'inertie radiale peuvent fausser les résultats de l'essai. Pour le cas de la torsion d'un tube à parois minces, la déformation maximum en cisaillement est limitée par l'angle de pré-torsion de la barre incidente.

Cependant il existe de nombreuses situations où des vitesses de déformation ainsi que des déformations beaucoup plus élevées peuvent être atteintes. C'est le cas notamment du formage à grande vitesse ou encore des régions entourant les zones de fissuration dynamique. Ainsi de nombreux auteurs ont été amenés à développer de

nouvelles techniques expérimentales et de nouvelles géométries d'éprouvette pour parvenir à un état idéal de déformation sous des vitesses de déformation supérieures à 10^4 sec^{-1}. Une des solutions les plus évidentes consiste à diminuer fortement la taille de la partie utile de l'éprouvette et d'augmenter la vitesse d'impact.

IV - 1 : METHODE DU DOUBLE CISAILLEMENT

Le poinçonnage d'un échantillon est une des techniques développées à partir de cette idée. Un dispositif basé sur le principe des barres d'HOPKINSON est conçu par CAMPBELL & FERGUSSON [45]-*1970-*. Une des modifications consiste à remplacer la barre de transmission par un tube dans lequel la barre incidente (qui est une barre d'impact) peut venir se loger. L'éprouvette de compression est aussi remplacée par une éprouvette parallèlèpipèdique munie de deux entailles, appelée éprouvette de Double Cisaillement.

L'éprouvette est maintenue au tube de sortie par ses deux extrémités, alors que la barre d'impact vient la frapper dans sa partie centrale. Le principal inconvénient de cette technique est qu'il est difficile d'atteindre des déformations supérieures à 20% en cisaillement pur. Au delà, une rotation des deux extrémités par rapport au centre apparaît et induit un chargement de compression dans la partie utile de l'éprouvette.

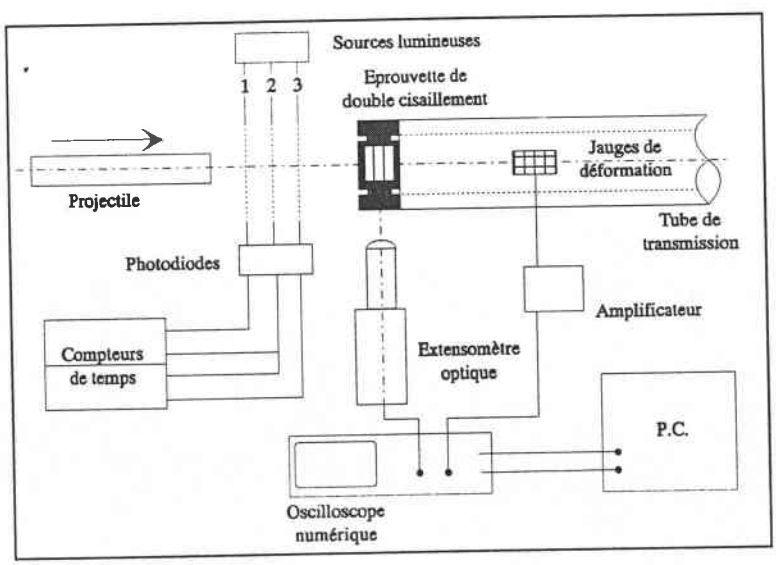


FIG. I-17(a)

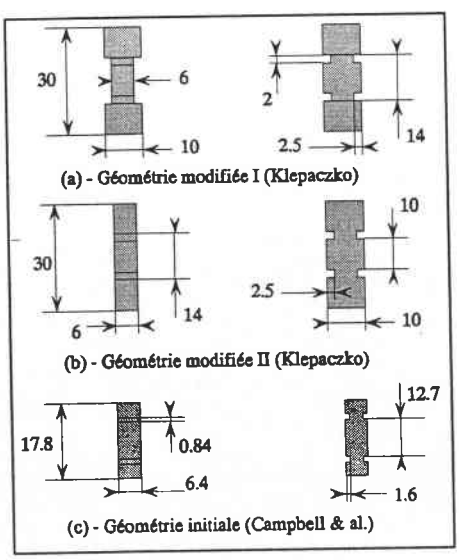


FIG. I-17(b)

FIG. I-17 : *Dispositif de double cisaillement. (D'après KLEPACZKO -1994-)*

Une version modifiée par KLEPACZKO [22]-*1994*- est représentée à la figure **I-17**(a). Des projectiles à bouts plats sont propulsés par un canon à gaz à des vitesses comprises entre 1 et 120 m/sec sur une éprouvette de Double Cisaillement modifiée. Le déplacement axial de la partie centrale de l'échantillon est mesuré à l'aide d'un extensomètre optique. La force axiale produite est déterminée en fonction du temps à partir de l'onde longitudinale transmise mesurée par des jauges d'extensomètrie.

KLEPACZKO montre qu'une éprouvette modifiée selon la figure **I-17**(b) permet de réduire le phénomène de rotation des parties externes et diminue substantiellement les concentrations de contraintes au niveau des entailles. De plus le champ de déformation est plus uniforme dans les régions déformées, ce qui permet d'obtenir des déformations plus élevées ou la formation de bandes de cisaillement.

IV - 2 : PERFORATION

Une variante de cette technique a été conçue par HARTMANN, KUNZE & MEYER [46]-*1981*-, dont une représentation est donnée à la figure **I-18**. L'éprouvette ne présente plus d'entailles mais est complètement plate. La précision dans les résultats des essais est directement reliée à la coaxialité entre les deux barres. Cette méthode est surtout utilisée pour l'étude de la résistance à la perforation des matériaux.

Bien que l'épaisseur de la zone cisaillée ne soit pas clairement définie, cette technique de poinçonnage permet d'atteindre des vitesses de déformation au sein des échantillons de l'ordre de 10^4 sec^{-1}.

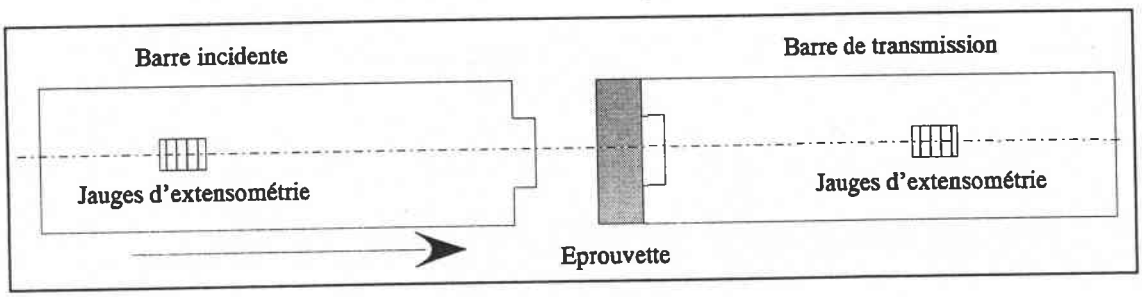


FIG. I-18 : *Poinçonnage (D'après HARTMANN & al. -1981-)*

IV - 3 : POINÇONNAGE D'UNE EPROUVETTE CHAPEAU

La géométrie spéciale de ce type d'éprouvette de révolution, développée par MEYER & MANWARING [47]-*1985*- et illustrée à la figure **I-19**, permet une forte localisation de la contrainte et un cisaillement local très important, par compression de l'échantillon entre deux barres d'HOPKINSON. La déformation totale est contrôlée à l'aide d'une bague d'arrêt.

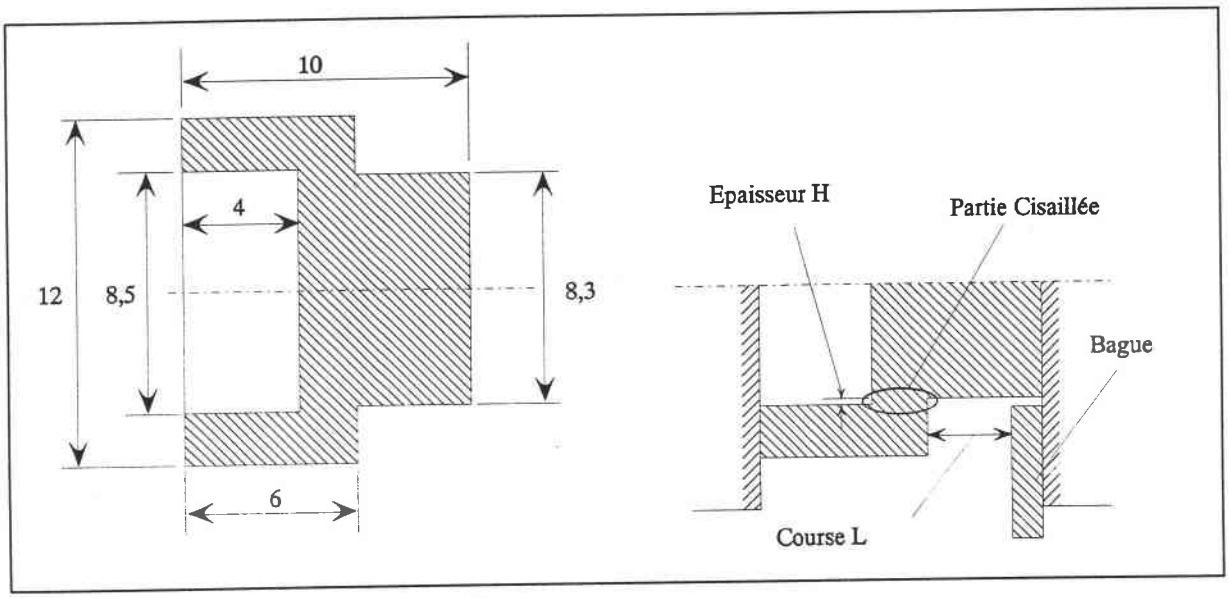


FIG. I-19 : *Forme et dimensions d'une éprouvette chapeau. (D'après BUISSON -1986-)*

Les mesures de duretés transverses montrent que le cisaillement adiabatique prend naissance aux coins de l'éprouvette et que son évolution débute par une zone de déformation plastique, qui s'intensifie, devient catastrophique et se termine souvent par une rupture. Seules ces parties subissent un cisaillement simple et sont le lieu de formation de B.C.A..

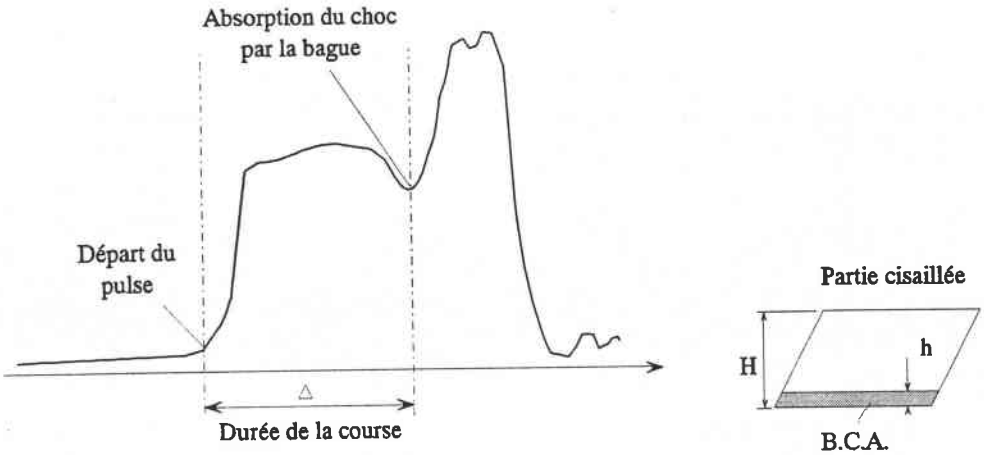


FIG. I-20 : *Profil du signal transmis et partie cisaillée de l'éprouvette chapeau. (D'après BUISSON -1986-)*

La vitesse macroscopique de cisaillement est déterminée par : $\dot{\Gamma}_0 = \frac{L}{\Delta H}$ (26)

et la vitesse locale de cisaillement s'exprime par : $\dot{\gamma} = \dot{\Gamma}_0 \frac{H}{h}$ (27)

V - CONCLUSION

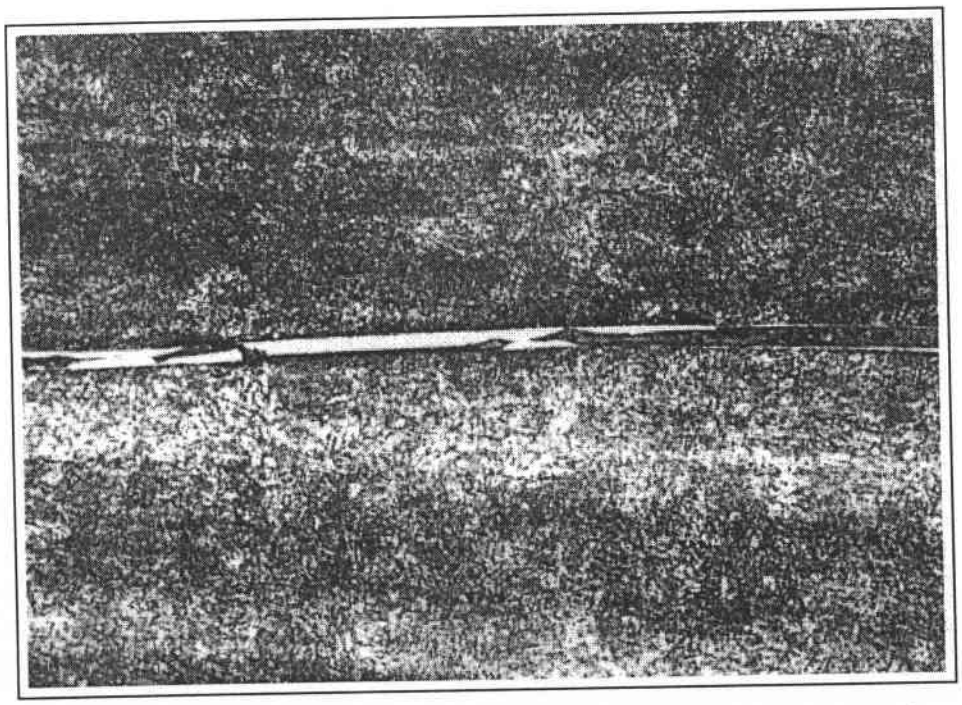
Il est possible d'ajouter d'autres techniques expérimentales à celles présentées ici. Certaines, comme l'expansion de conteneur, utilisée par CLARK & JURACIO [48] permet de créer des bandes de cisaillement à des vitesses de déformation de 10^4 s^{-1}. Cette technique est particulièrement adaptée à l'étude de la fragmentation des obus et à la répartition des bandes dans un volume de matière assez important, comparativement aux autres essais dynamiques. Néanmoins sa mise en oeuvre est très délicate, car elle fait intervenir l'utilisation d'explosifs. De plus elle pose des difficultés pour la récupération des fragments dans de bonnes conditions. Ces inconvénients font que cette méthode reste peu employée.

L'impact oblique sur plaque développé par ABOU-SAYED, CLIFTON & HERMANN [49] *-1976-* permet d'atteindre des vitesses de déformation de 10^5 s^{-1} avec des éprouvettes d'une épaisseur de 0,2 mm, voire 10^7 s^{-1} pour des échantillons extrêmement fins de 2,5 μm. Néanmoins cette méthode est limitée à l'étude des matériaux à grains très fins, car la taille des grains doit être faible comparativement à la taille des éprouvettes pour assurer une réponse polycristalline représentative. De plus la préparation de ces éprouvettes est relativement longue et délicate vue leurs dimensions.

Les essais de torsion sont les plus utilisés en laboratoire pour l'étude générale du cisaillement adiabatique. La technique est fiable et les résultats bibliographiques nombreux pour la comparaison des résultats. Les essais de compression conviennent mieux à l'étude de processus industriels de mise en forme, comme le forgeage par exemple.

CHAPITRE II

RESULTATS EXPERIMENTAUX SUR LA RUPTURE DYNAMIQUE ET LE CISAILLEMENT ADIABATIQUE



Fissure se développant dans une B.C.A..
(D'après POKORNY -1986-)

CHAPITRE II

RESULTATS EXPERIMENTAUX SUR LA RUPTURE DYNAMIQUE ET LE CISAILLEMENT ADIABATIQUE

Table des Matières

I - INTRODUCTION **34**

II - FISSURATION DYNAMIQUE : QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX **35**

II - 1 : METHODE DES OMBRES OPTIQUES : "CAUSTICS" 36

II - 2 : PROPAGATION D'UNE FISSURE RAPIDE 37

II - 3 : COMPARAISON K_{ID} ET K_I 39

II - 4 : IMPACT ET FISSURATION 41

III - BANDES DE CISAILLEMENT ADIABATIQUES : QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX **43**

III - 1 : COMPORTEMENT DES B.C.A. SOUS UN IMPACT 44

III - 1.1 : SYNTHESE 47

III - 2 : VITESSE DE PROPAGATION D'UNE B.C.A. 47

III - 3 : MESURE DES TEMPERATURES 50

IV - CONCLUSION **51**

RESULTATS EXPERIMENTAUX SUR LA RUPTURE DYNAMIQUE ET LE CISAILLEMENT ADIABATIQUE

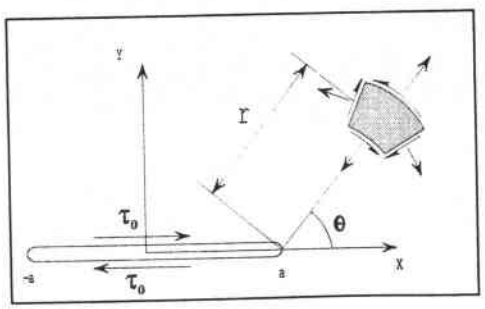
I - INTRODUCTION

Les B.C.A. apparaissent généralement lorsque les matériaux sont soumis à des chargements dynamiques qui entraînent des vitesses de déformation élevées. Si ces vitesses ne sont pas assez importantes, et favorisent ainsi la diffusion de la chaleur produite par la déformation dans tout le matériau, les B.C.A. ne se forment pas mais seulement des fissures peuvent se créer et s'étendre.

En mécanique de la rupture, pour l'étude de la fissuration, l'influence des contraintes appliquées τ_0, de la longueur de la fissure a, et de la géométrie de l'éprouvette Y_{II} est contenue dans un paramètre K, appelé *coefficient de concentration de contrainte*. Dans le cas d'un chargement en mode II, il est noté K_{II} et il s'exprime de façon conventionnelle par :

$$K_{II} = \tau_0 \sqrt{\pi a}\, Y_{II} \tag{28}$$

Ainsi, dans des conditions de chargement quasi statiques, l'état de contrainte au voisinage de la pointe de fissure peut être exprimé (mode II) par :



$$\begin{cases} \sigma_{xx} = -\dfrac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\dfrac{\theta}{2}\left(2 + \cos\dfrac{\theta}{2}\cos\dfrac{3\theta}{2}\right) \\ \sigma_{yy} = \dfrac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin\dfrac{\theta}{2}\cos\dfrac{\theta}{2}\cos\dfrac{3\theta}{2} \\ \tau_{xy} = \dfrac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos\dfrac{\theta}{2}\left(1 - \sin\dfrac{\theta}{2}\sin\dfrac{3\theta}{2}\right) \end{cases} \tag{29}$$

Un exemple de la zone plastique qui est alors formée en pointe de fissure est donné par VARFOLOMEEV & KLEPACZKO [50]-*1995*- qui calculent l'évolution du rayon (Rp) de la zone plastique (en mode II), illustrée à la figure **II-1**, en fonction de la contrainte appliquée.

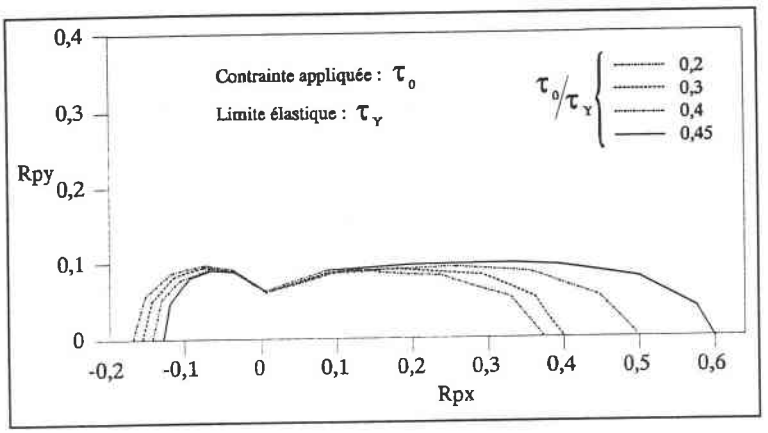


FIG. II-1 : *Géométrie de la zone plastique en pointe de fissure. (Mode II) (D'après VARFOLOMEEV & KLEPACZKO -1995-)*

Une fissure peut s'étendre parce qu'une valeur critique de K_{II} a été atteinte pour permettre son développement. Cette quantité est notée $K_{IIc}(\dot{K}_{II})$ et est appelée *ténacité du matériau.*

Une étude menée par ERDOGAN & SIH [51]-*1963*- montre que si une éprouvette préfissurée est soumise à de la tension (mode I), elle voit sa fissure s'étendre dans sa direction d'origine. Alors que si une même éprouvette est soumise à du cisaillement (mode II), la fissure dévie de son orientation initiale et se développe en formant un angle d'environ 70° avec cette direction. Ce comportement est prévu par de nombreux critères et est vérifié par de nombreux résultats expérimentaux, BROEK [52]-*1986*-. LEE & FREUND [53]-*1990*- montrent que cette direction correspond à la direction où la contrainte tangentielle est maximale et la contrainte de cisaillement est égale à zéro.

II - RUPTURE DYNAMIQUE : QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Pour des fissures statiques ou quasi statiques, les coefficients de concentration de contrainte K_{II} peuvent être facilement déterminés par des mesures de chargements ou de déplacements. Sous des conditions de fissuration dynamique, où la fissure se propage à des vitesses beaucoup plus élevées, la situation est plus complexe. Les

coefficients de concentrations de contrainte dynamiques K_{IID} (mode II) sont déterminés par une évaluation directe du champ de contrainte en pointe de la fissure. La méthode des "Caustics" est une méthode optique souvent utilisée en mécanique de la rupture pour évaluer ces coefficients K_{IID}.

II - 1 : METHODE DES OMBRES OPTIQUES : "CAUSTICS"

Ce procédé de mesure a été présenté pour la première fois par MANOGG [54] *-1964-* et a été développé un peu plus tard par THEOCARIS [55]*-1970-*. Le principe est illustré à la figure **II-2**(a).

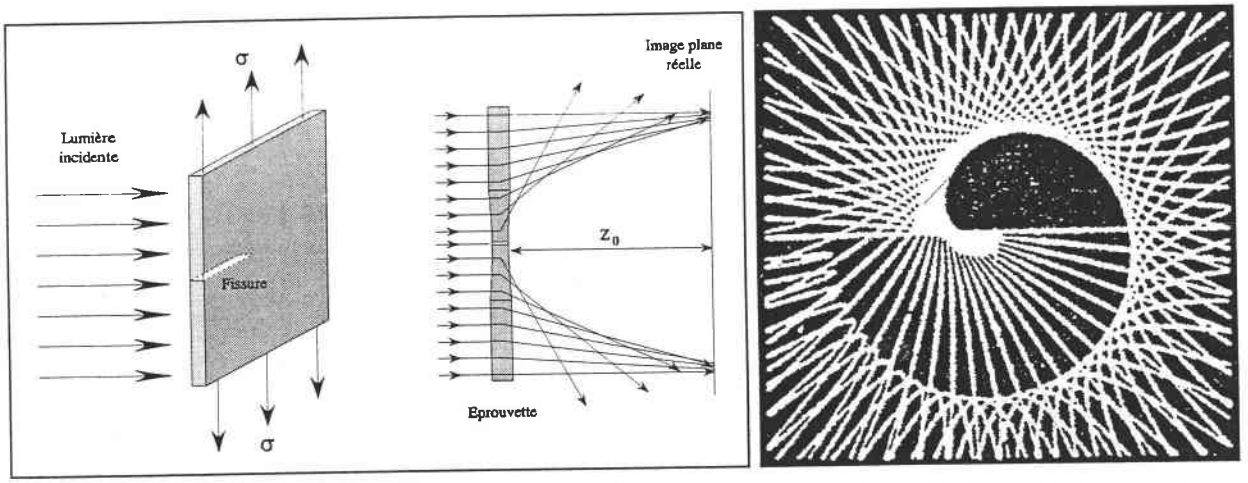


FIG. II-2 (a) : Principe physique de la méthode des ombres optiques : "caustic".

FIG. II-2 (b) :Franges lumineuses formant un "caustic". Représentation numérique.(mode II).

FIG. II-2 : *Principe et représentation d'un caustic. (D'après KALTHOFF -1987-)*

L'éprouvette préfissurée est éclairée par une source lumineuse incidente à rayons parallèles. Lors du chargement, la concentration de contrainte en pointe de fissure cause des variations locales d'épaisseur et donc d'indice de réfraction de l'éprouvette. La présence de la fissure agit comme une lentille et cause des déviations des rayons par rapport à leur direction d'origine. En conséquence sur un plan de référence situé à une distance Z_o de l'éprouvette, une aire ombrée est observée, entourée d'une région de concentration de lumière, le "caustic". Si l'éprouvette est transparente (polymère), la lumière est transmise au travers, et le plan de référence est situé à l'arrière de l'échantillon. Si elle est non transparente mais polie, la lumière est réfléchie sur le plan

situé à l'avant. Une illustration d'un "caustic" pour des conditions de chargement en mode II est représentée numériquement à la figure **II-2**(b).

Quantitativement, le diamètre maximum du "caustic" est lié au coefficient de concentration de contrainte par la relation suivante :

$$K_{I-IID} = \frac{2\sqrt{2\pi}}{3 f_{I-II}^{5/2} z_0 c d_{eff}} D_{I-II}^{5/2} \qquad (30)$$

avec :

K_{I-IID} : Coefficient de concentration de contrainte sous chargement en mode I-II,

D_{I-II} : Diamètre du "caustic" en mode I-II,

f_{I-II} : Facteur numérique; 3,17/3,02 pour mode I-II,

z_o : Distance entre l'éprouvette et l'ombre plane,

c : Constante dépendante du matériau,

d_{eff} : Epaisseur de l'éprouvette = d en transmission
=d/2 en réflexion,

d : Epaisseur physique de l'éprouvette.

Une description plus précise du principe est fournie par KALTHOFF [56]-*1982*-.

II - 2 : PROPAGATION D'UNE FISSURE RAPIDE

La littérature présente surtout des résultats expérimentaux sur des matériaux soumis à des sollicitations en mode I. La mise en oeuvre de techniques expérimentales générant des chargements sous ce mode est plus aisée. Par contre, il est plus difficile d'obtenir un état de cisaillement pur (mode II) dans une éprouvette et les études de comportement en mode II sont en conséquence plus rares.

Cette partie présente une rapide synthèse de différents travaux et résultats obtenus sur la propagation de fissures dynamiques en mode I. Le chargement des échantillons est provoqué par la chute d'une masse (Drop Hammer) ou encore par un impact à faible vitesse. Les résultats mettent en évidence l'influence des effets dynamiques (inertie) sur la détermination des quantités telles que le coefficient de concentration de contrainte dynamique K_{ID}.

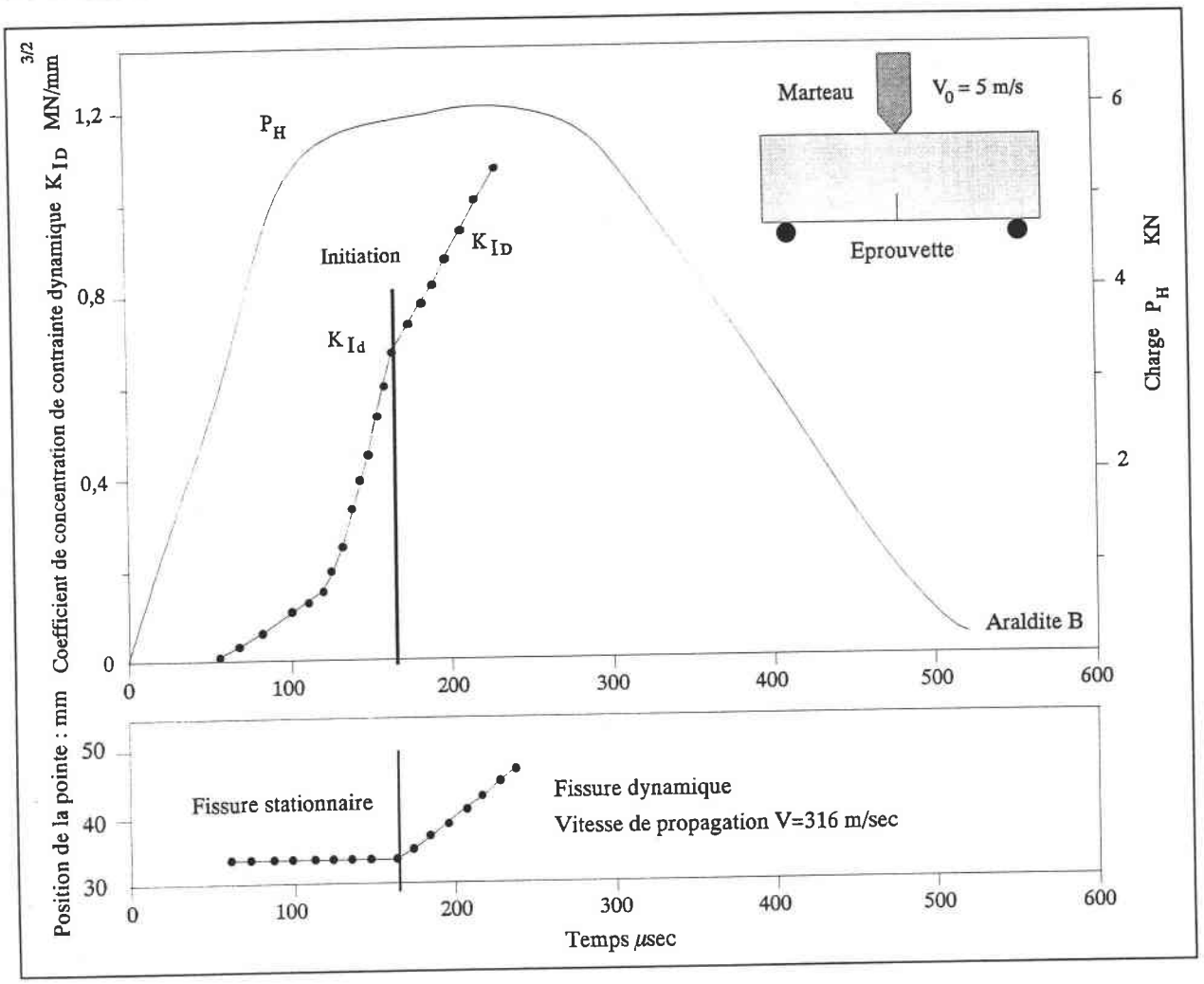


FIG. II-3 : *Comportement d'une fissure d'une éprouvette préfissurée pendant la chute d'une masse. (D'après KALTHOFF & WINKLER -1985-)*

KALTHOFF & WINKLER [57]-*1985*- déterminent par la méthode des caustics, l'évolution du coefficient K_{ID}, et mesurent la longueur d'une fissure, pendant la chute d'une masse à 5 m/sec sur une éprouvette en Araldite B. Ces données sont représentées à la figure **II-3**. Au début de l'essai, la fissure est stationnaire car les conditions de chargement ne sont pas suffisantes pour permettre son développement. Au début de la propagation, le coefficient de concentration critique égale la valeur 0,67 MN/m$^{3/2}$ et est appelé *ténacité dynamique* K_{Id}. Les auteurs montrent que cette valeur diffère de celle calculée par une méthode statique conventionnelle et établissent ainsi qu'une analyse statique n'est pas adéquate pour décrire les conditions de chargement dans l'éprouvette. La fissure se propage ensuite à la vitesse de 310 m/sec.

D'autres essais en mode I sont réalisés sur des aciers à haute dureté, par KALTHOFF, BEINERT & WINKLER [58]-*1987*- sur deux types d'éprouvettes de géométries différentes

(Eprouvette DCB et SEN), mais de matière identique (Araldite B). Ils montrent que les coefficients de concentration de contrainte dynamiques K_{ID} mesurés, augmentent avec la vitesse de propagation de la fissure, comme il est montré sur la figure **II-4**. Mais ils constatent aussi de larges variations des ces valeurs pour une même vitesse de propagation, suivant l'éprouvette testée. Ainsi :

* Le coefficient de concentration de contrainte K_{ID} est fonction de la vitesse de propagation $\dot{a}$ et peut être tracé sur des courbes (K_{ID}-$\dot{a}$).

* Ces courbes ne sont pas uniques mais dépendent de la géométrie de l'éprouvette.

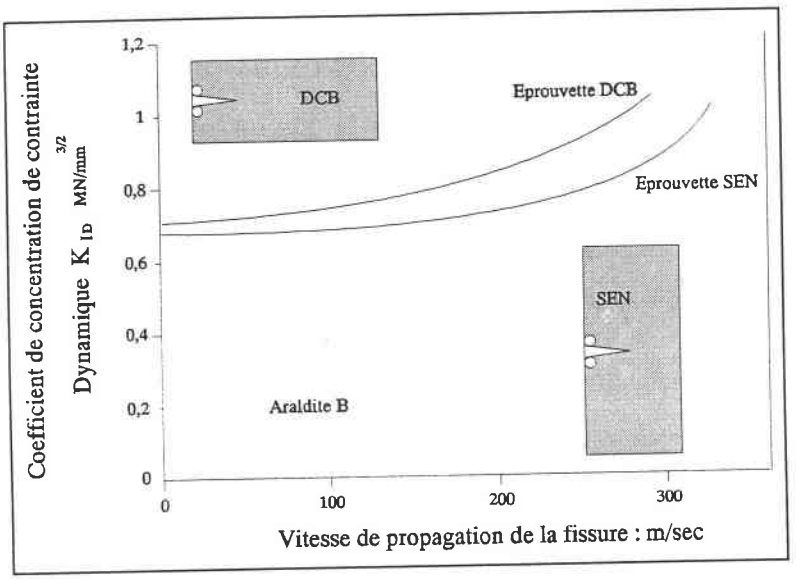


FIG. II-4 : *Evolution du coefficient K_{ID} en fonction de la vitesse des fissures et du type d'éprouvette. (D'après KALTHOFF & WINKLER -1987-)*

II - 3 : COMPARAISON K_{ID} ET K_I

Différents essais entrepris par KALTHOFF, BEINERT, WINKLER & KLEMM [59] *-1980-* comparent l'évolution du coefficient de concentration de contrainte dynamique K_{ID}, mesuré en bout d'une fissure dynamique avec celui déterminé dans le cas d'une fissure statique équivalente K_I. Le résultat est illustré à la figure **II-5**.

Au début de la propagation de la fissure, K_{ID} est plus petit que K_I : $K_{ID} < K_I$. Ceci est dû aux ondes élastiques qui sont générées par la fissure en mouvement. Vers la fin de la propagation et en particulier au moment de l'arrêt $K_{ID} > K_I$, cet effet est

provoqué par les ondes réfléchies aux limites de l'éprouvette qui viennent interférer avec la fissure et qui contribuent à l'augmentation du coefficient de contrainte K_{ID}. Seulement après l'arrêt K_{ID} se rapproche de K_I via une oscillation amortie due aux effets des ondes émises durant la période de propagation et d'arrêt qui ont initié une vibration de l'éprouvette.

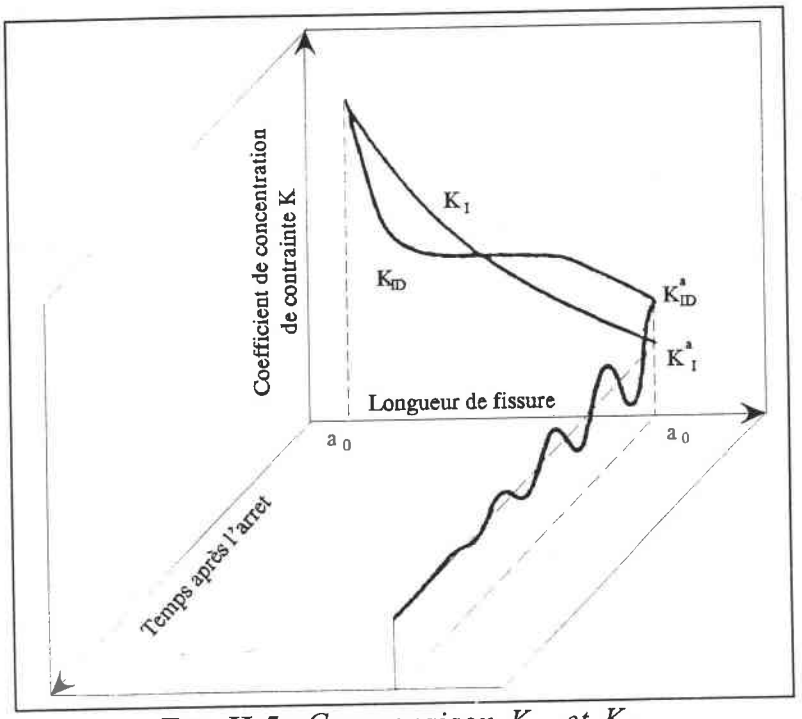


FIG. II-5 : *Comparaison K_{ID} et K_I.*
(D'après KALTHOFF & al. -1980-)

Ces résultats concernent le comportement des fissures en mode I. Plusieurs travaux ont été menés de manière à déterminer le comportement des fissures lorsque des éprouvettes sont soumises à des chargements dynamiques en mode II. KALTHOFF & WINKLER [60]-*1987*- ont conçu un dispositif qui permet d'impacter à grande vitesse des éprouvettes plates préfissurées ou pré entaillées. Ils font apparaître plusieurs types de comportement de la fissuration en fonction de la vitesse d'impact et notamment une transition d'un mode de déformation fragile (fissuration) à un mode ductile (bandes de cisaillement). La conception du dispositif dynamique d'impact développé au laboratoire de Metz (L.P.M.M.) au cours de cette étude est en partie basée sur le principe de KALTHOFF & WINKLER [60].

La présentation de leur technique expérimentale est l'objet du paragraphe suivant.

II - 4 : IMPACT ET FISSURATION

Leur méthode consiste à propulser, grâce à un canon à air, un projectile sur une éprouvette munie de deux entailles parallèles, dans un intervalle de vitesses compris entre 10 m/sec et 100 m/sec. Ce dispositif est illustré à la figure **II-6**. L'éprouvette est un parallélépipède de dimensions (L)200 mm x (l)100 mm x (h)10 mm. La distance qui sépare les deux entailles est égale au diamètre du projectile soit 50 mm. Lors de l'impact, une onde de compression est produite au centre de l'éprouvette entre les entailles. Un chargement de type mode II est ainsi généré en tête de ces entailles.

Cette condition de chargement ne s'applique que jusqu'à ce que les ondes soient réfléchies par les limites de l'éprouvette et ne reviennent interférer avec les pointes des entailles.

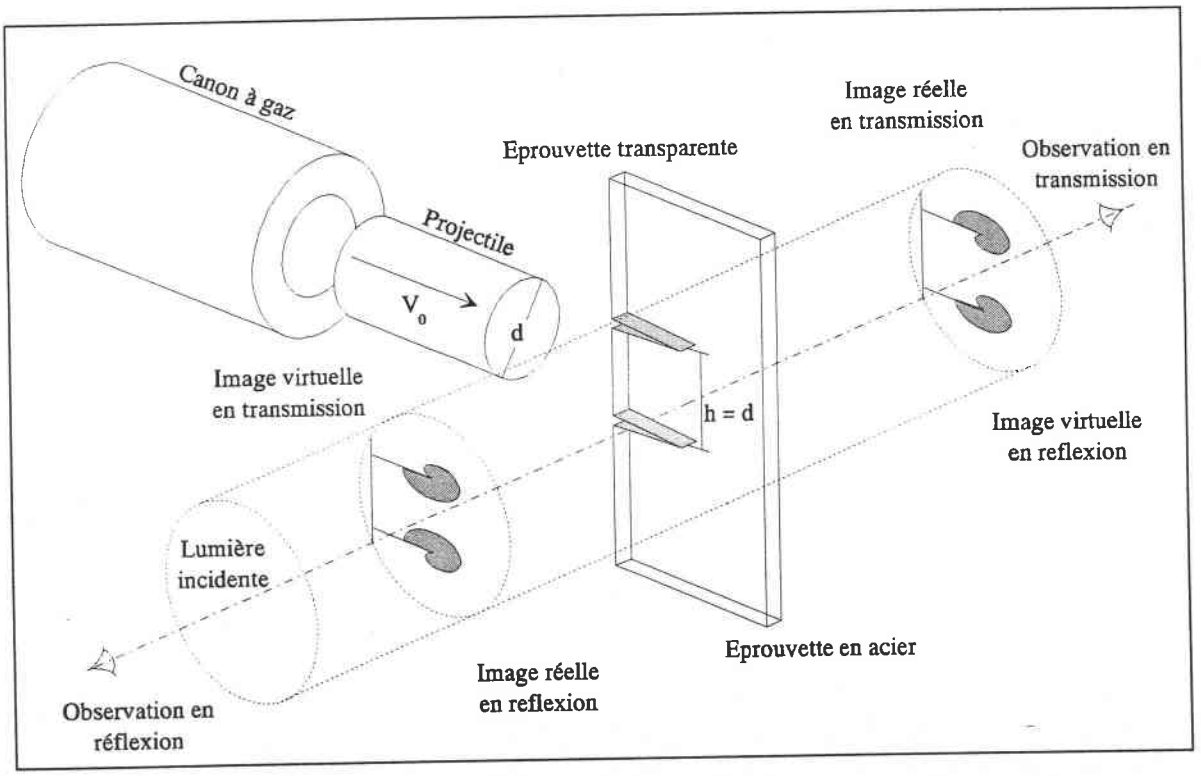


FIG. II-6 : *Dispositif expérimental d'impact. (D'après KALTHOFF & WINKLER -1987-)*

Plusieurs expériences ont été effectuées pour étudier le comportement de la fissuration d'éprouvettes en acier X2-Ni-Co-Mo-1895 (acier martensitique) et en acier 42-Cr-Mo4 (acier Chrome Molybdène), les variables expérimentales étant la vitesse d'impact V_o et le rayon en fond d'entaille r.

Il ressort de ces expériences que pour des vitesses faibles et une acuité faible (soit un rayon élevé) *r=0,8 mm*, aucun dommage n'est observé sur les éprouvettes. Pour des vitesses d'impact plus élevées avec une acuité faible, ou alors des vitesses peu importantes mais acuité plus forte, des fissures sont obtenues dans une direction qui forme un angle de 70° avec la direction d'origine. Ces dommages sont contrôlés par un processus de fracture provoquée par de la tension; LEE & FREUND [53]. Enfin dans le cas extrême de la plus grande vitesse d'impact et d'une forte acuité, la fissuration se développe dans une direction à peu près identique à celle de l'entaille. Tous ces résultats sont schématisés dans le tableau de la figure **II-7.**

Par des analyses microscopiques, les auteurs montrent que dans le dernier cas des bandes de cisaillement adiabatique se sont propagées. Ce n'est qu'après leur formation, que ces B.C.A. voient leur zone centrale rompue par un processus de fracture. Il est donc clair que se sont des mécanismes de cisaillement fortement localisés qui ont causé ces dommages aux grandes vitesses de déformation.

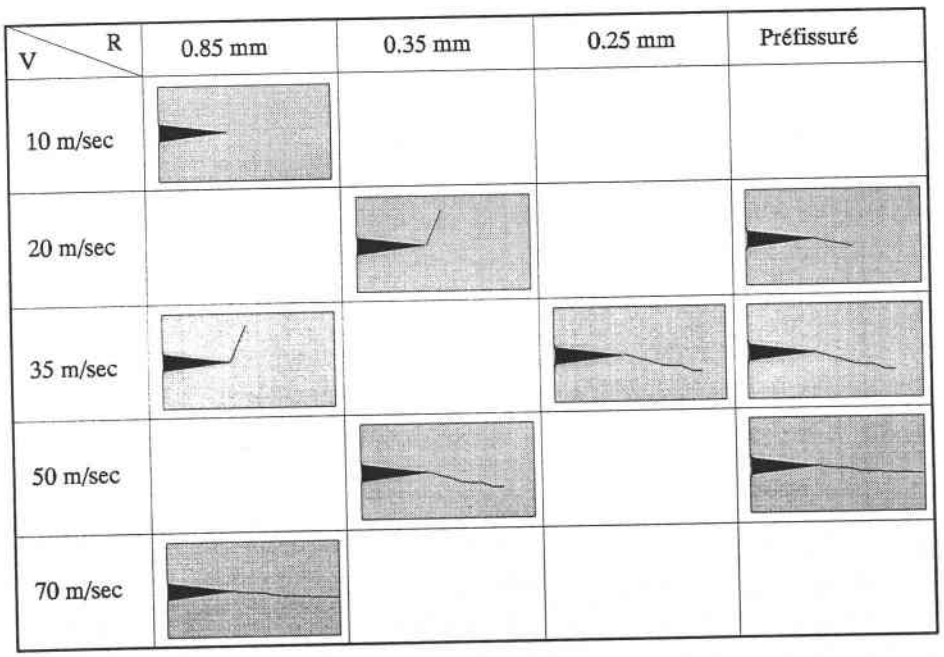


FIG. II-7 : *Mode de fissuration suivant la vitesse d'impact et du rayon en fond d'entaille. (D'après KALTHOFF & WINKLER -1987-)*

III - BANDES DE CISAILLEMENT ADIABATIQUE : QUELQUES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Le dispositif expérimental conçu par KALTHOFF & WINKLER [60] est donc une technique capable de générer des bandes de cisaillement adiabatique. Cependant, ils ne constatent l'apparition de B.C.A. que sous certaines conditions de chargement et n'effectuent pas d'études particulières sur leur développement au sein de l'échantillon.

D'autres auteurs, tels que MASON, ROSAKIS & RAVICHANDRAN [61]-*1993*- ou ZHOU & al. [14], ont repris le principe de ce dispositif afin d'analyser les conditions d'apparition et de propagation des B.C.A. dans une éprouvette. En effet, cette configuration expérimentale particulière permet de connaître le point d'initiation et la direction dans laquelle les B.C.A. générées vont se propager. Ainsi des mesures optiques ou thermiques très rigoureuses et répétitives peuvent être accomplies sur l'éprouvette. C'est le gros avantage que procure cette technique par rapport à celles décrites dans le chapitre précédant.

Le dispositif expérimental de ZHOU & al. [14] est présenté à la figure **II-8.**

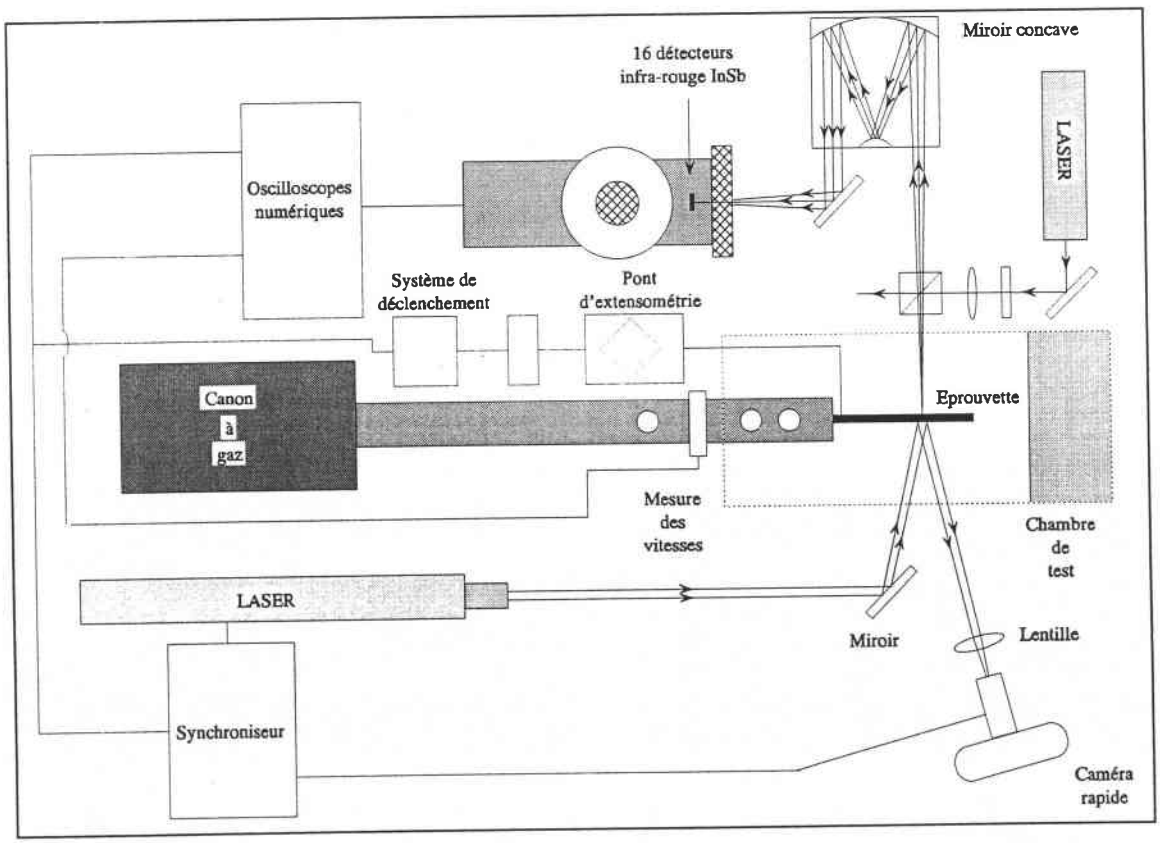


FIG. II-8 : *Dispositif d'impact expérimental. (D'après ZHOU & al. -1995-)*

Un projectile de diamètre 50,8 mm est propulsé par un canon à gaz sur l'éprouvette pré entaillée. Deux systèmes annexes permettent d'une part de mesurer les températures au sein de l'échantillon et d'autre part de photographier la propagation des B.C.A.. Les températures sont déterminées par des détecteurs infrarouges rapides Indium-Antimoine. La déformation d'une grille déposée sur l'éprouvette, et filmée par une caméra ultra rapide (2.10^6 images/sec), permet d'évaluer les longueurs et les vitesses de propagation des bandes de cisaillement.

III - 1 : Comportement des B.C.A. sous un Impact

Zhou & al. [14] étudient deux matériaux distincts, un acier martensitique C-300 et un alliage de titane Ti-6Al-4V. La différence notable avec l'expérience de Kalthoff & al. [60] est que l'éprouvette ne comporte plus qu'une seule entaille. D'après les auteurs cette géométrie d'éprouvette permet d'obtenir un temps de chargement à la pointe de l'entaille beaucoup plus important.

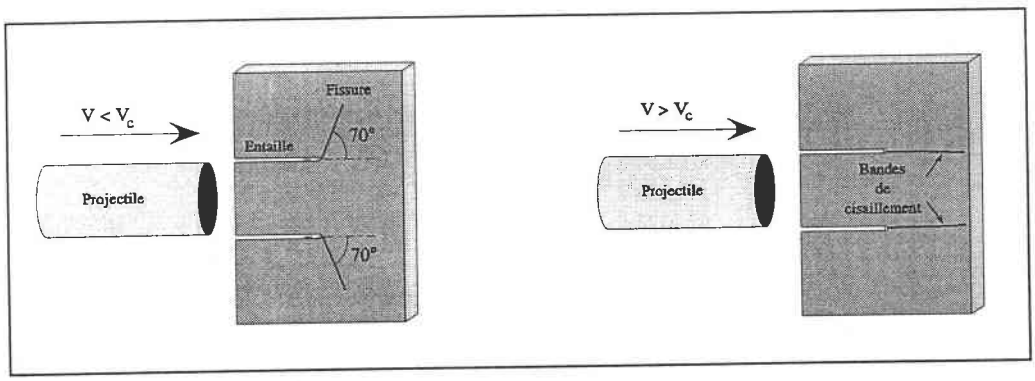


Fig. II-9(a) : Modes de rupture observés par Kalthoff.

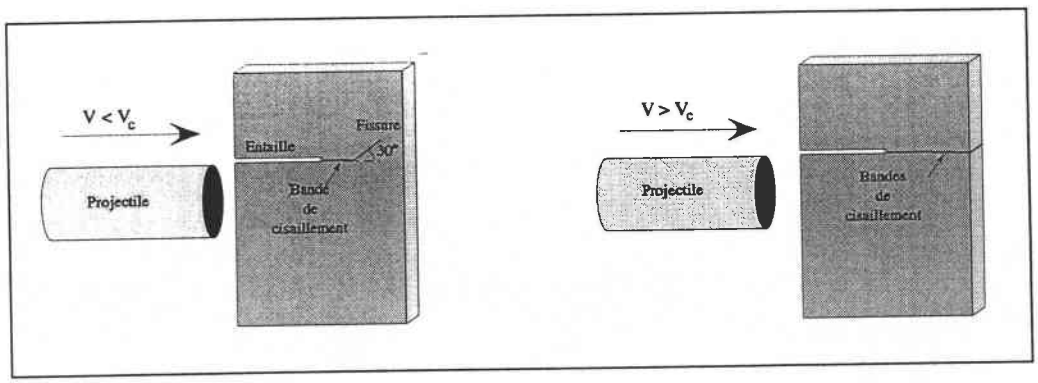


Fig. II-9(b) : Modes de rupture observés par Zhou & al.

Fig. II-9 : *Modes de rupture observés sur des éprouvettes pré entaillées.*

En effet, celle-ci ne subit pas les effets des ondes produites en bout de la seconde entaille. Il n'y a plus d'interactions et de perturbations des ondes entre les deux pointes. Au cours de leur étude, les auteurs ont trouvé des modes de rupture sensiblement différents de ceux de KALTHOFF & al.. Ils remarquent que sur l'acier C-300, des bandes de cisaillement apparaissent au-dessus d'une certaine vitesse critique (20 m/s). Cependant si la vitesse d'impact se situe en deçà d'un certain seuil (29 m/s), la B.C.A. s'arrête dans l'éprouvette, et est prolongée par une fissure qui s'étend de la pointe avec un angle de 30° par rapport à la direction d'impact. La comparaison avec les résultats expérimentaux de KALTHOFF & al. est illustrée à la figure **II-9**.

Sur la photographie **II-10**, deux surfaces de rupture sont visibles. La surface de la B.C.A. (partie blanche), brillante et lisse, indique un mode de rupture associé à une déformation en cisaillement. Une analyse au microscope électronique montre que la rupture au sein de la B.C.A. est directement liée à une apparition de vides qui croissent et sont cisaillés. L'aspect rugueux de couleur grise de la surface de la fissure est typique d'un mode de rupture en tension.

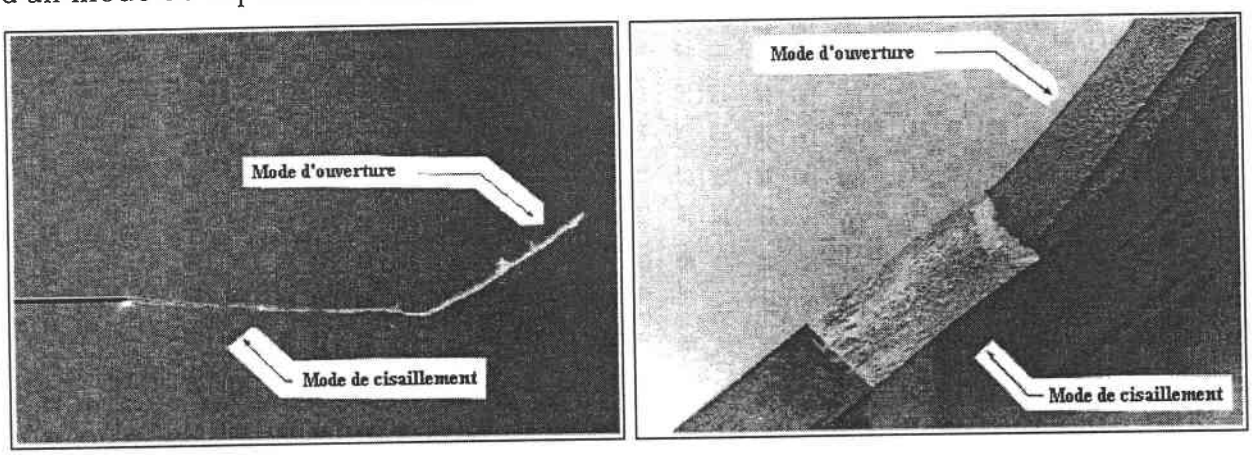


FIG. II-10 : *Vue plane d'une B.C.A. et d'une fissure.*
(D'après ZHOU et al. -1995-)

D'une manière analogue aux résultats de KALTHOFF, la coexistence démontrée de deux types de rupture sur une même éprouvette indique qu'une transition dans le mode de rupture apparaît à un instant donné au cours de l'essai. Plusieurs analyses numériques effectuées sur ce problème d'impact ont été menées par ZHOU, RAVICHANDRAN & ROSAKIS [18]. Ils montrent que cette transition est due à un changement des conditions de chargement au sein de l'échantillon. Dans leurs simulations, l'initiation et la propagation de la bande de cisaillement sont supposées

s'initier lorsque la déformation plastique équivalente atteint une certaine valeur critique. La propagation de la fissure est quant à elle supposée contrôlée par un critère de contrainte critique. La rupture est supposée s'initier lorsque la contrainte dans l'éprouvette excède une certaine valeur.

Ils montrent que le développement de la B.C.A. est gouverné par l'intensité du chargement en cisaillement produit par l'impact. La B.C.A. s'arrête lorsque cette intensité n'est plus suffisante. Dans le même temps les ondes de chargement arrivent à l'extrémité libre de l'éprouvette et sont réfléchies vers la B.C.A., comme des ondes de déchargement. Lorsqu'elles atteignent la tête de la B.C.A. arrêtée, elles provoquent alors un chargement en tension qui permet à une fissure de se développer. L'évolution de la contrainte de tension au court du temps est représentée sur la figure **II-11.**

Lorsque les vitesses d'impact sont plus élevées, l'expérience montre que la B.C.A. traverse entièrement l'échantillon et qu'aucune fissure apparaît. ZHOU & al. [18] expliquent ce phénomène par la vitesse de propagation de la B.C.A.. Celle-ci est dépendante de la vitesse d'impact et augmente avec elle. Ainsi pour une vitesse critique (dans leur expérience 29 m/s) la vitesse de propagation de la B.C.A. est telle qu'elle atteint l'extrémité de l'éprouvette avant que les conditions de chargement en tension ne se développent.

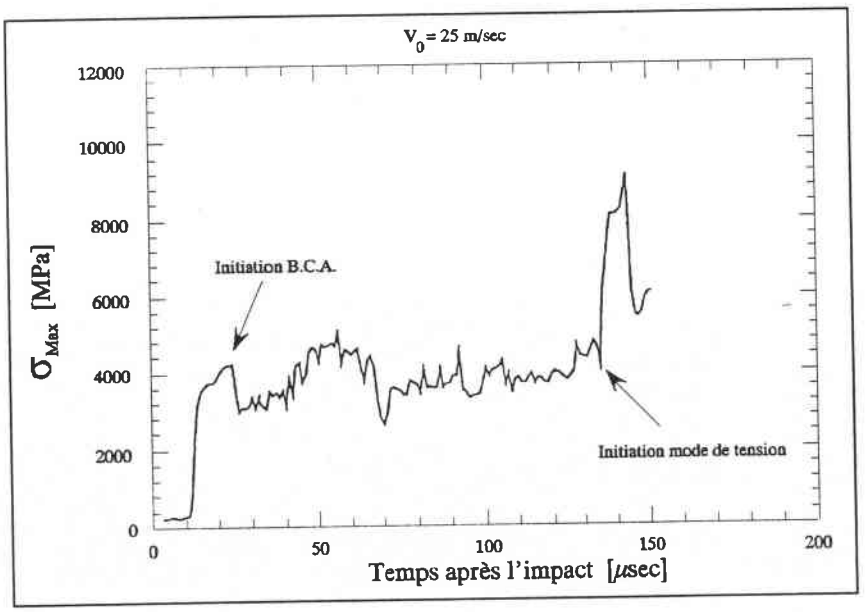


FIG. II-11 : *Histoire de la contrainte de tension maximale dans l'éprouvette. (D'après ZHOU & al. -1995-)*

III - 1.1 : SYNTHESE

Pour des essais à faibles vitesses, KALTHOFF & WINKLER [60] ont reporté qu'une fissure apparaît de l'entaille et forme un angle de 70° avec la direction d'impact, alors que pour des vitesses plus élevées une B.C.A. se propage de la pointe de l'entaille dans l'éprouvette. ZHOU & al. [14] trouvent qu'aux basses vitesses aucune fissure n'est observée, qu'à des vitesses intermédiaires une B.C.A. se forme, s'arrête et est prolongée par une fissure à 30° et enfin qu'aux grandes vitesses la B.C.A. traverse entièrement l'éprouvette. Des essais effectués par ces mêmes auteurs sur du titane Ti-6Al-4V ne provoquent la formation d'une bande de cisaillement qu'à des vitesses supérieures à 40 m/sec et dont la longueur n'excède pas 9 mm. Une grande disparité apparaît donc dans les résultats reportés qui peut être attribuée à la technique employée (double ou simple entaille) ou aux matériaux utilisés.

Une analyse récente a été menée par ZHOU, ROSAKIS & Ravichandran [62]-*1996*-. Elle concerne des impacts sur des éprouvettes en acier C-300, toutes soumises au même traitement thermique et dont les dimensions sont identiques. La seule différence réside dans le fait que certaines ne possèdent qu'une entaille et les autres deux. Cette démarche est adoptée pour étudier l'influence du nombre d'entailles sur les résultats et ainsi déterminer d'où provient la disparité vue précédemment. Les résultats obtenus sur les longueurs des bandes, sur les modes de rupture ou les champs de température montrent que la géométrie simple ou double entaille a peu d'effet. Les résultats sont proches dans les deux cas. Cette étude suggère donc que la variété dans les résultats sur le comportement des B.C.A. est induite par les propriétés des matériaux utilisés.

III - 2 : VITESSE DE PROPAGATION D'UNE B.C.A.

Plusieurs méthodes ont été développées pour mesurer la vitesse de propagation d'une bande de cisaillement. MARCHAND & DUFFY [7]-*1988*- ont effectué des essais avec des éprouvettes tubulaires à parois minces sur des barres de torsion. Ils démontrent que l'initiation de la B.C.A., la localisation, correspond au moment de la chute de contrainte sur un enregistrement Contrainte-Temps. Durant les essais, ils mesurent

aussi la température en un point de l'éprouvette. La figure **II-12** représente les enregistrements superposés Contrainte ,Température-Temps de deux essais.

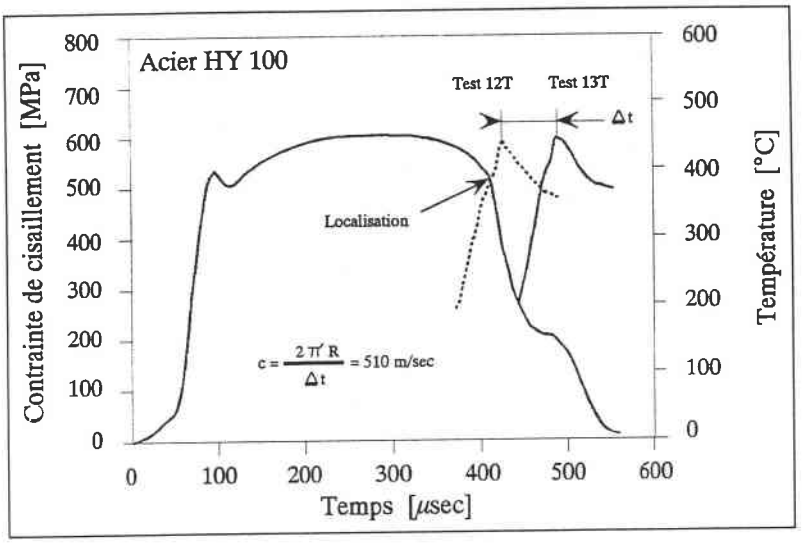


FIG. II-12 : *Enregistrement Contrainte-Temps ; Température-Temps. (D'après MARCHAND & DUFFY -1988-)*

Les deux courbes contrainte - temps sont identiques et superposées.

* Le premier pic de température coïncide avec la chute de contrainte, ce qui indique que la prise de température est effectuée au point d'initiation de la B.C.A..

* Le deuxième pic est situé 60 μsec après la chute de contrainte. C'est l'écart maximum relevé sur l'ensemble de la campagne d'essai, ce qui signifie que la bande a parcouru une grande distance (= le périmètre de l'éprouvette) avant la mesure de température. La vitesse peut alors être estimée par :

$$V = \frac{2\pi r}{\delta t} \qquad \text{soit : } V = 510 \text{ m/s} \qquad (31)$$

Une seconde technique qui peut être employée pour mesurer la vitesse de propagation d'une B.C.A. est de visualiser son parcours à travers l'échantillon au moyen d'un système optique à très grande vitesse. Sur les éprouvettes tubulaires utilisées en torsion dynamique, cette méthode est peu applicable car il est difficile de couvrir entièrement la surface du périmètre de l'éprouvette. De plus l'initiation de la B.C.A. peut avoir lieu en n'importe quel point de cette surface. Par contre, si des éprouvettes plates pré entaillées sont employées, le lieu de départ et le trajet de la bande sont connus à l'avance.

Le principe le plus couramment appliqué consiste à déposer une grille, composée de lignes parallèles, sur la surface de l'éprouvette. La B.C.A. en se propageant induit une déformation locale de l'échantillon qui a pour effet de décaler les lignes de la grille les unes par rapport aux autres. L'espace "d" entre les lignes étant connu, il suffit de mesurer la distance parcourue par la bande entre plusieurs photographies successives pour connaître sa vitesse de propagation.

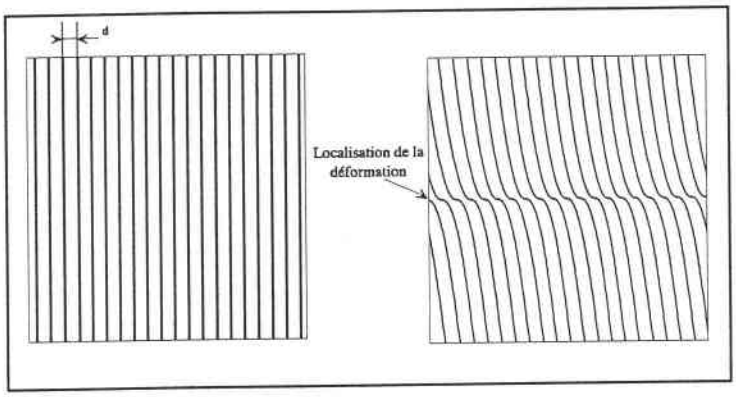


FIG. II-13 : *Schématisation d'une grille au passage d'une B.C.A..*

Cette méthode est utilisée par ZHOU & al. [14]. Ils mettent en évidence la dépendance entre la vitesse d'une B.C.A. et la vitesse d'impact dans un acier C-300. Une B.C.A. se propage d'autant plus vite que la vitesse d'impact est élevée. Il est pour l'instant impossible de prédire, avec les vitesses d'impact maximum atteintes, si cette vitesse de propagation va tendre vers un seuil critique ou non. Le comportement en vitesse est illustré à la **figure II-14**.

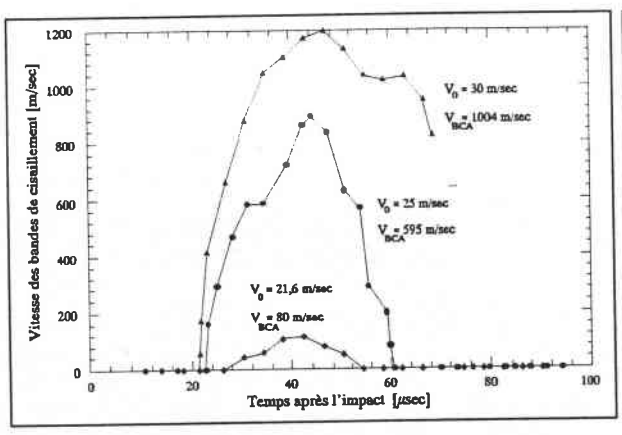


FIG. II-14(a) : Evolution de la vitesse de propagation dans l'éprouvette.

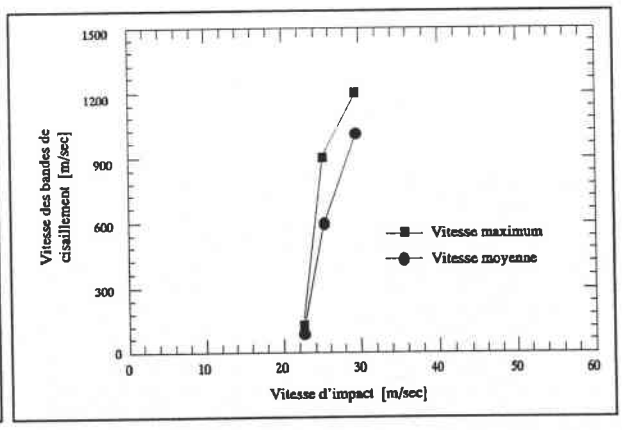


FIG. II-14(b) : Evolution de la vitesse de propagation en fonction de l'impact.

FIG. II-14 : *Estimation des vitesses de propagation de B.C.A. dans une éprouvette plate pré entaillée. (D'après ZHOU & al. -1995-)*

La vitesse maximum relevée est proche de 1200 m/sec pour un impact effectué à 38 m/sec. Les auteurs montrent aussi que la bande ne progresse pas à vitesse constante dans l'éprouvette, figure **II-14**(a), mais passe par une phase d'accélération puis de ralentissement.

MASON & al. [59] utilisent la méthode du C.G.S. (Coherent Gradient Sensing) développée par TIPPUR, KRISHNASWAMY & ROSAKIS [63]-*1989*- associée à une caméra rapide pour évaluer la vitesse de propagation. Ils trouvent une valeur de 320 m/sec sous un impact à 38 m/sec dans un acier C-300.

Ce résultat est cohérent avec celui de ZHOU & al. visible sur la figure **II-14**(b). Ils remarquent aussi une décroissance de la contrainte de cisaillement agissant sur la bande qui chute de 1,6 GPa au moment de l'initiation à 1,3 GPa par la suite. Cette diminution est liée à l'adoucissement thermique du matériau au voisinage de la bande.

Il peut donc être intéressant d'évaluer l'augmentation de température dans la bande. L'utilisation de capteurs infrarouge rapides InSb est la technique la plus répandue.

III - 3 : MESURE DES TEMPERATURES

L'avantage d'un tel dispositif est qu'il n'y a pas de contact physique entre le système de mesure et le corps déformé. Les capteurs sont disposés en rangées ou en lignes à coté de l'échantillon. Ils détectent les rayons infrarouges émis de la surface de l'éprouvette lors du passage de la B.C.A.. Ces émissions sont concentrées vers le tableau des capteurs par un miroir sphérique. La taille de la zone couverte par un détecteur est contrôlée en ajustant les distances entre l'échantillon, le miroir et le tableau. Le principe est schématisé sur la figure **II-8**.

HARTLEY, DUFFY & HAWLEY [64]-*1986*- utilisent un tableau à dix capteurs et mesurent une température maximale dans la bande de 455°C en son centre sur une éprouvette de CRS-1018 déformée à 2300 s^{-1}. Ils remarquent aussi un gradient de température entre le centre de la bande et sa périphérie. Cette observation est consistante avec la présence d'une déformation non homogène à travers la bande qui se traduit par une déformation beaucoup plus importante au centre de la B.C.A..

ZHOU & al. [14] montrent que les températures dans les bandes sont liées à leur vitesse de propagation. Aux grandes vitesses correspondent des taux de déformation très élevés et par conséquent de grandes températures. Ils reportent 1400°C pour un impact à 43 m/sec et une propagation à 1200 m/sec dans un acier C-300.

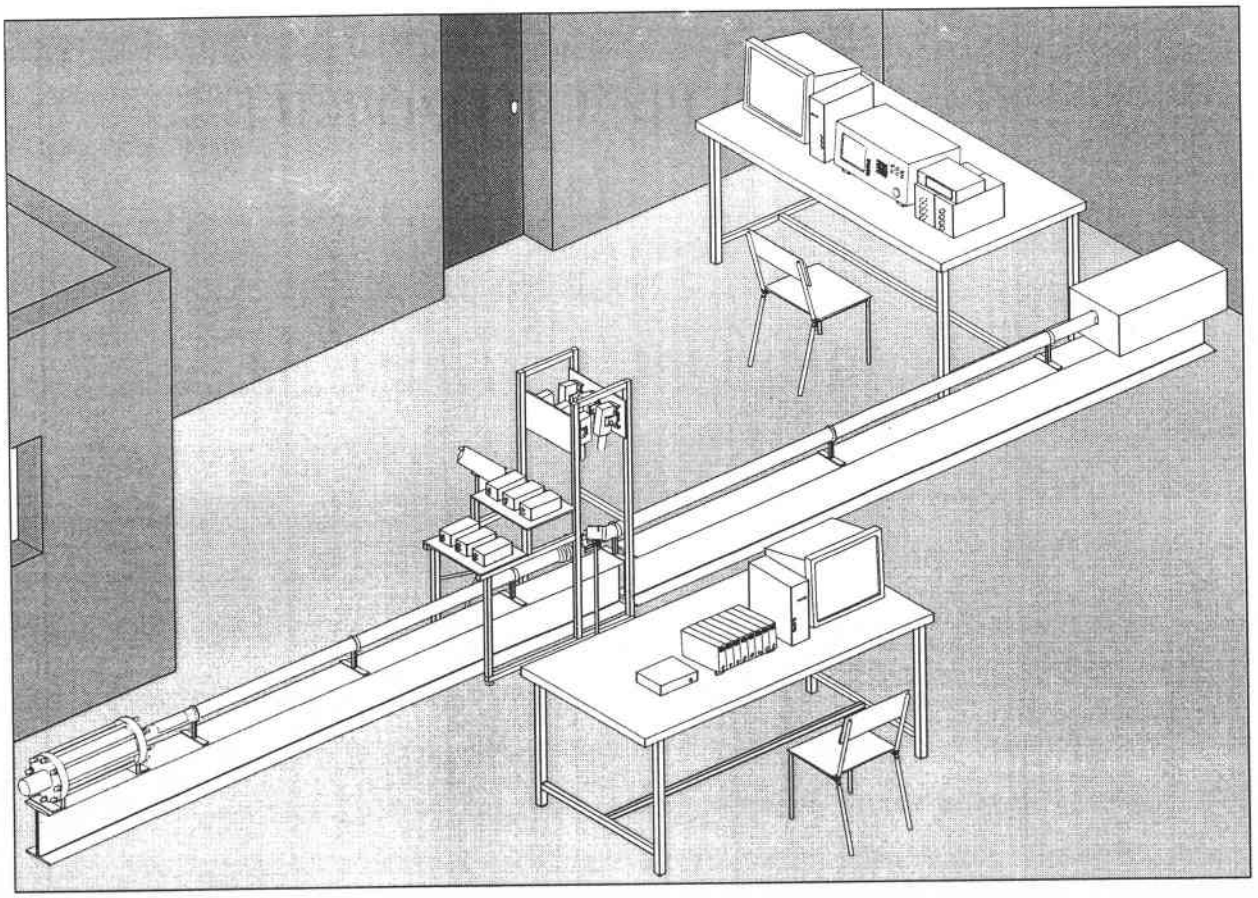
IV - CONCLUSION

La méthode expérimentale initiée par KALTHOFF & WINKLER [60], puis développée par ZHOU & al. [14], qui consiste à impacter avec un projectile, une éprouvette pré entaillée, est le principe de base que nous avons repris pour la conception de notre dispositif expérimental. Au cours de notre étude, notre but est d'arriver à initier des B.C.A. et de filmer leur propagation dans une éprouvette en acier 40-NCD-16, au moyen d'un système vidéo spécialement conçu pour cette application. Notre dispositif est aussi équipé d'un tube d'HOPKINSON, pour la mesure des efforts appliqués sur les échantillons, comparable à celui utilisé par KLEPACZKO [22] pour ses essais sur des éprouvettes de double cisaillement.

La description de ce dispositif expérimental fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

DISPOSITIF EXPERIMENTAL



Représentation du dispositif expérimental dynamique.

CHAPITRE III

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Table des Matières

I - INTRODUCTION **53**

II - BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL - PARTIE MECANIQUE **55**

II - 1 : PRINCIPE GENERAL DU FONCTIONNEMENT 55
II - 2 : LANCEUR A GAZ 57
II - 3 : TUBE DE LANCEMENT 59
II - 4 : TUBE D'HOPKINSON 60

II - 4.1 : PREMIERE FONCTION : MESURE DES EFFORTS 60
II - 4.2 : SECONDE FONCTION : SUPPORTS DES EPROUVETTES 61

II - 5 : TETE-SUPPORT DE L'EPROUVETTE 62
II - 6 : EPROUVETTE 64
II - 7 : PROJECTILE D'IMPACT 65

III - BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL - PARTIE ELECTRONIQUE **66**

III - 1 : MESURE DE LA VITESSE DU PROJECTILE 66
III - 2 : MESURE DES DEFORMATIONS DU TUBE 67
III - 3 : ETALONNAGE DU TUBE DE MESURE 69

IV - DISPOSITIF VIDEO CCD RAPIDE **71**

IV - 1 : PRINCIPE GENERAL DU FONCTIONNEMENT 72
IV - 2 : CAMERAS NUMERIQUES CCD-TV 75
IV - 3 : CONFIGURATION UTILISEE 76
IV - 4 : SYNCHRONISEUR 77

IV - 4.1 : SIGNAL DE SYNCHRONISATION 78

IV - 5 : ECLAIRAGE 79

V - ACQUISITION ET TRAITEMENT DES IMAGES **82**

VI - ASPECTS TECHNIQUES **83**

VI - 1 : SUPPORT REGLABLE 83
VI - 2 : BATI DU MONTAGE PARALLELE 83

VII - CONCLUSION **84**

Chapitre III

DISPOSITIF EXPERIMENTAL

I - INTRODUCTION

Comme nous l'avons décrit précédemment, il existe de nombreuses techniques expérimentales capables de produire des bandes de cisaillement. Une des plus couramment utilisée est la méthode des barres de KOLSKY en torsion, dans laquelle une éprouvette de forme tubulaire à parois minces est soumise à un couple de torsion quasi instantané. Les vitesses de déformation alors atteintes permettent l'apparition de B.C.A.. Néanmoins, la présence de ces bandes ne peut être constatée le plus souvent qu'après une analyse post-mortem de l'éprouvette. Bien que l'étude des signaux des efforts enregistrés sur les barres montre à quel instant et sous quelles conditions de chargement la bande s'est formée, ils ne révèlent pas directement son comportement au sein de l'éprouvette et plus particulièrement sa vitesse de propagation.

Il peut donc être intéressant de filmer une telle expérience grâce à des caméras grande vitesse, à la manière de MARCHAND & DUFFY [7] ou de GIOVANOLA [12]. Néanmoins, avec une éprouvette de type tubulaire, qu'ils utilisent, il est difficile de déterminer l'endroit exact sur le diamètre où vont apparaître les B.C.A., et par conséquent de suivre leur développement et leur évolution au cours de l'essai. De plus, afin de couvrir entièrement le périmètre de l'éprouvette, il faudrait disposer des caméras en cercle tout autour de l'éprouvette. Par conséquent, l'expérience des barres de torsion se prête peu à cette étude.

Néanmoins, il existe d'autres techniques expérimentales pour créer des B.C.A. et notamment les tests par impact direct sur des éprouvettes parallélépipèdiques. Des essais de ce type ont été réalisés par KALTHOFF & al. [60] ou encore ZHOU & al. [14],

pour des analyses sur la rupture dynamique des matériaux. KALTHOFF & al. ont montré qu'en augmentant la vitesse d'impact jusqu'à un seuil critique, des B.C.A. apparaissaient sur l'éprouvette.

Or, l'adaptation d'un dispositif de visualisation à grande vitesse sur ce type d'expérience est plus aisée que sur des barres de torsion. En effet, le point d'initiation de la B.C.A. est facile à localiser, il correspond à la pointe de l'entaille pratiquée dans la plaque. De plus, la surface de l'éprouvette procure un champ d'observation plan.

Nous avons donc développé un banc d'essai inspiré de l'expérience KALTHOFF & al., pour créer des impacts à grande vitesse sur des plaques entaillées. Puis nous avons conçu un dispositif vidéo destiné à réaliser des prises de vues à grande vitesse afin de filmer l'initiation et la propagation de B.C.A. à travers une éprouvette.

Notre banc est basé sur le principe du canon à gaz où de l'air comprimé dans une chambre haute pression, sert à propulser un projectile dans un tube de lancement. La détente de l'air à l'intérieur de ce tube va permettre au projectile d'acquérir sa vitesse maximale avant l'impact sur l'éprouvette.

Parallèlement, un dispositif vidéo articulé autour de six caméras numériques permet d'enregistrer l'impact. Ces caméras synchronisées entre elles agissent comme des appareils photographiques, et ne prennent chacune qu'une seule image par essai. Au final, c'est une séquence de six images sur une durée minimale de 6 μsec qui est obtenue.

II - BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL - PARTIE MECANIQUE

II - 1 : PRINCIPE GENERAL DU FONCTIONNEMENT

Notre banc d'essai dynamique a été développé dans la perspective d'une double utilisation; pour générer des B.C.A. grâce à des impacts sur des plaques pré entaillées, mais aussi pour mener une étude sur le cisaillement adiabatique lors de l'usinage à très grande vitesse des aciers. La conception a donc été effectuée afin de satisfaire au mieux les exigences liées à ces deux types d'applications prévues, tout en conservant une configuration matérielle quasiment identique dans les deux cas.

Notre dispositif est ainsi composé principalement de trois parties :

* Le lanceur est le premier constituant de l'ensemble. Il sert à stocker l'énergie nécessaire à propulser le projectile à la vitesse désirée grâce à de l'air comprimé dans une chambre haute pression.

* La seconde partie de l'installation est composée par le tube de lancement qui permet au projectile d'accélérer et d'atteindre sa vitesse optimale. L'originalité de ce tube réside dans son rail de guidage aménagé sur toute sa longueur. Le principal avantage qu'il procure est que le projectile est ainsi maintenu dans une position bien définie durant sa phase d'accélération. Toute rotation est éliminée et il peut donc entrer en contact avec l'éprouvette suivant une position très précise.

* Un second tube, coaxial au premier, appelé tube de mesure, ou tube d'HOPKINSON constitue la troisième partie du dispositif. Il a deux fonctions principales qui sont le maintien de l'éprouvette en position au moyen d'un support spécifique, et la mesure des efforts appliqués sur cette éprouvette lors de l'impact. Cette dernière opération est réalisée avec des jauges d'extensomètrie montées en pont complet sur la circonférence extérieure du tube.

Le lanceur déjà conçu au sein du laboratoire de Metz (L.P.M.M.) par KLEPACZKO [22] pour ses expérimentations dynamiques ne fait l'objet que de légères modifications. Notre travail dans un premier temps a été basé sur la conception et les mises au point du tube de lancement, des différents projectiles et des supports d'éprouvettes fixés sur le tube d'HOPKINSON. Par la suite notre attention s'est portée sur l'étalonnage des divers éléments électroniques nécessaires à la mesure des vitesses du projectile et des efforts appliqués sur le tube. Une représentation générale du dispositif est illustrée par la figure **III-1**.

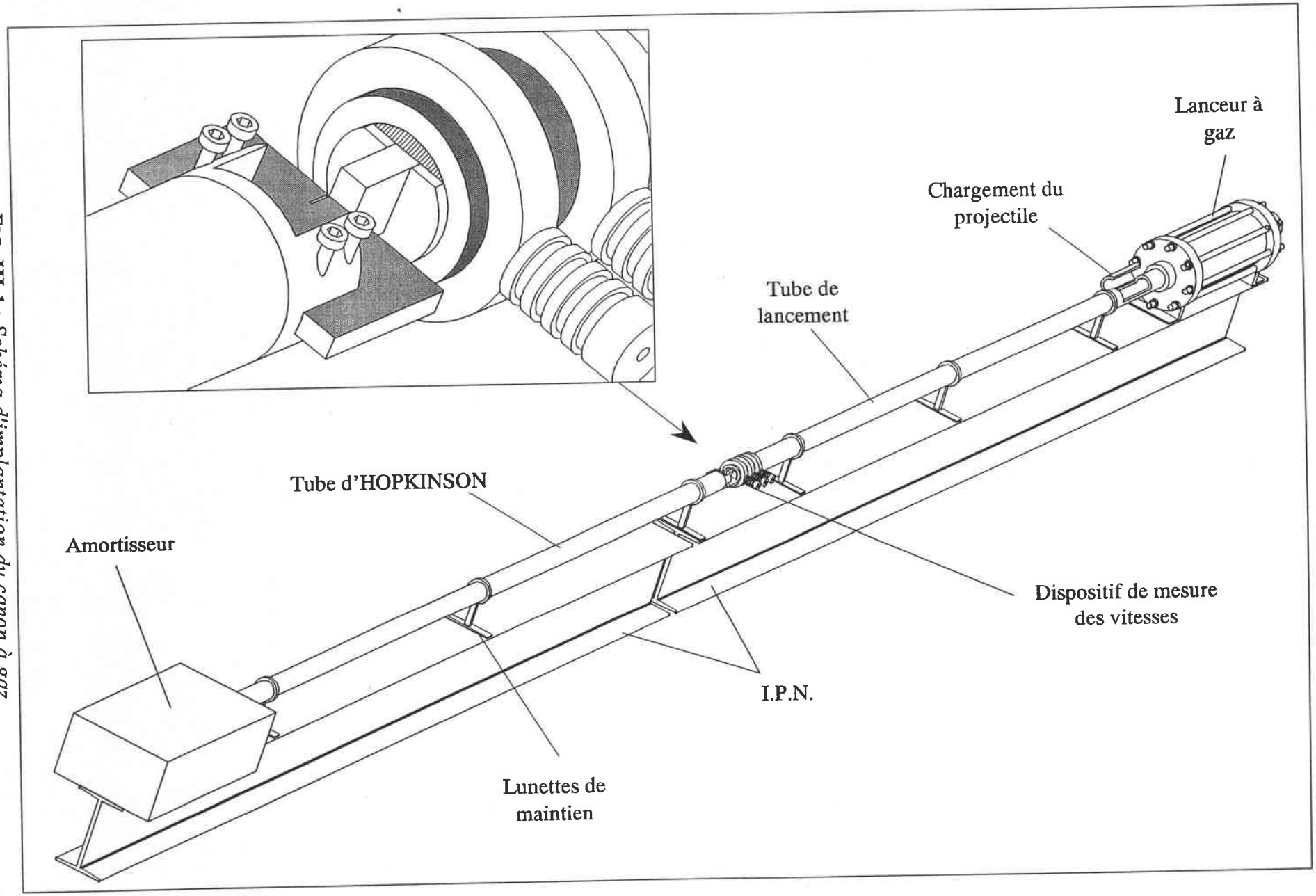


FIG. III-1 : *Schéma d'implantation du canon à gaz.*

II - 2 : LANCEUR A GAZ

Le type de lanceur à air comprimé que nous utilisons est conçu pour une pression de service de 10 bars. C'est donc cette pression qui va définir la vitesse maximale du projectile dans le tube. Il a été conçu de manière à ce que l'air sous pression soit libéré le plus rapidement possible vers le tube de lancement afin de communiquer le maximum d'énergie cinétique au projectile. Il est composé de trois chambres bien distinctes et est illustré à la figure **III-2**.

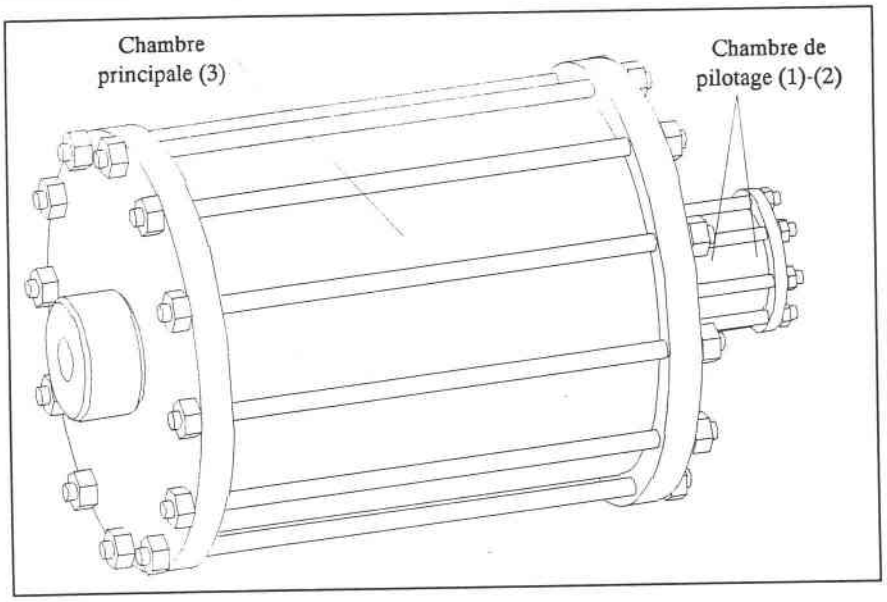


FIG. III-2 : *Lanceur à gaz.*

La chambre principale (3), la plus volumineuse, sert à emmagasiner l'air sous pression. Les chambres (1) et (2) sont des chambres de commande qui permettent le pilotage de l'ouverture et de la fermeture de la chambre (3) par un vérin différentiel.

La vitesse du projectile est fonction de la pression de service comprise entre 1 et 10 bars. Quelques calculs préliminaires nous ont permis de calibrer notre canon avant sa mise en service. Les vitesses sont déterminées à l'aide du théorème de l'énergie cinétique appliquée au projectile qui se traduit par la relation suivante :

$$\Delta K = W_{int.} + W_{ext.} \qquad \text{avec} \quad \begin{cases} \Delta U = \frac{1}{2} Mu^2 \\ W_{int.} = 0 \\ W_{ext.} = W_{(S \to Proj.)} \end{cases} \tag{32}$$

Or le travail des efforts extérieurs s'exprime par :

$$W_{ext.} = -pdV \quad \Rightarrow \quad \delta W_{(Proj. \to S)} = -pdV \quad \Rightarrow \quad W_{(Proj. \to S)} = -\int_{V_i}^{V_f} pdV \tag{33}$$

Ce qui nous conduit à la relation :

$$\frac{1}{2} Mu^2 = \int_{V_i}^{V_f} p dV \qquad \text{avec} \begin{cases} V_f = V_{canon} + V_{tube} = V_o + V_t \\ V_i = V_{canon} = V_0 \end{cases} \tag{34}$$

Nous supposons que la détente dans le canon et le tube de lancement est adiabatique réversible, soit :

$$pV^{\Gamma} = C^{te} \tag{35}$$

Finalement, la vitesse du projectile s'exprime en fonction de la pression par la l'expression suivante :

$$u = \sqrt{\frac{2pV_0^{\Gamma}}{M(1-\Gamma)}\left[\left(V_0 + V_t\right)^{1-\Gamma} - V_0^{1-\Gamma}\right]} \tag{36}$$

Nous verrons dans un paragraphe suivant que le diamètre du tube de lancement est fixé à 50 mm et sa longueur à 3 mètres. Nous ne tenons pas compte ici du frottement entre le projectile et le tube ainsi que des différentes pertes de charges qui sont négligées. Par conséquent, les vitesses atteintes réellement seront légèrement inférieures à celles prédites par ce calcul. Cependant cette petite étude préliminaire permet de visualiser les performances du lanceur avant sa conception finale. Elle nous montre que des vitesses voisines de 100 m/s peuvent être facilement atteintes avec des projectiles de masses de 400 à 700 grammes. L'évolution des vitesses en fonction du poids du projectile et de la pression utilisée est représentée à la figure **III-3**.

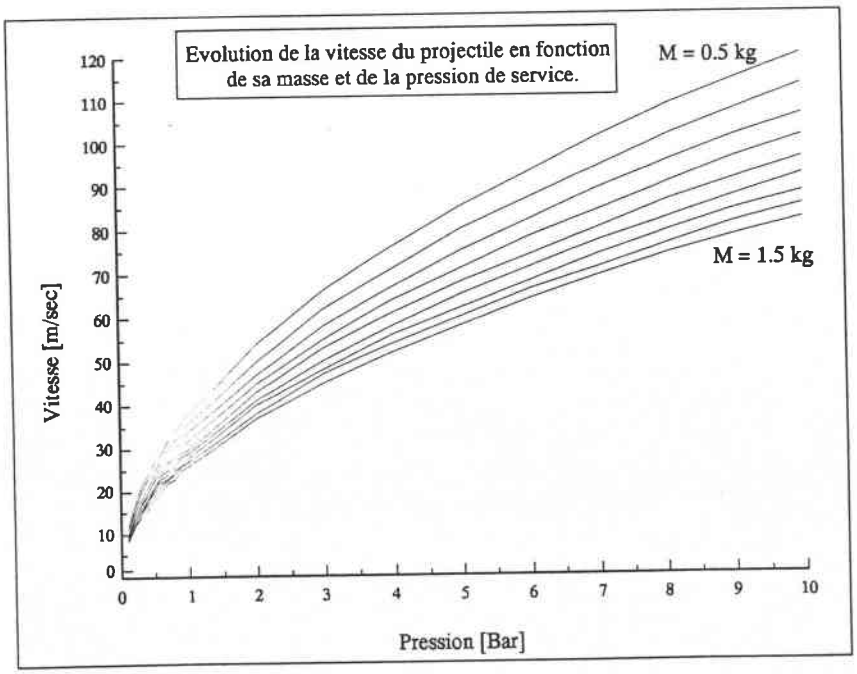


FIG. III-3 : *Courbes d'évolution des vitesses du projectile.*

II - 3 : TUBE DE LANCEMENT

C'est dans ce tube que l'air comprimé stocké dans le lanceur va se détendre et propulser le projectile à la vitesse voulue. Une longueur de 3 mètres nous a semblé suffisante pour réaliser cette fonction. D'autant plus qu'au delà de cette dimension il devient difficile de se procurer des tubes avec des tolérances intérieures faibles et un bon état de surface, nécessaires au bon guidage du projectile. Toutefois les tubes de vérins hydrauliques répondent parfaitement à ces exigences. C'est donc un de ceux-ci qui est utilisé comme tube de lancement.

Pour de nombreux canons existants, le tube admet un projectile cylindrique qui peut tourner autour de son axe. Dans notre cas ceci n'est plus acceptable. En effet, que ce soit dans le cas de l'impact ou de l'usinage rapide, notre projectile doit se présenter dans une position très rigoureuse à la sortie du tube de lancement. Cette condition est indispensable pour reproduire d'un tir à l'autre des profondeurs de passe sur les éprouvettes d'usinage, ou pour respecter la perpendicularité de la face du projectile par rapport à l'éprouvette lors des impacts. Il ne doit par conséquent n'admettre aucune rotation.

La solution retenue pour permettre le guidage du projectile en translation a été d'usiner un méplat sur toute sa longueur, et de fixer un rail à l'intérieur du tube sur lequel il vient glisser. Ce système est illustré par la figure **III-4**.

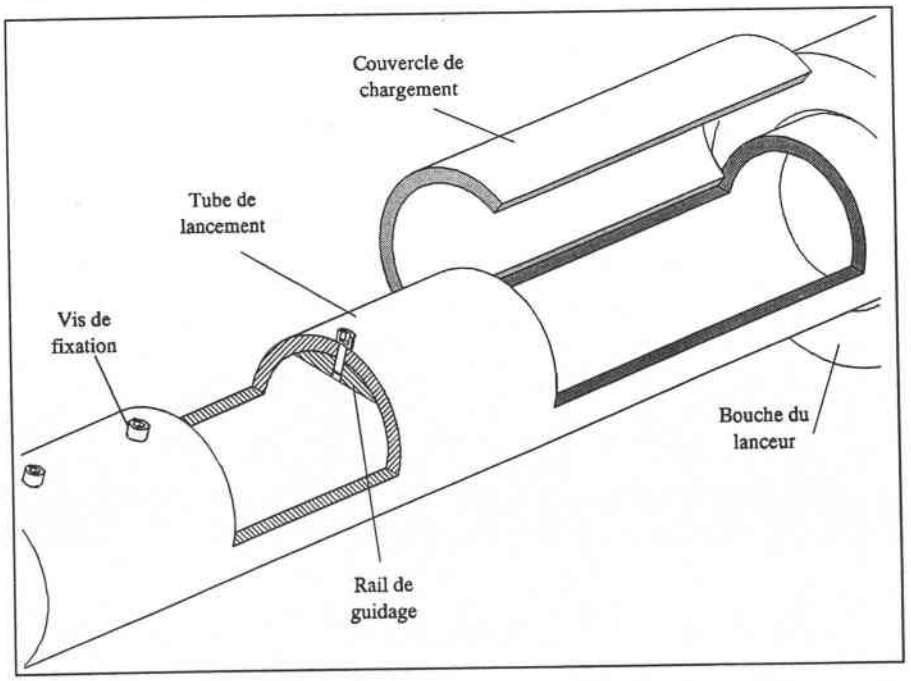


FIG. III-4 : *Tube de lancement.*

La solution adoptée consiste à réaliser trois rails de 1 mètre chacun et de les fixer au tube au moyen de vis avec lesquelles il est possible de régler le jeu de fonctionnement. De cette manière est réalisé un rail de 3 mètres qui admet avec le projectile un jeu maximum de 3 ou 4 centièmes de millimètre sur la longueur du tube. Un réglage plus précis sur les dernières vis permet de réduire le jeu de 1/100ème mm à la sortie du tube de lancement.

Les caractéristiques finales du tube sont donc (en mm) :

Longueur : 3 000 ; Hauteur du rail : 7

Diamètre intérieur : 50 H 7 ; Diamètre extérieur : 60

II - 4 : TUBE D'HOPKINSON

II - 4.1 : PREMIERE FONCTION : MESURE DES EFFORTS

Ce tube illustré à la figure **III-6** permet d'effectuer les mesures des efforts auxquels sont soumis les éprouvettes. Le choix d'un tube plutôt que d'une barre, similaire aux barres d'HOPKINSON en compression, nous est imposé par l'expérience d'usinage rapide, car le projectile doit pouvoir s'y glisser pour être acheminé vers un amortisseur. Les déformations, induites par les ondes élastiques, générées par les efforts d'usinage ou d'impact sont mesurées par des jauges d'extensomètrie. La section du tube ne doit donc pas être trop importante afin d'obtenir des déformations quantifiables. Un positionnement précis du projectile n'étant plus utile à ce niveau, le tube d'HOPKINSON est dépourvu d'un rail de guidage et n'est pas tolérancé.

La longueur du tube est déterminée en fonction des fronts d'onde créés lors des expériences. Dans le cas d'un impact, une onde incidente de compression est générée dans l'éprouvette, puis est transmise au tube en acier et s'y propage à la vitesse C_o. Ce phénomène est illustré à la figure **III-5**.

Cette onde de déformation du tube est captée par les jauges d'extensomètrie placées en A et B. Arrivée à l'extrémité du tube cette onde est réfléchie comme une onde de tension, et se dirige de nouveau vers les ponts de jauges. Nous voyons donc que le tube doit être assez long afin que la mesure du signal de déformation dû à l'onde incidente

soit terminée avant l'arrivée de l'onde réfléchie pour éviter toute interférence par superposition des signaux. Nous avons donc choisi un tube d'une longueur de 4 mètres, de diamètre intérieur : 52 mm et de diamètre extérieur 70 en mm.

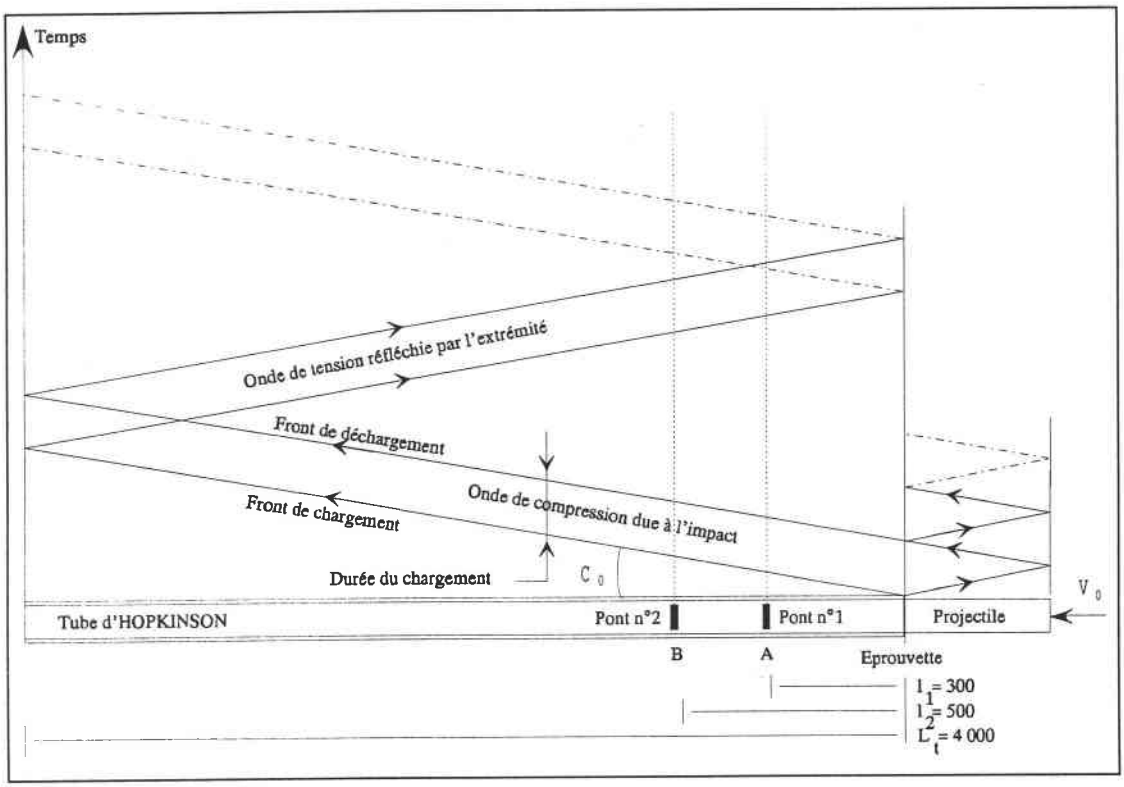


FIG. III-5 : *Fronts d'onde dans le tube d'HOPKINSON.*

Les deux ponts de jauges sont collés respectivement à l_1 = 300 mm et l_2 = 500 mm de l'entrée du tube. La durée maximum d'usinage ou d'impact peut donc être déterminée par la relation suivante :

$$t_{max} = \frac{2\,L_t}{C_0} \qquad \text{soit : } t_{max} = 1{,}4 \text{ msec} \qquad (37)$$

avec $\begin{cases} L_t : \text{longueur du tube (4m)} \\ C_0 : \text{vitesse des ondes de compression dans l'acier } (\sim 5 \text{ mm}/\mu\text{sec}) \end{cases}$

II - 4.2 : Seconde Fonction : Supports des Eprouvettes

La seconde fonction de ce tube est de maintenir en position les éprouvettes dans les cas des impacts, ou les outils carbure dans le cas de l'usinage. Comme ce banc d'essai est bivalent, il est nécessaire de pouvoir passer d'une configuration à l'autre

rapidement avec un minimum de manipulation. C'est la raison pour laquelle les éprouvettes ou les outils de coupe sont maintenus par des têtes supports qui sont simplement vissées à l'entrée du tube. Leur interchangeabilité est ainsi rapide et aisée.

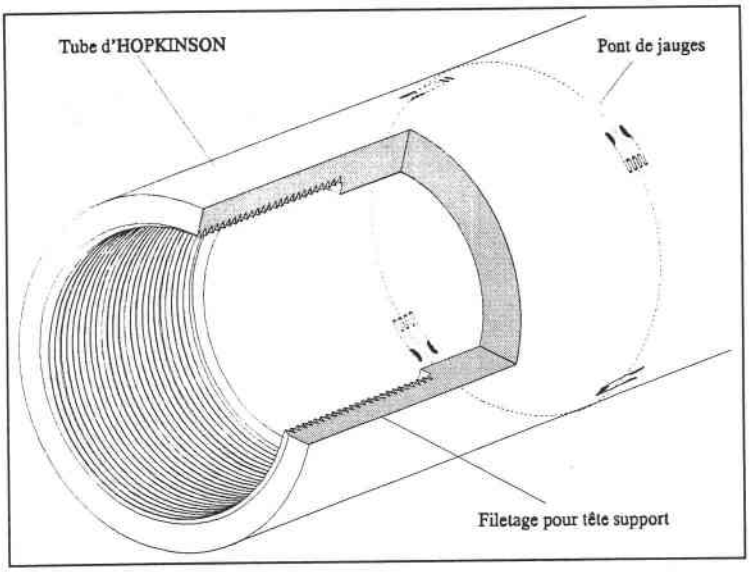


FIG. III-6 : *Tube d'HOPKINSON. (Partie filetée)*

II - 5 : TETE-SUPPORT DE L'EPROUVETTE

L'éprouvette doit être maintenue fermement lors de l'impact. Toutefois, nous ne pouvons concevoir qu'une liaison par adhérence avec la tête. Il est en effet impossible d'usiner l'éprouvette avec divers perçages ou taraudages pour faciliter son maintien. Leur présence entraînerait des réflexions indésirables de l'onde d'impact qui parasiteraient le signal obtenu. La tête illustrée à la figure **III-7** comporte donc un plan situé dans sa partie inférieure et sur lequel va reposer l'éprouvette en position horizontale. La liaison s'effectue au moyen de patins de friction actionnés par des vis et qui serrent l'éprouvette sur ce plan.

Lorsqu'une pièce de fixation, comme notre tête, est rapportée sur un tube ou une barre de mesure, il est nécessaire d'ajuster autant que possible son impédance mécanique à celle du tube ou de la barre, afin de réduire au minimum les réflexions des ondes à leur interface.

En d'autres termes , il est souhaitable de vérifier au mieux l'équation suivante :

$$J_{tube}(\rho C_0)_{tube} = J_{support}(\rho C_0)_{support} \tag{38}$$

où J : Moment quadratique polaire (mm^4) , ρ : Masse volumique (kg/m^3) ,

C_0 : Célérité des ondes de compression (m/s).

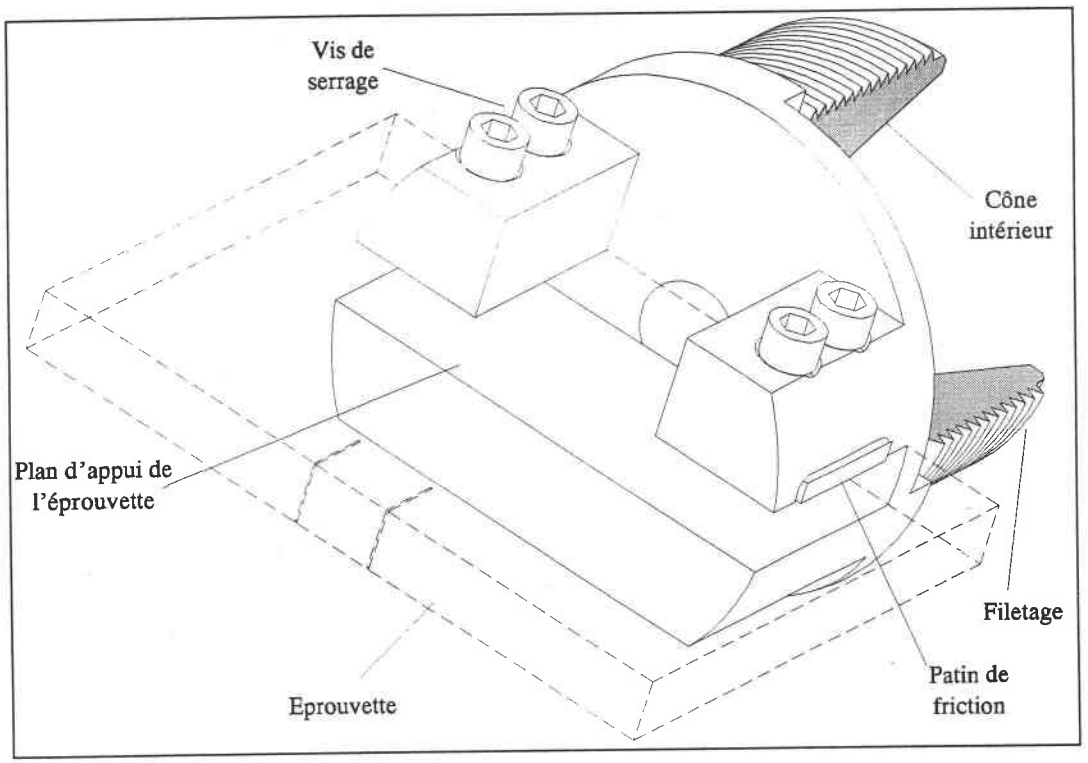


FIG. III-7 : *Tête d'impact - (Filetage en coupe).*

Cependant étant données les contraintes de conception imposées par la fixation de l'éprouvette et la capacité de la tête à supporter les chocs, nous nous contenterons de lui donner une forme et des dimensions les plus proches possibles de celles du tube.

La surface arrière de l'éprouvette repose sur un plan perpendiculaire au plan d'appui inférieur. Le diamètre intérieur de la partie filetée est de forme conique de manière à rattraper progressivement le diamètre intérieur du tube. La tête est réalisée en acier 42-CD-4, qui permet des traitements thermiques à coeur de pièces massives, tout en obtenant des limites à rupture élevées d'environ 130-140 daN/mm^2, et une bonne résistance aux chocs.

II - 6 : EPROUVETTE

L'éprouvette a une forme parallélépipédique. Il est en effet souhaitable qu'elle ait une géométrie assez simple pour que le signal émis lors de l'impact ne soit pas trop perturbé par des réflexions d'ondes à l'intérieur de l'échantillon. Pour faciliter l'apparition de B.C.A. en un point précis, deux entailles parallèles de 3/10ème mm de largeur ont été réalisées par électroérosion sur la face d'impact. L'espacement entre ces entailles (12 mm) est égal à la largeur du projectile d'impact. Leur rôle est de provoquer des concentrations de contraintes en fond d'entaille qui sera alors le point d'initiation des B.C.A.. La figure **III-8** représente un schéma de l'éprouvette avec ses caractéristiques dimensionnelles.

Les éprouvettes sont fraisées dans des barres laminées d'acier 40-NCD-16. L'usinage est effectué de façon à ce que l'impact se produise dans le sens de laminage. L'opération suivante consiste à effectuer un traitement thermique qui va porter leur dureté à environ 53-54 HRC. Elles sont ensuite rectifiées ensemble pour obtenir une série d'éprouvettes d'une épaisseur constante. L'électroérosion des entailles est l'étape finale.

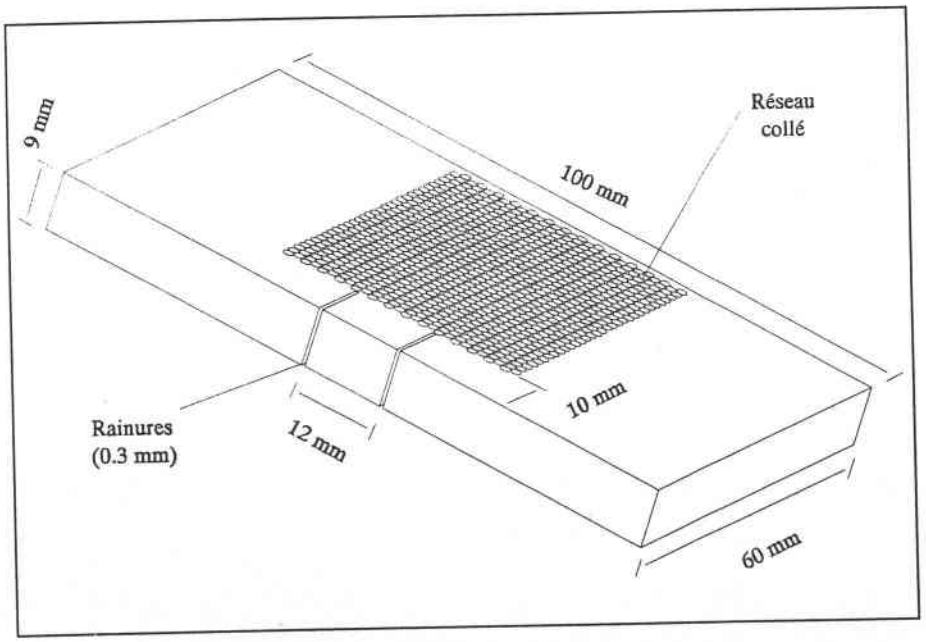


FIG. III-8 : *Schéma et caractéristiques de l'éprouvette d'impact.*

Un réseau composé de cercles est déposé sur l'éprouvette pour visualiser sa déformation et éventuellement la propagation des B.C.A. durant l'essai. La déformation de ces cercles pendant l'impact permettra grâce aux caméras de suivre

l'évolution de la déformation de l'éprouvette dans le temps. L'impression de ce réseau s'effectue par insolation aux rayons ultraviolets des éprouvettes enduites d'une résine photosensible et sur lesquelles est déposé un négatif du réseau à obtenir. Après une exposition de quelques secondes aux rayons, la résine réagit à un colorant spécial. Un bain de l'éprouvette dans ce colorant fait apparaître le réseau.

II - 7 : PROJECTILE D'IMPACT

Le projectile illustré par la figure **III-9** doit répondre à certaines conditions. Il faut qu'il soit résistant pour pouvoir supporter la répétition des chocs contre l'éprouvette. Son poids ne doit pas être trop important pour que le canon puisse le propulser jusqu'à des vitesses proches de 100 m/s. Sa forme doit être la plus simple possible afin de limiter les réflexions d'ondes et les perturbations du signal. Il est donc constitué de deux parties distinctes comprenant une barre d'impact qui vient frapper l'éprouvette et deux patins, liés à la barre, servant au guidage dans le tube de lancement.

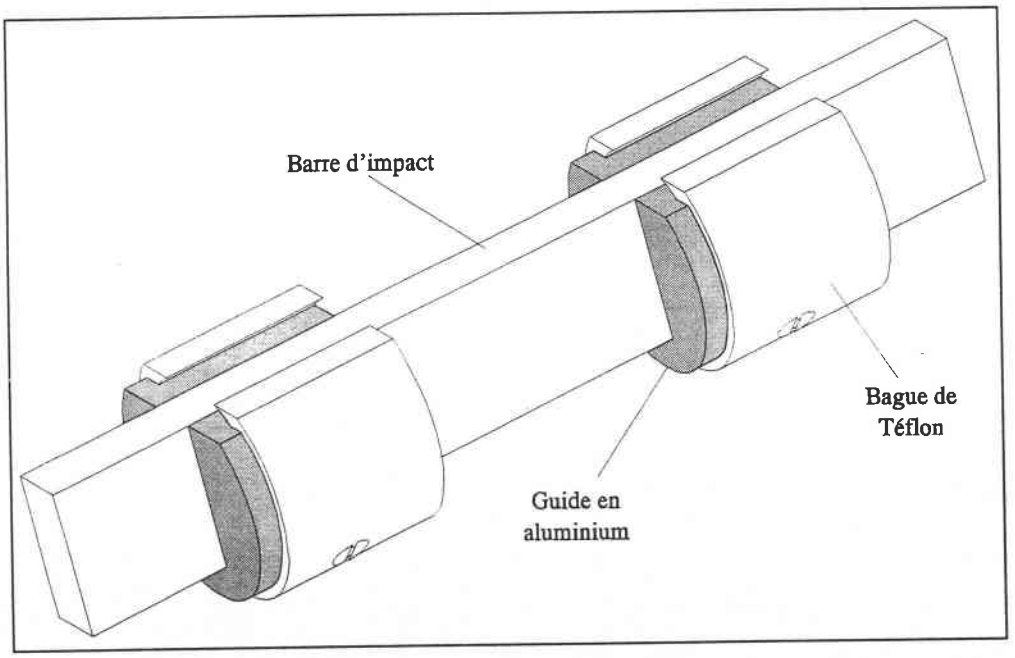


FIG. III-9 : *Projectile d'impact.*

La matière choisie pour réaliser la barre est de l'acier fortement allié Z-160-CDV-12, traité à 58 HRC. C'est un acier couramment utilisé dans la fabrication des outils de

poinçonnage et de matriçage. Il a l'avantage de posséder une haute limite élastique, une bonne résistance aux chocs pour une dureté élevée.

Les patins de guidage sont réalisés en aluminium et sont enrobés d'une fine couche de Téflon. Cette matière est ici utilisée pour ses qualités lubrifiantes et son faible coefficient d'adhérence, permettant ainsi de réduire les frottements à l'intérieur du tube. La partie massive des patins est quant à elle en aluminium, plus résistant aux chocs que le Téflon.

III - BANC D'ESSAI EXPERIMENTAL - PARTIE ELECTRONIQUE

III - 1 : MESURE DE LA VITESSE DU PROJECTILE

Il est nécessaire, lors d'un test de connaître la vitesse du projectile au moment de l'usinage ou de l'impact. Cette donnée est très importante pour le dépouillement des résultats. Elle permet aussi lors des essais préliminaires du canon, de calibrer le lanceur et de déterminer précisément la courbe pression-vitesse.

Cette vitesse est mesurée au moyen de faisceaux lumineux qui traversent le tube de lancement. Le schéma de principe est montré à la figure **III-10.**

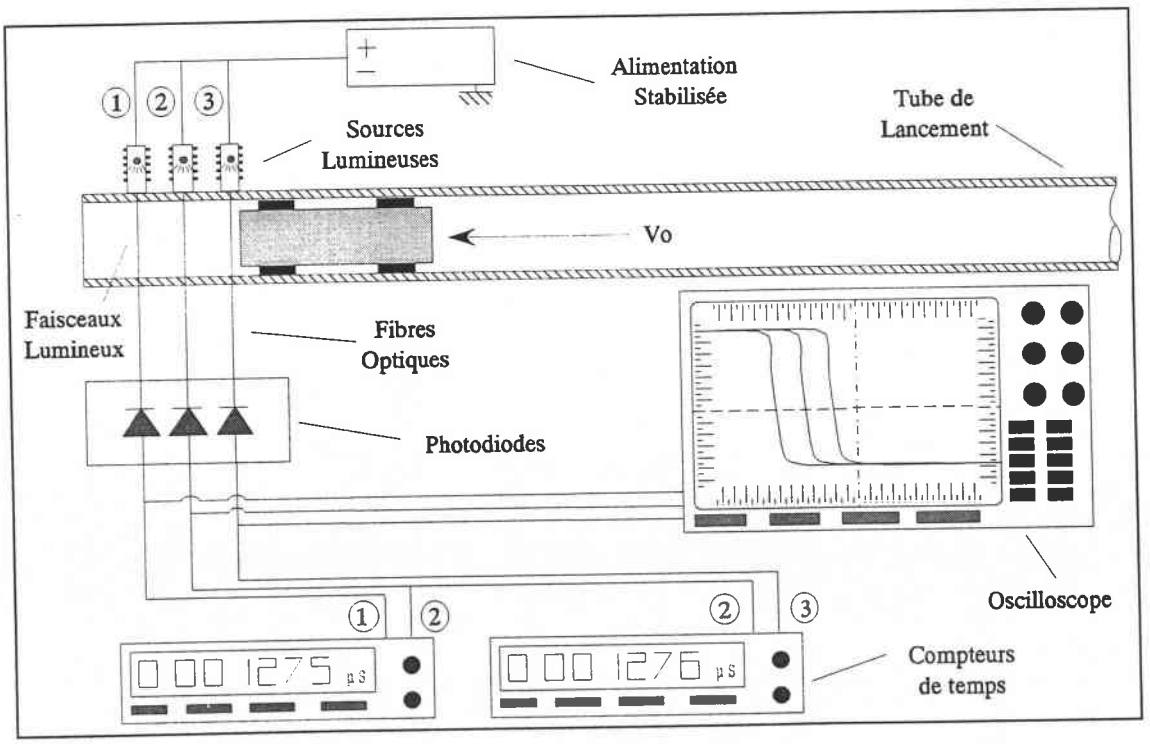


FIG. III-10 : *Principe de la mesure des vitesses.*

Des perçages équidistants de 50 mm, placés à la sortie du tube permettent le passage de 3 faisceaux lumineux émis par des ampoules halogènes. En vis-à-vis de ces ampoules, des fibres optiques captent les faisceaux et convoient leur lumière jusqu'à des photodiodes. Ces dernières ainsi éclairées débitent une tension de quelques millivolts. Ce signal électrique est ensuite transmis à deux compteurs de temps.

Au passage du projectile, les faisceaux lumineux sont coupés. Les photodiodes ne sont donc plus éclairées et leur tension de sortie chute jusqu'à une valeur proche de 0 mV. Cette chute ou ce front descendant, est alors captée par les compteurs de temps qui se déclenchent au franchissement d'un seuil de tension prédéterminé. Leur rôle est de mesurer l'écart de temps entre la coupure de deux faisceaux successifs. La distance qui les séparent étant connue (50 mm), la vitesse du projectile se détermine facilement. La figure **III-11** montre un signal de sortie d'une photodiode à la coupure d'un faisceau lumineux.

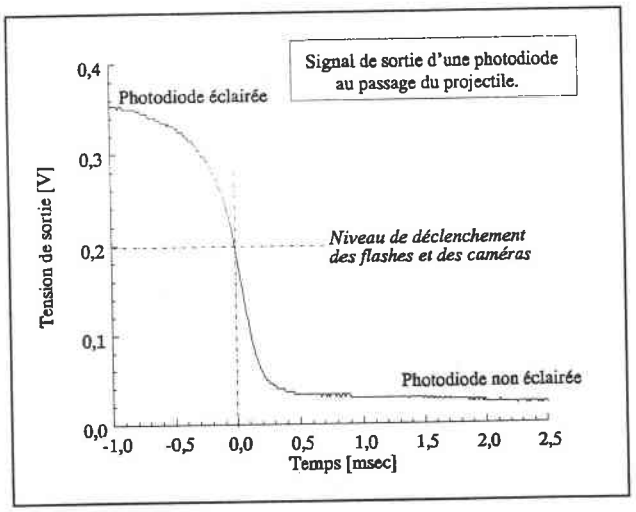


FIG. III-11 : *Signal d'une photodiode à la coupure.*

III - 2 : MESURE DES DEFORMATIONS DU TUBE

Sous l'effet des efforts dus aux impacts ou à l'usinage, le tube est soumis à une onde de compression. Nous pouvons de ce fait assimiler notre cas de déformation à celui d'une colonne creuse en compression. Les déformations du tube d'HOPKINSON sont mesurées par des jauges d'extensomètrie disposées en deux endroits différents, montées en pont complet. Un tel type de pont nécessite quatre jauges de déformation.

Ces jauges sont collées sur le diamètre extérieur du tube d'HOPKINSON suivant une configuration spécifique schématisée par la figure **III-12**(a) et reliées entre elles suivant le circuit électrique représenté à la figure **III-12**(b) appelé pont de WHEASTONE.

Un tel circuit possède une propriété remarquable. En effet si nous alimentons le pont avec une tension E_0, pour un circuit constitué de quatre résistances égales, nous aurons une tension nulle entre B et D pour raison de symétrie. Le pont est dit en équilibre. La variation de l'une des résistances fait apparaître une tension entre B et D mesurable. Dans notre application, les jauges collées subiront les déformations du tube et verront alors leurs résistances varier. Pour de très faibles variations de résistance, ce qui est notre cas, la tension de sortie du pont est quasiment proportionnelle aux variations relatives de résistance de chacune des jauges $\Delta R/R$ et équivaut à :

$$e = \frac{E_0}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right) \tag{39}$$

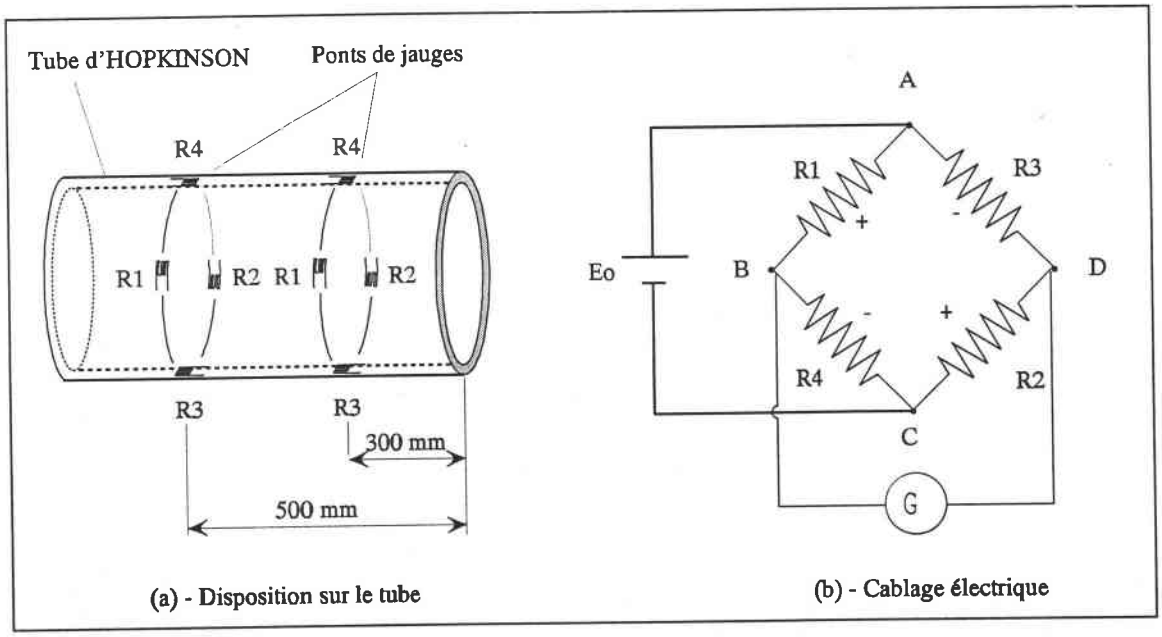


FIG. III-12 : *Disposition des jauges sur le tube d'HOPKINSON.*

Les signes (+) et (-) de cette équation caractérisent la propriété fondamentale des ponts, à savoir que deux résistances adjacentes agissent en sens inverse cependant que deux résistances opposées agissent dans le même sens.

Sachant que la variation relative de la résistance d'une jauge $\Delta R/R$ est égale au produit du facteur de jauge K et de la déformation ε générant cette variation de

résistance soit $\Delta R/R = K\,\varepsilon$, la sortie d'un pont à une seule jauge active s'exprime par la relation :

$$\frac{e}{E_0} = \frac{K\varepsilon}{4} \tag{40}$$

Par rapport à un pont équipé d'une seule jauge active, l'utilisation de quatre jauges branchées suivant la figure **III-12**(b) amplifie le signal de sortie du pont. Les jauges étant combinées deux à deux, les jauges R_1 et R_2 disposées longitudinalement et les jauges R_3 et R_4 transversalement, tout en étant placées sur des branches opposées du pont, leurs effets s'additionnent en vertu de la loi des signes. Ces jauges sont collées sur un tube, nous pouvons alors négliger l'influence du coefficient de POISSON mesuré par les jauges transversales. La tension de sortie d'un tel pont à quatre jauges actives s'exprime alors par la relation :

$$\frac{e}{E_0} = \frac{K\varepsilon}{2} \tag{41}$$

De plus cette configuration possède l'avantage d'éliminer la composante superposée d'une flexion du tube.

III - 3 : ETALONNAGE DU TUBE DE MESURE

Le pont d'extensomètrie collé sur le tube délivre une tension qui est fonction des déformations du tube, induites par les efforts d'impact ou d'usinage. Pour connaître la relation entre le signal de sortie du pont et les efforts appliqués sur les éprouvettes, il est nécessaire de procéder à un calibrage du tube. La démarche consiste à soumettre le tube de mesure à des efforts connus et à enregistrer les signaux fournis par les ponts de jauges. Des impacts à faibles vitesses sont donc réalisés avec le projectile contre une plaque fixée à l'entrée du tube d'HOPKINSON à la place de la tête support. La contrainte est ainsi répartie le plus uniformément possible sur la section.

Le principe de la méthode est déduit de la relation qui fournit la valeur de la contrainte produite dans un corps élastique soumis à une vitesse d'impact V_0.

YOUNG en 1807 établit la proportionnalité entre la déformation élastique ε et la vitesse d'impact V_0 :

$$V_0 = C_0\,\varepsilon \tag{42}$$

avec C_0 : célérité des ondes élastiques de compression.

La contrainte dans la barre est donnée par la loi de HOOKE : $\sigma = E\,\varepsilon$ (43)

Soit en combinant (42) et (43) :

$$\sigma = E\,\frac{V_1}{C_0} \tag{44}$$

Or comme nous l'avons décrit dans le chapitre I, la vitesse de propagation des ondes élastiques dans un corps est fonction de son module d'YOUNG E et de sa masse volumique ρ. Elle est donnée par la relation suivante :

$$C_0 = \sqrt{E/\rho} \qquad \text{soit :} \quad E = C_0^2\,\rho \tag{45}$$

En substituant cette expression de E dans l'équation (44), nous arrivons finalement à l'expression qui lie la contrainte σ à la vitesse d'impact V_0 :

$$\sigma = \rho\,C_0\,V_0 \tag{46}$$

Des calculs plus détaillés sur l'établissement de cette formule sont fournis par VON KARMAN & DUVEZ [65].

Cependant lors d'un impact, pour un projectile d'une section différente d'une barre, la valeur de la vitesse initiale V_0 doit être corrigée, pondérée par un certain facteur. Dans notre application, le projectile est considéré comme un cylindre plein de diamètre de 50 mm. La barre de mesure est quant à elle un tube de diamètre intérieur 54 mm et extérieur 70 mm. La vitesse d'impact à prendre en compte n'est donc pas V_0 mais une nouvelle quantité V_0' exprimée par :

$$V_0' = \frac{1}{1 + \frac{S_t}{S_p}} \qquad \text{avec} \quad \begin{cases} S_t = \text{ Section du tube} \\ S_p = \text{ Section du projectile} \end{cases} \tag{47}$$

Plusieurs impacts ont ainsi été réalisés sur le tube entre 1 m/s et 5 m/s. Les efforts appliqués ont ensuite été reliés aux tensions de sortie des ponts d'extensomètrie.

IV - DISPOSITIF VIDEO CCD RAPIDE

Les observations de phénomènes physiques de courte durée, tels que les explosions, les impacts, ou encore les ondes de chocs, ne sont possibles très souvent qu'avec l'utilisation de caméras photographiques extrêmement rapides. Aujourd'hui, de nombreuses techniques photographiques à grande vitesse ont été développées. Elles sont très diverses, dépendantes des différents principes de conception comme : les caméras à tambour à film mobile, les caméras à tambour à film fixe et miroirs tournants ou encore les caméras mono-coup [66]-*1952-*, [67]-*1954-*. Récemment, les caméras électroniques CCD ont commencé à remplacer les caméras à film, en raison de leur relative facilité d'utilisation et de la possibilité d'appliquer l'analyse numérique instantanément sur les images obtenues.

Certaines de ces caméras électroniques ont été présentées en [68]-*1988-*, [69]-*1990-*. Ces types d'appareils sont produits par de nombreuses sociétés telles que HADLAND PHOTONICS (Imacon Cameras), CORDIN (Intensified Gated Cameras) etc... Ces caméras ne possèdent pas une résolution très élevée puisque leur champ d'observation est divisé en de 4 à 24 images. Citons comme exemples les caméras ULTRANAC FS501, IMACON 790, IMACON 468.

Une autre approche de la photographie à grande vitesse est représentée par les caméras CRANTZ - SCHARDING. Récemment, une caméra électronique grande vitesse à images multiples a été développée sur la base du principe CRANTZ - SCHARDING [24]. Ce principe diffère des autres cités précédemment puisque pour chaque image une seule caméra CCD est utilisée. Une telle technique, une caméra - une image, est relativement onéreuse et le nombre d'images qui peuvent être prises est limité, jusqu'à huit. Les principaux avantages d'une telle configuration sont d'une part la résolution assez élevée, généralement 512(H) x 512(V) pixels ou plus par image, ou encore la possibilité de visualiser immédiatement ces images sur un moniteur vidéo.

Une conception similaire de l'enregistrement numérique à grande vitesse, en lumière réfléchie, basée sur un schéma multi-caméras CCD a été appliquée sur notre dispositif d'essai dynamique. Cette technique permet l'observation directe de tous les événements associés à la fracture par impact, aux instabilités dynamiques, à la

fragmentation, à l'usinage très grande vitesse et tous les autres processus rapides en mécanique des solides. L'image obtenue sous un format numérique 800(H) x 590(V) pixels peut est stockée sous un P.C. et peut être utilisée ultérieurement pour une analyse numérique plus avancée.

IV - 1 : PRINCIPE GENERAL DU FONCTIONNEMENT

Lors d'études expérimentales, il peut être très profitable de filmer et d'enregistrer les différents phénomènes qui peuvent apparaître au cours des essais mécaniques. Si pour des expérimentations en quasi-statique, où les vitesses de déformation sont relativement faibles, l'opération est assez facile à réaliser, (avec des caméras CCD ou à film standards par exemple), il en est tout autrement lorsque les vitesses de déformation atteintes sont beaucoup plus élevées, comme dans le cas d'une rupture sous impact ou d'une fragmentation. En effet, les phénomènes qui apparaissent alors s'accomplissent dans un intervalle de temps extrêmement court, à l'échelle de la micro seconde. Il devient par conséquent impossible d'utiliser du matériel vidéo classique.

Au L.P.M.M., il a été développé plusieurs bancs d'essais expérimentaux mettant en oeuvre des phénomènes dynamiques, dans lesquels une caméra rapide est indispensable. Il s'agit :

* du Double Cisaillement conçu par KLEPACZKO [22];
* des Barres de Torsion d'HOPKINSON conçues par KLEPACZKO [70]-*1991*-;
* de l'Usinage Très Grande Vitesse de l'équipe de MOLINARI conçu par SUTTER & FAURE [71]-*1996*-;
* de la Propagation de Bandes de Cisaillement Adiabatique conçue par FAURE et SUTTER.

Il nous a donc semblé judicieux de les équiper d'un dispositif de prises de vues permettant de filmer les tests effectués pour ensuite analyser les images obtenues. Nous avons donc conçu un système s'articulant autour de six caméras numériques rapides à cellule CCD-TV.

Le principe de fonctionnement du dispositif est schématisé à la figure **III-13**. Les six caméras CCD sont déclenchées et synchronisées entre elles au moyen d'un ensemble de cartes électroniques que nous appellerons par commodité synchroniseur. Lors d'un essai, elles sont utilisées en mode mono-coup et fonctionnent alors comme des appareils photographiques en ne prenant qu'une seule image chacune.

Deux flashes à haute puissance sont utilisés pour éclairer les objets à filmer. Ils sont activés par une carte électronique qui détecte la variation du signal de sortie d'une photodiode du système de mesure des vitesses. A la coupure d'un faisceau lumineux par le projectile, elle génère une impulsion chargée de déclencher les flashes. Le principe de fonctionnement du synchroniseur est analogue. Il utilise une seconde photodiode placée au devant de l'éprouvette d'impact ou des plaquettes d'usinage.

L'utilisation de caméras de ce type est très avantageuse par rapport à ce que nous pourrions obtenir avec des caméras à film. En effet leur cellule CCD-TV permet d'acquérir une image numérisée avec une résolution de 800(H) x 590(V) pixels. Cette image est ensuite stockée dans la mémoire numérique contenue dans leur unité de commande individuelle. Cette unité regroupe également toutes les fonctions de réglages de temps d'ouverture et de mode de déclenchement.

Après la fin de l'essai, l'image est immédiatement récupérée sous un P.C. grâce au logiciel d'acquisition "FREEZE 1.0" et à un démultiplexeur qui permet d'accéder à toutes les mémoires numériques à partir de ce logiciel. Par la suite, elles peuvent être analysées (mesure des déformations, zooms...) avec des logiciels de traitements d'images.

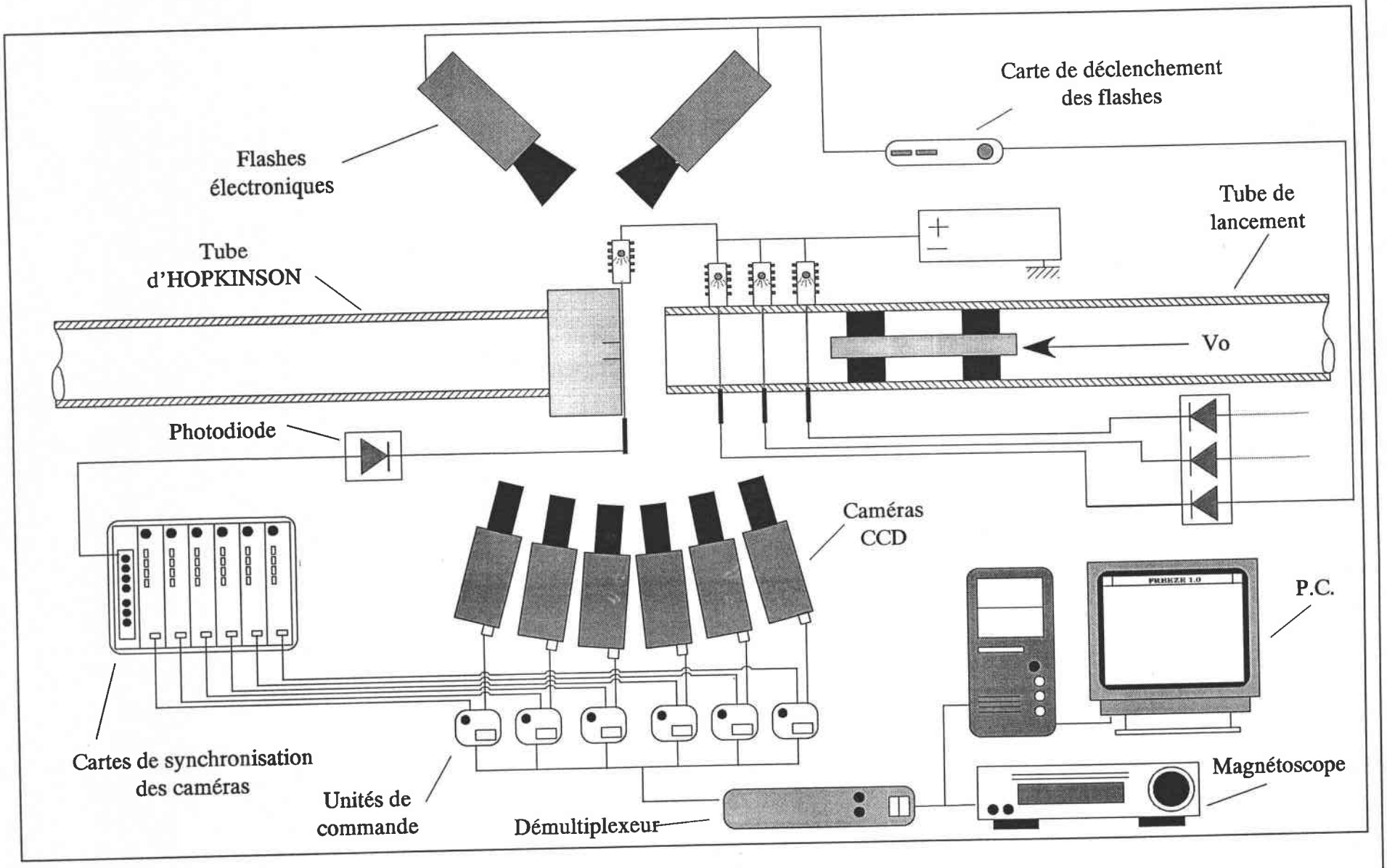


FIG. III-13 : *Disposition des éléments du système vidéo.*

IV - 2 : CAMERAS NUMERIQUES CCD-TV

Chaque caméra CCD est reliée à une unité de commande individuelle qui réunit plusieurs fonctions. On y trouve l'unité d'alimentation, mais elle regroupe aussi toutes les commandes liées au fonctionnement de la caméra, comme le système de déclenchement des prises de vue à la réception d'un signal analogique ou TTL extérieur, la sélection de la durée d'obturation désirée, ainsi que du mode de déclenchement. Elle contient enfin une mémoire numérique de 460 Ko dans laquelle est stockée l'image enregistrée.

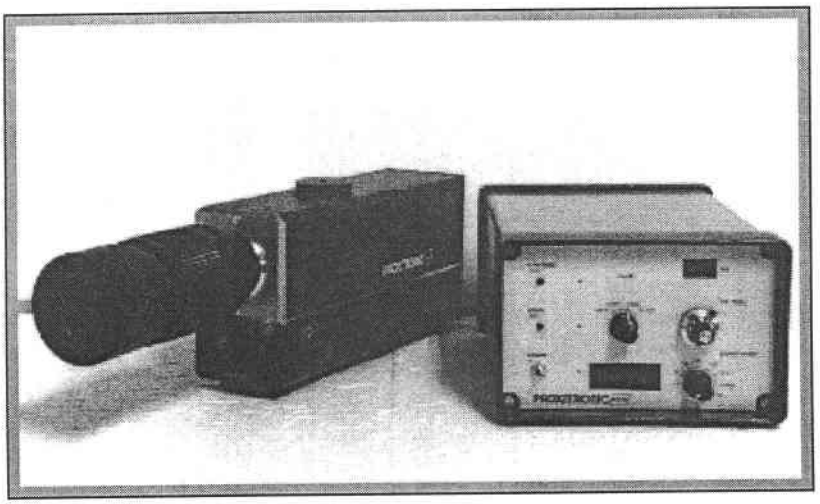


FIG. III-14 : *Caméra numérique et unité de commande.*

La différence fondamentale avec une caméra vidéo rapide habituelle est que l'image filmée n'est pas imprimée sur pellicule. Elle est en effet captée par une cellule CCD-TV pour être ensuite stockée dans la mémoire numérique. Elle est ainsi définie matriciellement, sous forme de pixels et peut être récupérée avec un P.C.. De plus, l'image enregistrée est immédiatement visible sur un moniteur d'ordinateur via une carte d'acquisition, ou directement sur un écran de télévision; il n'y a donc pas de film à développer. Ceci nous procure un gros avantage vu que tous les réglages et mises au point nécessaires (profondeur de champ, luminosité, position...) peuvent alors être accomplis sur-le-champ avec une vision instantanée du résultat. Il en est de même lors des essais. Il suffit de lire la mémoire vidéo pour avoir une image du test.

En outre, nos caméras possèdent des caractéristiques techniques au moins égales aux caméras à miroirs rotatifs à film, en permettant de choisir des durées d'obturation

allant de 5 msec à 1 μsec. Elles peuvent aussi filmer en mode continu, comme une caméra classique VHS. Mais dans ce cas précis les images ne peuvent plus être stockées dans la mémoire numérique et doivent être enregistrées sur bande magnétique avec un magnétoscope. Ceci est dû à la mémoire qui ne peut emmagasiner qu'une seule image à la fois et qui doit être vidée manuellement avant d'en acquérir une nouvelle.

Ces caméras sont en outre équipées chacune d'un amplificateur de lumière électronique, ce qui nous procure un avantage substantiel. Effectivement, nous le verrons plus tard, cet élément nous permet d'effectuer des prises de vues à des temps d'exposition très faibles (de l'ordre de la μsec), avec une source lumineuse relativement peu puissante.

Les caméras sont donc employées en mode coup par coup ("single"), c'est-à-dire que chacune ne saisit qu'une seule image par essai. Afin d'obtenir une série de plusieurs vues sur un essai, nous en utilisons six en montage parallèle ou dix en montage radial comme décrit dans le paragraphe suivant.

IV - 3 : CONFIGURATION UTILISEE

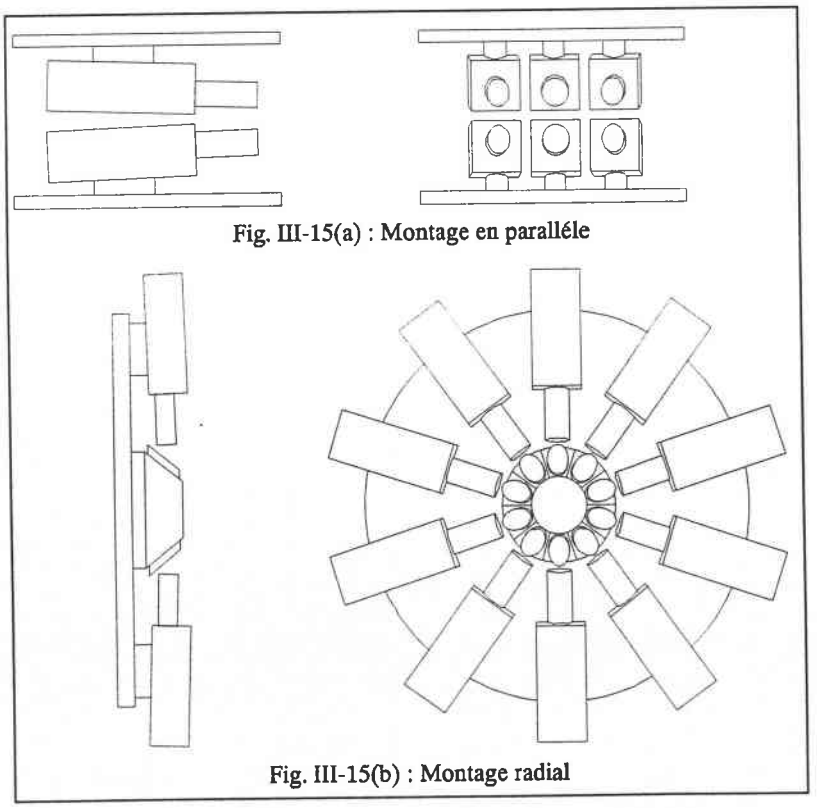


FIG. III-15 : *Montages en parallèle et radial.*

La figure **III-15**(a) représente le montage en parallèle où les six caméras pointent toutes vers le même objet à filmer. Cependant bien que les deux caméras centrales soient bien alignées avec cet objet, les quatre extérieures le visent avec un certain angle, l'image obtenue est alors légèrement distordue. C'est la raison pour laquelle nous n'utilisons pas plus de six caméras dans cette configuration.

Une option réunissant dix caméras a également été conçue. Dans ce second cas illustré par la figure **III-15**(b), les caméras sont disposées radialement et sont toutes braquées vers un prisme central muni de dix miroirs qui réfléchissent l'image de la scène à filmer vers les objectifs. L'angle de vue est ainsi identique pour l'ensemble des caméras.

IV - 4 : SYNCHRONISEUR

Au cours d'un essai, les caméras sont déclenchées successivement les unes après les autres, en rafale. Ceci est réalisé au moyen d'un élément externe à l'ensemble boîtiers-caméras, le synchroniseur. Ce dernier est constitué d'un groupe de sept cartes électroniques de deux types bien distincts. Une carte principale, que nous appellerons carte d'entrée, gère les six autres cartes, les cartes de sortie toutes identiques, chacune connectée à une unité individuelle de caméra.

La carte d'entrée combine deux fonctions principales :

- elle détecte l'événement qui va commander le déclenchement de toutes les caméras. Celui-ci doit être un signal analogique ou logique TTL généré pendant l'essai. Nous l'appellerons signal de synchronisation et il nous est fourni par une photodiode.
- une fois ce signal repéré par la carte d'entrée, elle commande les six cartes de sorties qui génèrent une impulsion TTL vers les boîtiers individuels.

C'est avec ces cartes que nous allons synchroniser les prises de vues. Pour déclencher les caméras les unes après les autres, nous programmons par rapport au signal de synchronisation, le retard avec lequel chaque carte de sortie va transmettre le signal TTL vers son boîtier. Un système de roues codeuses permet de choisir le retard que l'on désire sur chaque carte par intervalle de 1 μsec.

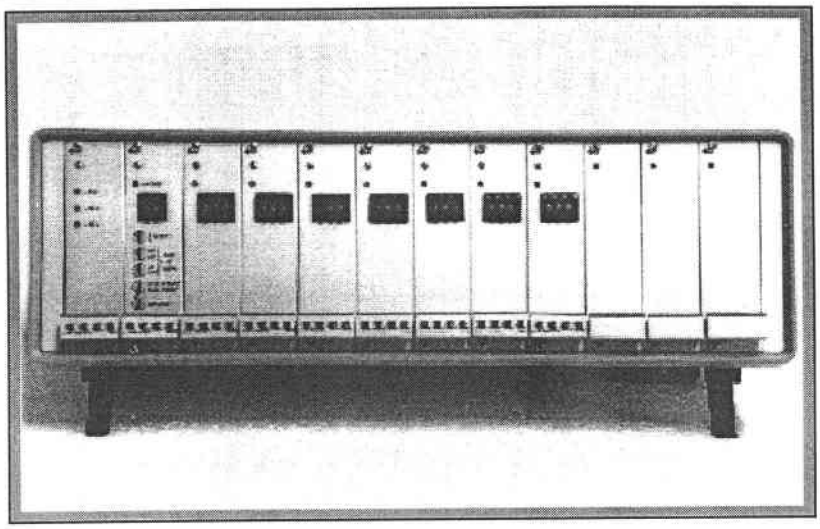


FIG. III-16 : *Synchroniseur.*

IV - 4.1 : SIGNAL DE SYNCHRONISATION

Notre banc d'essai est constitué d'un canon à gaz qui propulse dans un tube un projectile qui va venir impacter une éprouvette. C'est au moment précis de l'impact que nous devons déclencher la première caméra CCD. Pour commander les caméras, nous avons vu que le synchroniseur doit recevoir un signal analogique ou TTL comme signal de référence. Ce dernier est fourni par une photodiode.

Nous avons placé juste au devant de l'éprouvette un montage optique analogue à celui des mesures des vitesses. Au début de l'essai, le faisceau lumineux émis par l'ampoule passe juste au devant de l'éprouvette. Comme nous l'avons décrit dans ce chapitre et représenté à la figure **III-12**, au passage du projectile la tension de sortie de la photodiode chute à une valeur proche de 0 mV. Le passage par un seuil prédéterminé, est l'événement attendu par la carte d'entrée pour déclencher la séquence photographique. Elle active alors les six cartes de sortie qui vont transmettre une information TTL, avec des retards programmés, vers les boîtiers individuels des caméras.

Le gros avantage d'un tel système est qu'il est entièrement basé sur la conduction lumineuse et électrique. Les temps de réponse sont uniquement ceux de la photodiode et de l'électronique du synchroniseur. La transmission est donc quasi instantanée.

IV - 5 : ECLAIRAGE

Rappelons que la durée d'obturation minimum pour chaque caméra est de 1 μsec. Pendant un temps aussi court, la quantité de lumière sous éclairage ambiant, traversant l'objectif et captée par la cellule CCD-TV de la caméra est infime. L'image alors obtenue est entièrement grise ou noire. Il est donc indispensable d'utiliser une source lumineuse adaptée, capable de délivrer en un temps suffisant (quelques msec) une puissance d'éclairage essentielle à une bonne qualité photographique.

Une caméra ultra-rapide à film doit souvent utiliser des sources lumineuses au xénon par exemple. Elles sont très efficaces mais relativement onéreuses et encombrantes si une très forte puissance est désirée. Nos caméras numériques ont l'avantage de posséder un amplificateur de lumière couplé avec leur cellule CCD-TV. Celui-ci intensifie électroniquement chaque photon capté par la cellule. Il devient alors possible de se passer de l'éclairage xénon et d'employer du matériel plus classique.

Nous utilisons donc deux flashes électroniques, d'un type couramment utilisé dans les studios photographiques illustré sur la figure **III-17**. Ils sont peu encombrants, très légers, maniables et faciles d'utilisation. Ils se rechargent quasi instantanément et de surcroît ils ne sont pas coûteux comparativement aux lampes xénon. Leur mode de déclenchement est commode car il s'effectue avec une simple impulsion électrique.

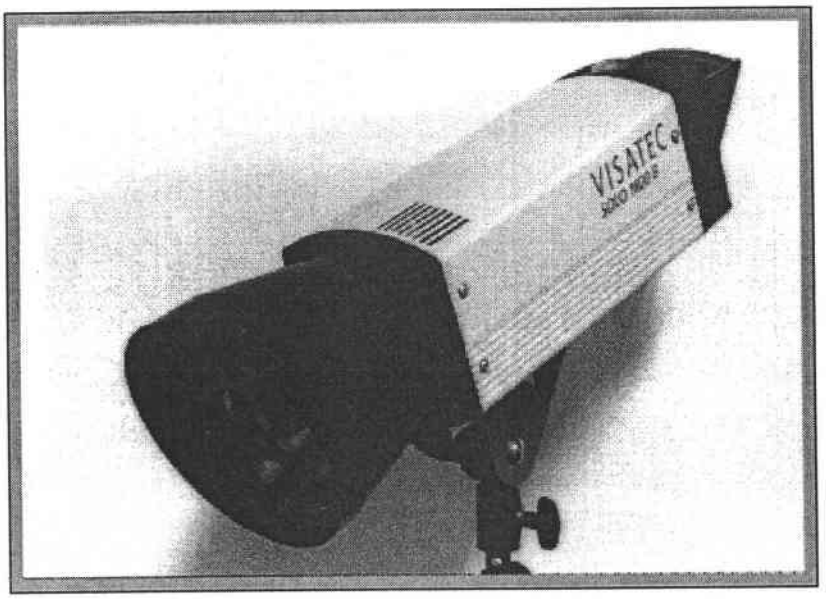


FIG. III-17 : *Flash électronique.*

Le signal d'éclair d'un flash est représenté à la figure **III-18**. Ceux-ci possèdent un temps de montée (temps qu'ils mettent pour accéder à leur niveau maximum de puissance d'éclairage) de 130 μsec, pendant lequel il est impossible d'effectuer des photographies. Ils atteignent ensuite un léger plateau d'environ 2 msec environ, puis leur puissance d'éclairage décroît rapidement. C'est dans cette plage de 2 msec après le temps de montée qu'il faudra déclencher les caméras. Nous voyons donc qu'il est nécessaire d'activer les flashes au moins 130 μsec avant les caméras.

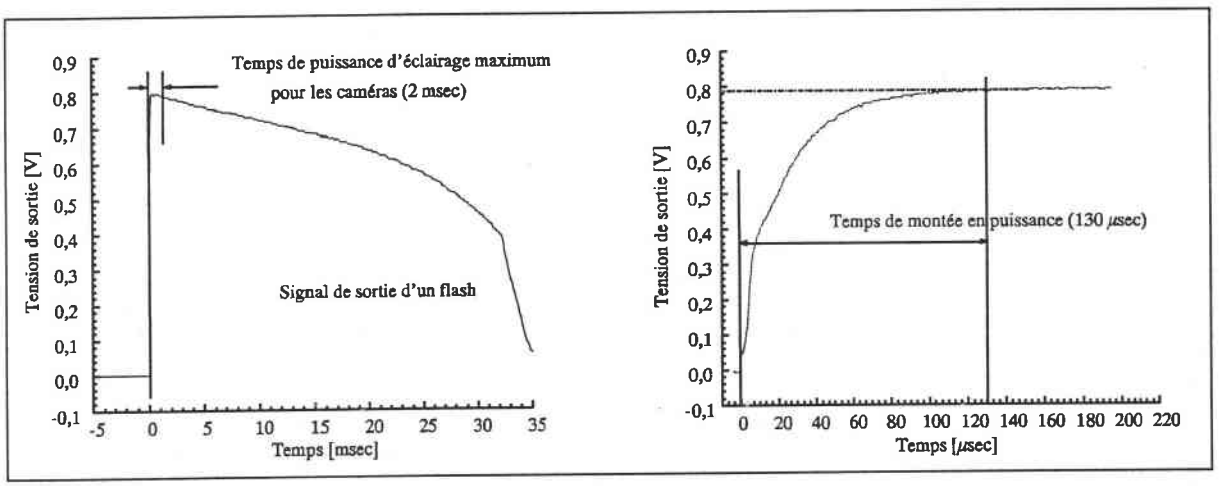


FIG. III-18 : *Signal d'éclair du flash électronique en fonction du temps.*

La coordination de l'éclair avec la séquence de prises de vues est effectuée au moyen d'une carte électronique. Son principe de fonctionnement est basé sur celui du synchroniseur. Elle exploite la chute de tension d'une photodiode du dispositif de mesure des vitesses au passage du projectile pour délivrer une petite impulsion électrique qui active le flash, comme montré à la figure **III-19**. Le faisceau lumineux chargé de déclencher les caméras est placé au devant du sujet à filmer à une distance que le projectile mettra au moins 130 μsec au minimum et 2 msec au maximum à parcourir quelle que soit sa vitesse.

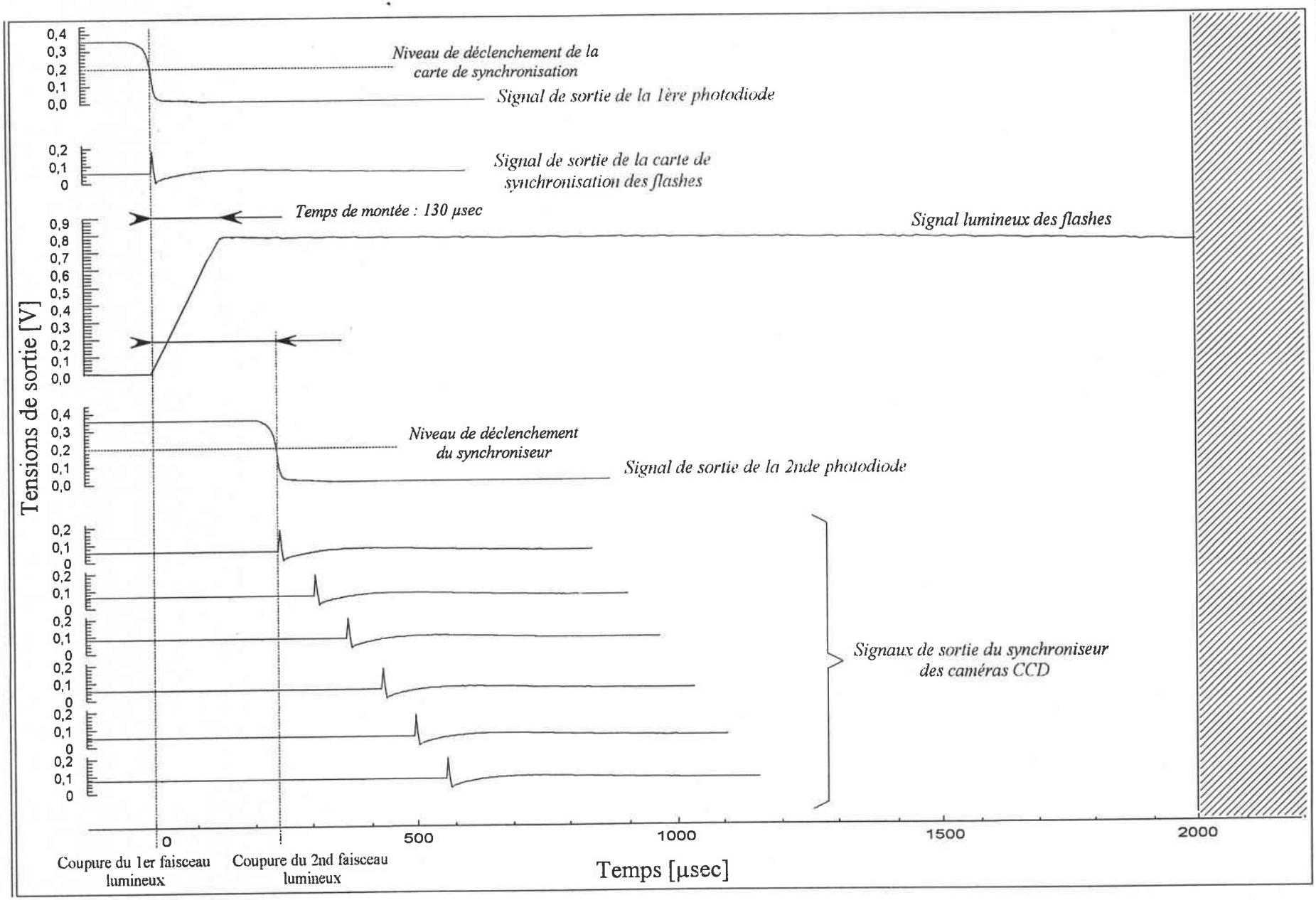


FIG. III-19 : *Synchronisation des différents signaux au cours d'une prise de vues.*

V - Acquisition et Traitement des Images

Une fois l'essai terminé, nous possédons donc une série de six images stockées dans six mémoires différentes. Il faut à présent récupérer ces images avec un P.C.. Pour cela, nous disposons d'une carte d'acquisition numérique couplée à un logiciel (Freeze 1.0) et d'un démultiplexeur, tous deux spécialement développés pour ce type de caméras.

Le logiciel sert à piloter à la fois la carte et le démultiplexeur. Grâce à la carte, l'image contenue dans la mémoire d'une caméra est lue, puis est transférée vers le P.C. sous "Freeze". Elle est alors sauvegardée sur le disque dur, sous un format d'image standard (BMP ou JPEG), afin d'être analysée plus tard par un logiciel de traitement d'image.

Le démultiplexeur sert de connexion entre la carte d'acquisition et les différentes mémoires vidéo, et permet de basculer de l'une à l'autre directement à partir de "Freeze".

Les images contenues dans les mémoires peuvent aussi être visionnées directement sur un téléviseur sans passer par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition. Il est alors possible d'en effectuer une sauvegarde sur magnétoscope puis de réaliser une impression vidéo.

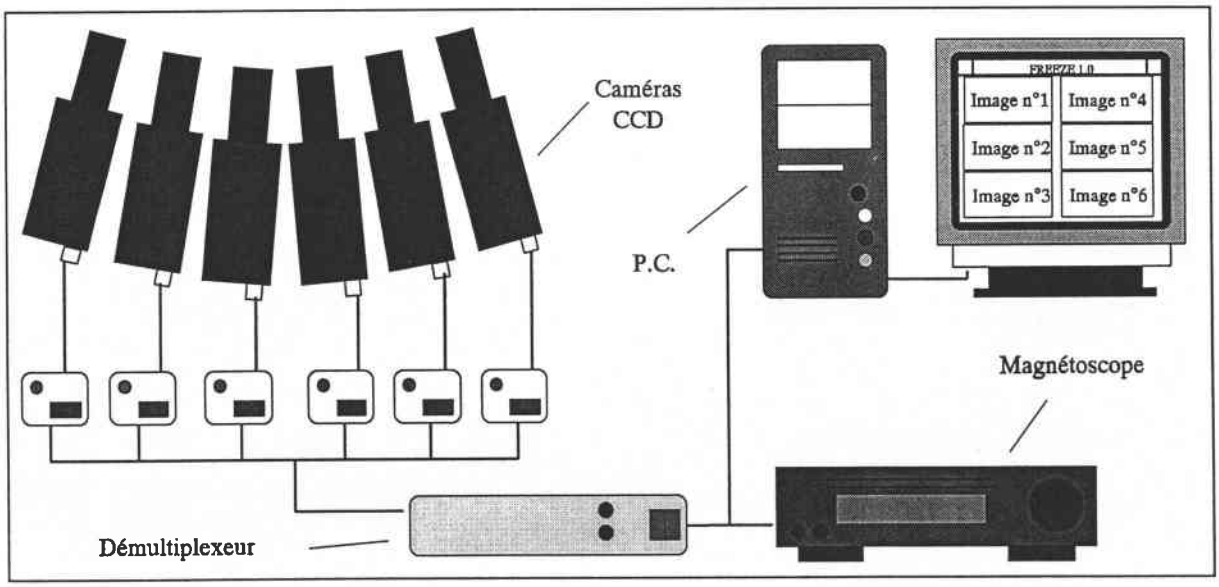


Fig. III-20 : *Eléments du système d'acquisition.*

VI - Aspects Techniques

VI - 1 : Support Reglable

Pour pouvoir filmer dans des conditions rigoureuses d'angle ou de distance l'objet sujet, il est nécessaire de positionner les caméras de façon précise. Nous avons donc conçu un montage spécifique fixé sous chaque caméra, entièrement réalisé en alliage d'aluminium. Il est constitué d'un chariot mobile coulissant réglé par vis, qui permet de régler précisément la distance par rapport au sujet, puis de deux supports l'un pivotant sur le chariot, l'autre basculant, grâce auxquels nous pouvons définir la position angulaire.

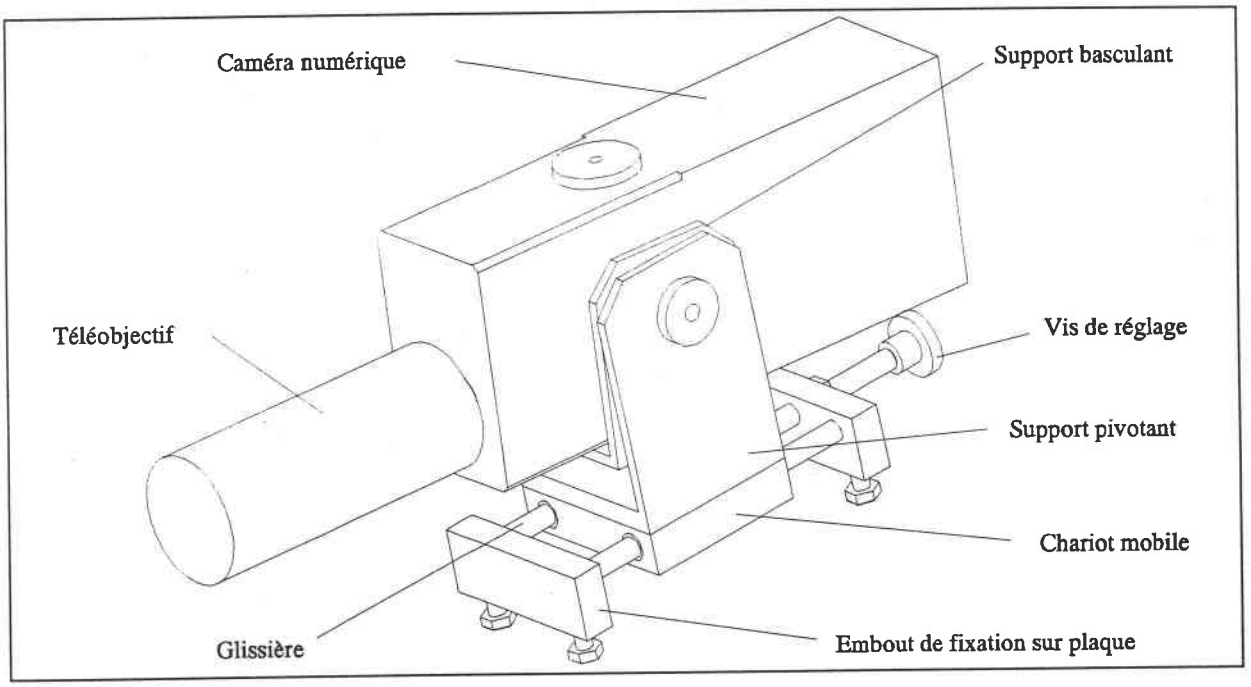


Fig. III-21 : *Support en aluminium et caméra.*

VI - 2 : Bati du Montage Parallele

L'ensemble composé des six caméras, de leurs unités de commande individuelles et des supports représente un poids d'environ 30 kg à 40 kg et occupe un volume non négligeable. Nous avons donc assemblé un bâti sur lequel tous ces éléments sont fixés. Il est réalisé à partir de profilés en aluminium extrudé et est modulable, ce qui permet de disposer les caméras horizontalement ou verticalement.

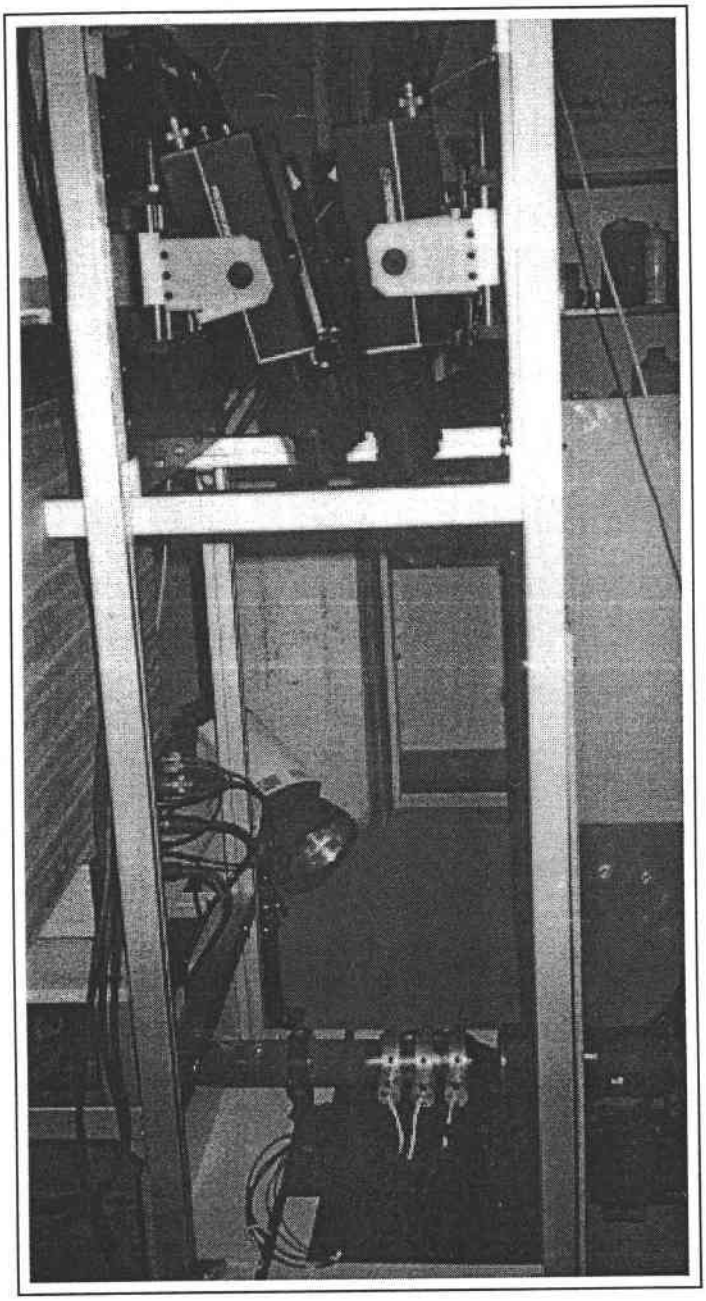


FIG. III-22 : *Vue du montage des caméras rapides.*

VII - CONCLUSION

Le système conçu au LPMM de Metz permet d'éliminer plusieurs inconvénients associés aux observations des processus rapides en lumière réfléchie. Les principaux avantages sont la résolution qui est relativement élevée (800 x 590 pixels) en comparaison avec les systèmes standards de prises de vues rapides disponibles sur le marché où l'écran final est divisé de quatre jusqu'à vingt-quatre petites images.

Un autre avantage du dispositif rapide CCD est la possibilité d'observer directement les résultats des enregistrements sur un moniteur ainsi que de pouvoir les transférer immédiatement vers un P.C. pour une analyse numérique.

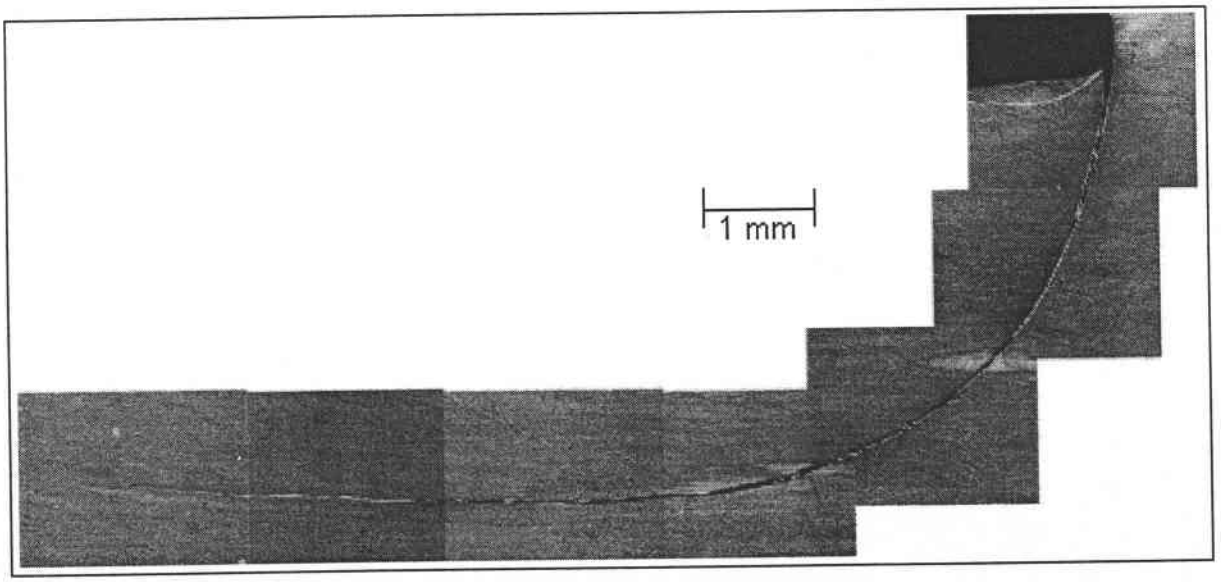
Le désavantage du système avec des caméras individuelles CCD est le nombre limité d'images disponibles pour une série d'enregistrement. (pour notre cas de six à dix)

En raison des progrès très rapides dans la technologie CCD-TV lors de la dernière décennie, de nouvelles conceptions de caméras ultra-rapides sont apparues dernièrement sur le marché avec des prix attractifs. Par exemple des caméras avec des temps d'exposition de 100 nsec sont disponibles pour des prix comparables à ceux des caméras à 1 μsec d'il y a quelques années.

Il est clair que le système de caméras rapides [72] conçu au L.P.M.M. est un outil interactif qui peut être utilisé pour des observations et des analyses de processus rapides en lumière réfléchie ou en lumière transmise.

CHAPITRE IV

IMPACTS SUR PLAQUES PRE ENTAILLEES



B.C.A. et fissure dans une éprouvette en 40-NCD-16 impactée.

CHAPITRE IV

IMPACTS SUR PLAQUES PRE ENTAILLEES

Table des Matières

I - INTRODUCTION **87**

II - PREMIERS RESULTATS : ANALYSE DU SIGNAL **88**

III - ESSAIS AVEC PREFISSURATION DES EPROUVETTES **90**

IV - ESSAIS SUR UN ACIER MI DUR XC-18 ..... **96**

IV - 1 : PREMIERE CONFIGURATION GEOMETRIQUE 96

IV - 2 : SECONDE CONFIGURATION GEOMETRIQUE 99

IV - 2.1 : 1ER CAS DE DEFORMATION POUR V<Vc 100

IV - 2.2 : 2EME CAS DE DEFORMATION POUR V=Vc 101

IV - 2.3 : 3EME CAS DE DEFORMATION POUR V>Vc 105

V - CONCLUSION **108**

Chapitre IV

RESULTATS DES IMPACTS SUR LES PLAQUES PRE ENTAILLEES

I - INTRODUCTION

Rappelons que notre dispositif expérimental a été développé d'une part pour exécuter des impacts sur des plaques et d'autre part pour simuler l'usinage à très grande vitesse des métaux. Cette dernière application est présentée au chapitre VI de ce rapport. Par rapport aux dispositifs similaires de KALTHOFF & WINKLER [60] ou encore de ZHOU & al. [14], décrits dans le chapitre II, nous apportons en plus un élément supplémentaire. Il s'agit d'un tube d'HOPKINSON, sur lequel sont fixés les éprouvettes d'impact ou les outils de coupe dans le cas de l'usinage, et grâce auquel les efforts appliqués sur les éprouvettes peuvent être mesurés.

Les premières mises au point ont ainsi été effectuées lors d'essais d'usinage rapide de divers aciers. Ces tests préliminaires ont permis de régler de nombreux problèmes mécaniques, tels que le guidage précis du projectile aux grandes vitesses (10 m/s<V<100 m/s) ou l'alignement des deux tubes, ainsi que d'étalonner les enregistrements des efforts sur le tube d'HOPKINSON. Les réglages des dispositifs de prises de vue rapides et de mesure des vitesses du projectile ont aussi été effectués lors de ces campagnes d'essais. Pour chaque test nous avons donc un enregistrement :

* des vitesses du projectile (mesure par photodiode et compteur de temps),
* des efforts appliqués (deux ponts d'extensomètrie sont disposés sur le tube),
* de l'impact ou de l'usinage (série de six photographies par caméra rapide).

KALTHOFF & al. [60] ont montré la capacité de ce genre de dispositif à créer un chargement de mode II dans des éprouvettes pré entaillées et ainsi à générer des bandes de cisaillement adiabatique dans différents matériaux.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats que nous avons obtenus lors d'impacts sur deux types de matériaux différents, un acier mi dur XC-18 et un acier martensitique, le 40-NCD-16.

II - PREMIERS RESULTATS : ANALYSE DU SIGNAL

Les premiers essais ont été réalisés sur un acier mi dur afin de tester la résistance du montage expérimental, et d'observer le comportement de la tête-support de l'éprouvette et du projectile, sous l'effet répété des impacts. Dans cette première configuration, les éprouvettes ne sont pas entaillées et l'impact s'effectue directement sur leur face avant. Deux exemples d'enregistrements des efforts de tels essais sont montrés à la figure **IV-1**.

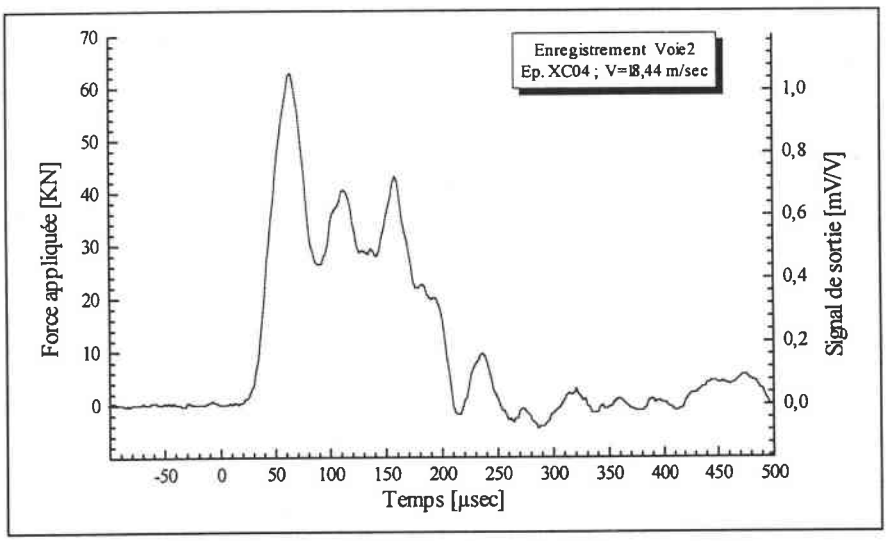


FIG. IV-1(a) : Essai à 18,4 m/sec ; XC-18 non entaillée.

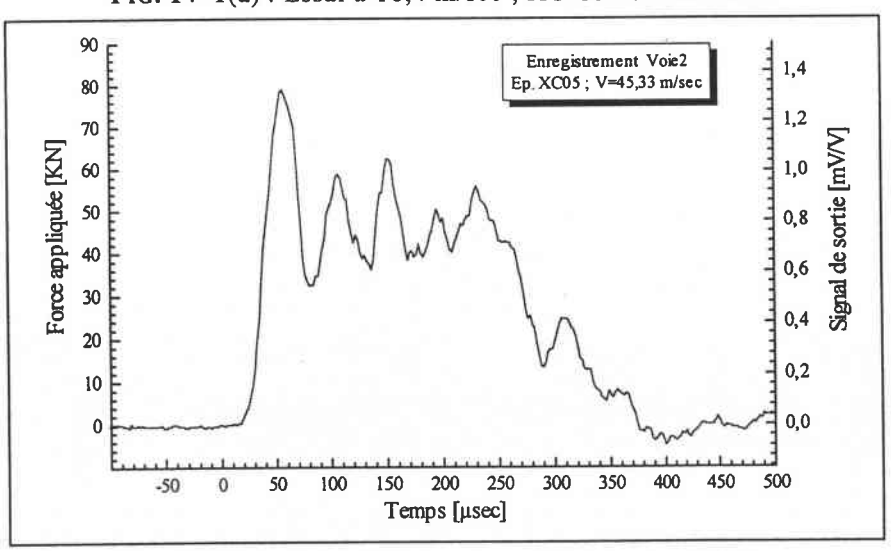


FIG. IV-1(b) : Essai à 45,3 m/sec ; XC-18 non entaillée.

FIG. IV-1 : *Exemples de signaux sur deux éprouvettes non entaillées en XC-18.*

La première courbe représente un impact à 18,4 m/sec, tandis que la seconde est le résultat d'un essai à 45,3 m/sec. Le décalage par rapport au zéro du temps est dû au fait que ces enregistrements proviennent du second pont de jauge, situé 200 mm derrière le premier, et qui est utilisé pour déclencher l'acquisition. Il correspond au temps que met l'onde de compression pour parcourir cette distance.

Les signaux présentent un pic d'effort en début d'enregistrement, dont l'amplitude est nettement plus importante que la moyenne du reste de la courbe. Ce pic est la conséquence du choc du projectile sur l'éprouvette. Ensuite, la contrainte au sein de l'éprouvette s'équilibre et se situe autour d'une valeur moyenne pratiquement constante jusqu'à la chute finale, coïncidant avec l'arrêt du projectile dans l'échantillon. Des oscillations périodiques sont visibles au cours de l'enregistrement. Elles correspondent aux différentes réflexions des ondes dans l'éprouvette.

L'évolution de la profondeur de l'empreinte dans l'échantillon en fonction de la vitesse d'impact, est représentée à la figure **IV-2**. L'augmentation de la vitesse a pour effet d'accroître la distance de pénétration du projectile. Ceci se retrouve sur la **figure IV-1** où la durée des enregistrements est différente pour les deux essais, environ 200 μsec pour le premier et 300 μsec pour le second. Ceci est dû au fait que le projectile a pénétré plus en avant dans le second échantillon à cause d'une vitesse beaucoup plus importante.

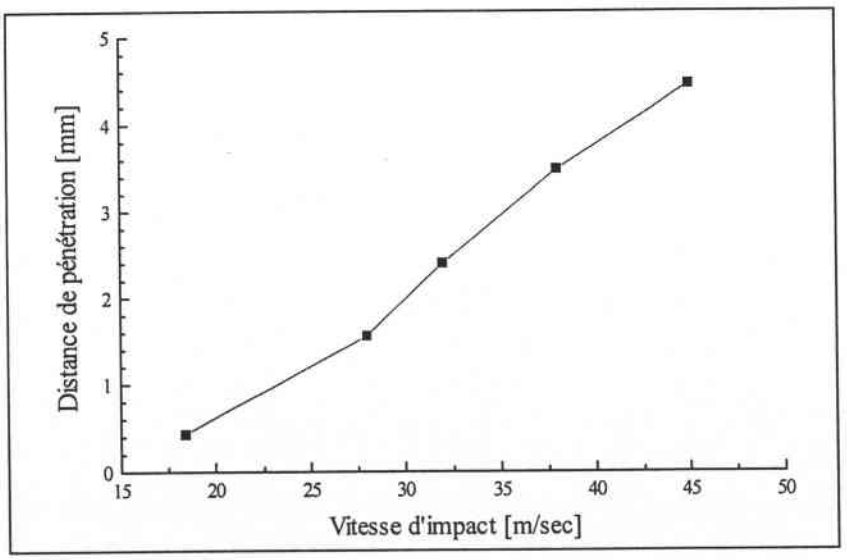


FIG. IV-2 : *Evolution de la distance de pénétration en fonction de la vitesse d'impact, sur des éprouvettes en XC-18 non entaillées.*

Cinq de ces éprouvettes, testées à des vitesses comprises entre 18 m/sec et 45 m/sec, ont été découpées et étudiées. Autour de la zone de l'empreinte, une analyse microscopique de la structure ne fait apparaître aucune propagation de fissures. Néanmoins la microstructure est fortement affectée par la pénétration du projectile. Les grains sont très allongés dans les zones ayant subi un cisaillement important et sont, au contraire, écrasés au niveau de la face d'impact. De plus, le gradient de déformation des grains, des parties cisaillées vers les zones non déformées de l'éprouvette, varie fortement en fonction de la vitesse d'impact.

Une étude de ces déformations, basée sur une technique d'analyse d'images numériques est présentée au chapitre V.

Ces premiers essais ont permis de tester la résistance du montage expérimental, de vérifier la symétrie de contact entre les faces du projectile et de l'éprouvette pendant l'impact, ainsi que d'effectuer les premières observations sur l'allure des signaux enregistrés. Cependant avec ce matériau et suivant cette configuration d'éprouvette, aucune bande de cisaillement ni aucune fissure n'est apparue. Un refoulement de la matière due à la pénétration du projectile n'a provoqué qu'une importante déformation plastique du matériau, très concentrée au niveau du point d'impact.

III - Essais avec Prefissuration des Eprouvettes

Dans un deuxième temps, nous avons testé les éprouvettes pré entaillées en acier 40-NCD-16. Les entailles usinées par électroérosion ont une largeur de 0,3 mm et une profondeur de 10 mm. Les premiers essais sont réalisés sur des échantillons ayant subi un traitement thermique qui a porté leur dureté à 54 HRC. Les vitesses d'impact sont comprises dans une gamme de vitesses qui s'échelonne de 25 m/sec à 60 m/sec.

Dans cette configuration aucune bande de cisaillement ou fissure n'est initiée en fond d'entaille. Les éprouvettes n'ont subi qu'une très légère déformation plastique dans la zone impactée, même pour les vitesses les plus élevées. Avec ce traitement

thermique, les concentrations de contrainte induites en fond d'entaille ne sont pas suffisantes pour amorcer la propagation de B.C.A. ou des fissures.

Nous avons donc ramené la dureté des éprouvettes à 45 HRC et effectué de nouveaux essais. Rappelons que KALTHOFF & WINKLER [60] ou ZHOU & al. [14] obtiennent avec une configuration géométrique semblable des éprouvettes, une propagation de B.C.A. dans une direction proche de celle de l'impact. Les bandes s'initiant à partir d'une vitesse critique, qui diffère suivant les matériaux testés. Dans notre cas le mode de rupture par B.C.A. observé est totalement différent.

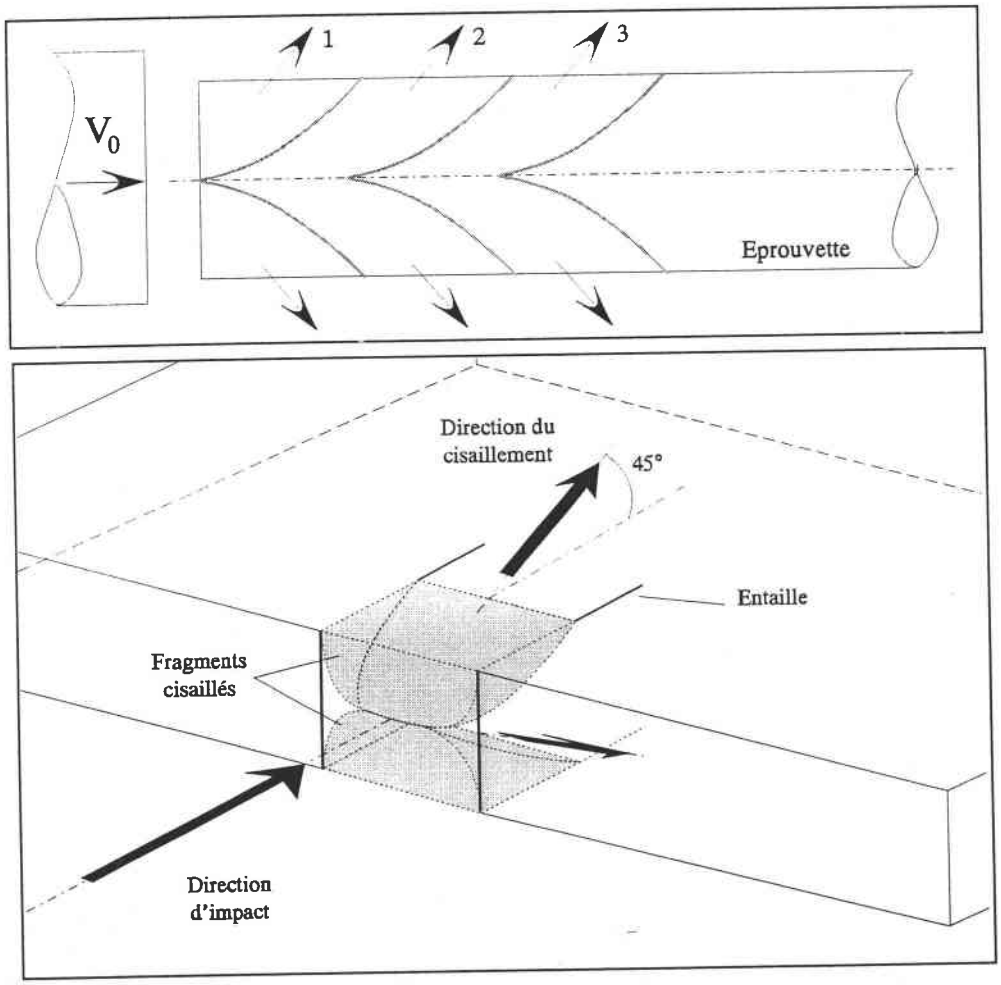


FIG. IV-3 : *Schématisation du mécanisme de rupture des éprouvettes. pré entaillées en acier 40-NCD-16.*

Des B.C.A. sont générées par l'impact au-dessus d'une certaine vitesse, mais leur direction d'extension est tout à fait différente de celle reportée dans la littérature, pour des conditions expérimentales similaires. Le point de départ des B.C.A. n'est pas situé au fond d'entaille, mais au milieu de la face d'impact. Elles se propagent ensuite vers les faces inférieures et supérieures de l'éprouvette. Deux plans de cisaillement

symétriques sont ainsi créés qui forment un angle d'environ 45° avec les plans représentés par les surfaces de l'éprouvette. Ce mécanisme de rupture est représenté à la figure **IV-3**. Le projectile, en progressant dans l'éprouvette expulse les deux morceaux cisaillés de l'éprouvette, puis deux autres plans de cisaillement se créent de nouveau plus en arrière. Ce mécanisme se reproduit jusqu'à ce que la vitesse du projectile ne soit plus suffisante pour initier le cisaillement adiabatique.

Deux exemples d'oscillogrammes représentatifs d'essais réalisés dans ces conditions sont montrés à la figure **IV-4**.

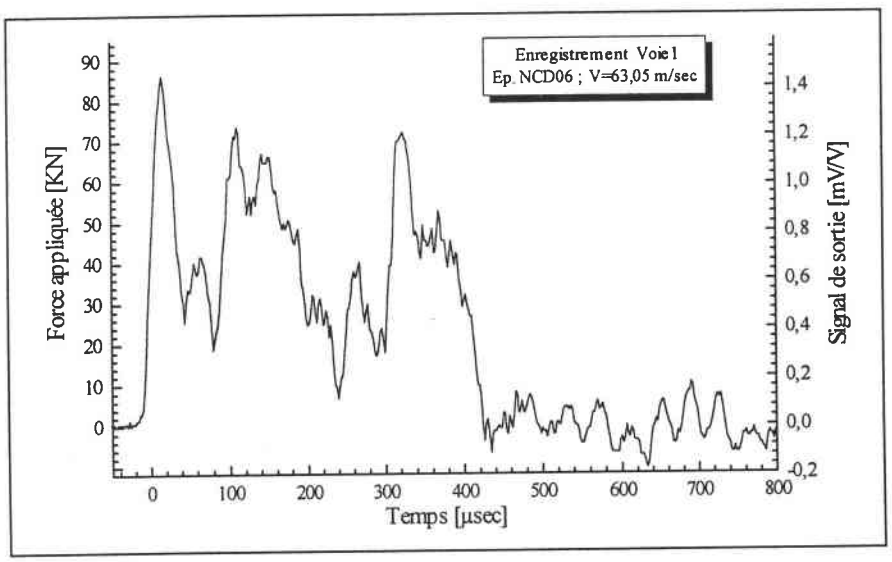


FIG. IV-4(a) : *Essai à 63,05 m/sec ; 40-NCD-16 entaillée.*

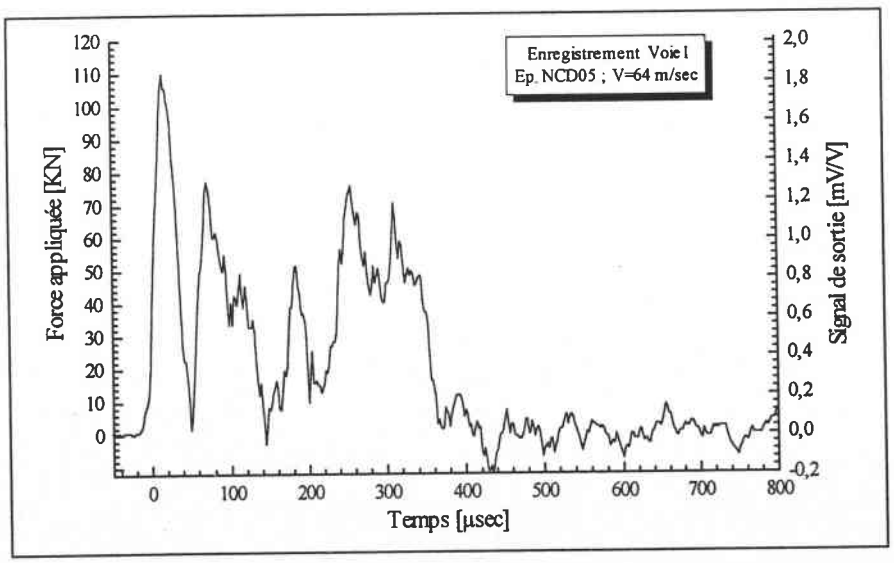


FIG. IV-4(b) : *Essai à 64 m/sec ; 40-NCD-16 entaillée.*

FIG. IV-4 : *Signaux de sortie des jauges pour deux impacts à 65 m/sec sur un acier 40-NCD-16.*

Ils résultent d'impacts effectués à des vitesses proches de 65 m/sec. Comme sur les courbes précédentes de l'acier XC-18, ils possèdent un pic en début d'enregistrement, consécutif au choc du projectile contre l'éprouvette. La durée de l'impact est d'environ 400 μsec au cours de laquelle le projectile a pénétré dans l'éprouvette d'une distance d'à peu près 20 mm (± 1 mm). Nous constatons que ces enregistrements sont composés dans leur intégralité d'une succession de pics. Ils sont le résultat de la formation continue des fragments cisaillés. La phase de développement de la surface de cisaillement est associée à une diminution de résistance de l'échantillon. Sur les enregistrements ceci est caractérisé par une chute brutale du signal. A la formation complète de cette surface le fragment est désolidarisé de l'éprouvette. Puis le projectile en avançant rencontre de nouveau une résistance de la matière, correspondant à un autre pic sur la courbe d'enregistrement.

Une photographie du plan de cisaillement, vue de dessus, situé sur une éprouvette est montrée à la figure **IV-5**. La zone représentée est proche de la face d'impact. Le plan de cisaillement part du centre de l'éprouvette et s'étend jusqu'à la surface. Il apparaît plus brillant que la surface de l'éprouvette et son inclinaison est d'environ 45° dans la direction de l'impact.

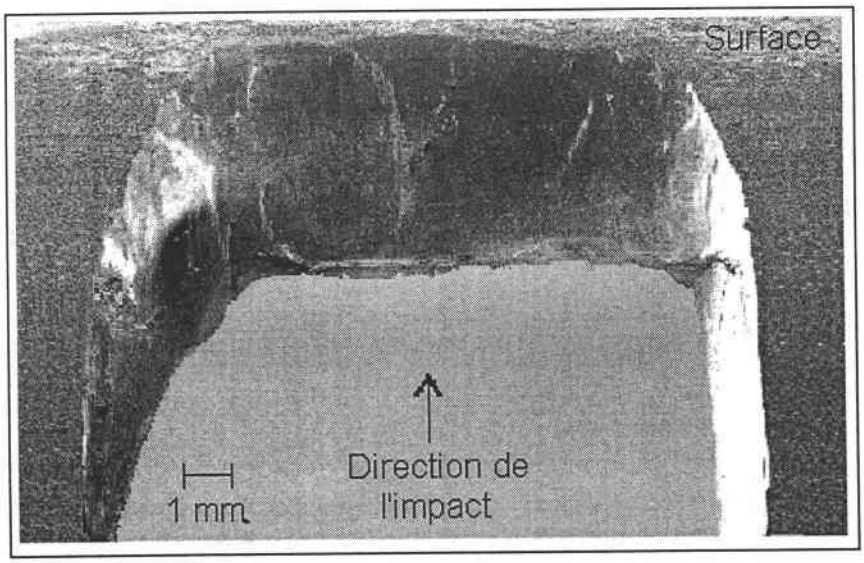


FIG. IV-5 : *Photographie du plan de cisaillement de l'éprouvette.*

La figure **IV-6** représente une photographie au microscope électronique à balayage de la surface du plan de cisaillement. Cette surface de rupture se révèle relativement uniforme, lisse et brillante, ce qui implique que la rupture est provoquée par la

propagation d'une fissure. Celle-ci s'est étendue au sein d'une bande de cisaillement adiabatique, comme le montre la figure **IV-7,** d'une coupe de l'éprouvette au niveau du plan de cisaillement. La zone étudiée a subi une attaque chimique au nital qui fait apparaître une B.C.A.. Celle-ci a une largeur d'environ 10 à 15 μm. Elle est suivie d'une fissure qui s'est développée par la suite. Cette observation confirme que la rupture des échantillons est bien la conséquence de la formation d'une zone de cisaillement adiabatique au sein de laquelle une fissure s'est développée.

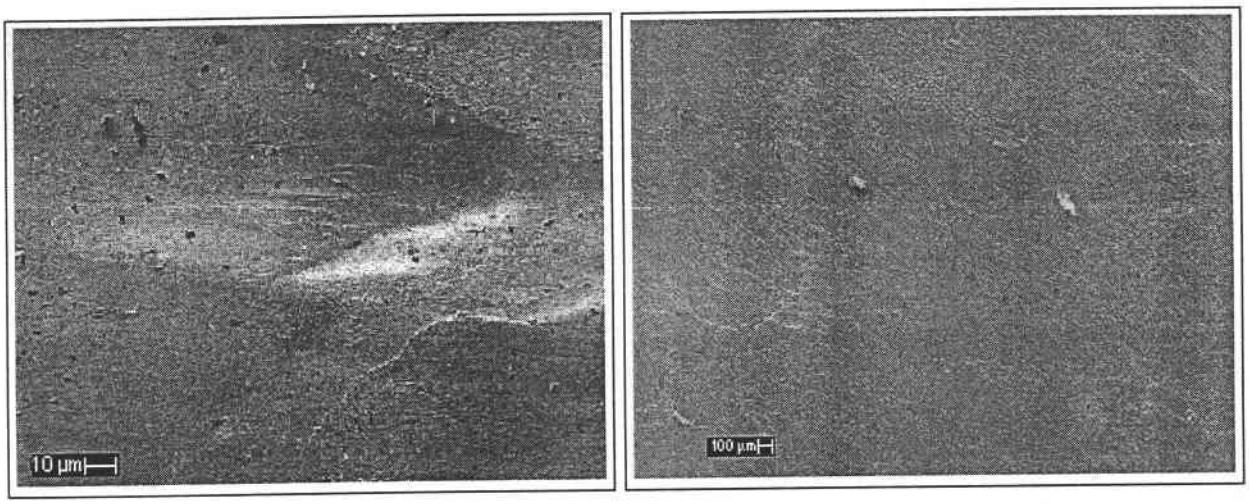


FIG. IV-6 : *Surface du plan de cisaillement. (2 grossissements)*

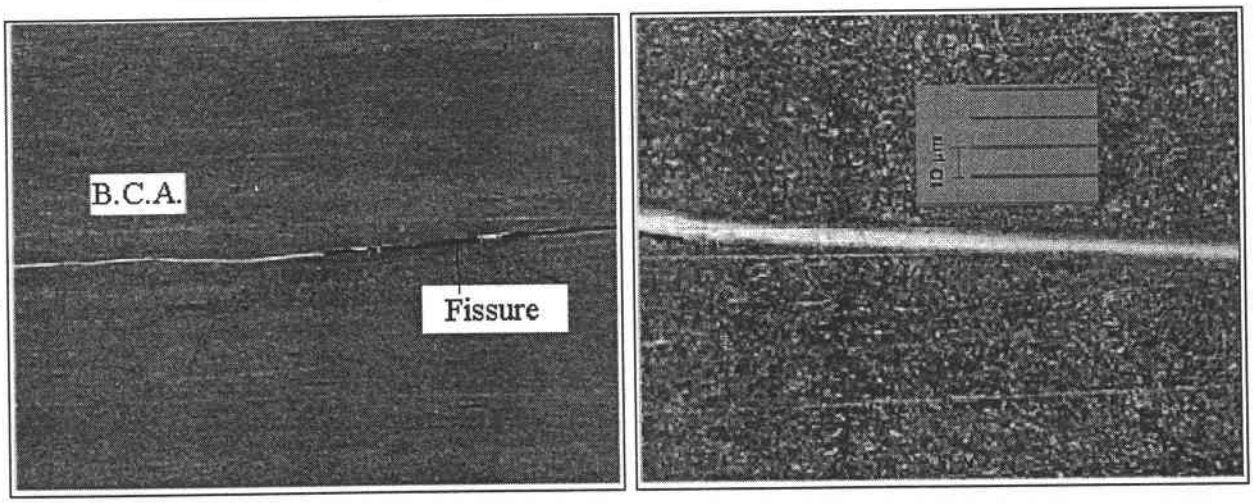


FIG. IV-7 : *Vues d'une B.C.A. au sein d'une éprouvette 40-NCD-16 impactée.*

Lors des essais effectués, ce mécanisme de rupture n'apparaît que pour des vitesses d'impact supérieures à 40 m/sec. En deçà, les éprouvettes ne subissent qu'une légère déformation plastique dans leur zone d'impact, où le projectile ne pénètre que de quelques millimètres. Une vitesse d'impact située au-dessus de ce seuil provoque la fragmentation. L'accroissement de cette vitesse multiplie le nombre des fragments produits et l'enfoncement du projectile dans l'échantillon devient plus important.

Ce mécanisme de rupture n'a jusqu'alors, jamais été observé sur des éprouvettes pré entaillées de ce type. Il peut être une conséquence de la géométrie de l'échantillon (épaisseur de la plaque, distance entre les fissures). Ou encore il peut être dû aux propriétés physiques et mécaniques du matériau testé. ZHOU & al. [14] ont montré qu'elles pouvaient avoir une importance sur le mode de rupture d'éprouvettes similaires soumises à ce type de chargement.

La figure **IV-8** montre une séquence photographique, d'un impact sur une éprouvette en 40-NCD-16. Le délai entre chaque image est de 20 μsec, correspondant à une avancée du projectile de 1 mm (Ceci n'apparaît pas clairement sur les photographies à cause des différents cadrages associés à chaque caméra). Des fragments cisaillés sont très visibles à l'avant du projectile, qui les expulse au fur et à mesure de sa progression. Sur les images 3 et 4 un nouveau fragment s'est formé.

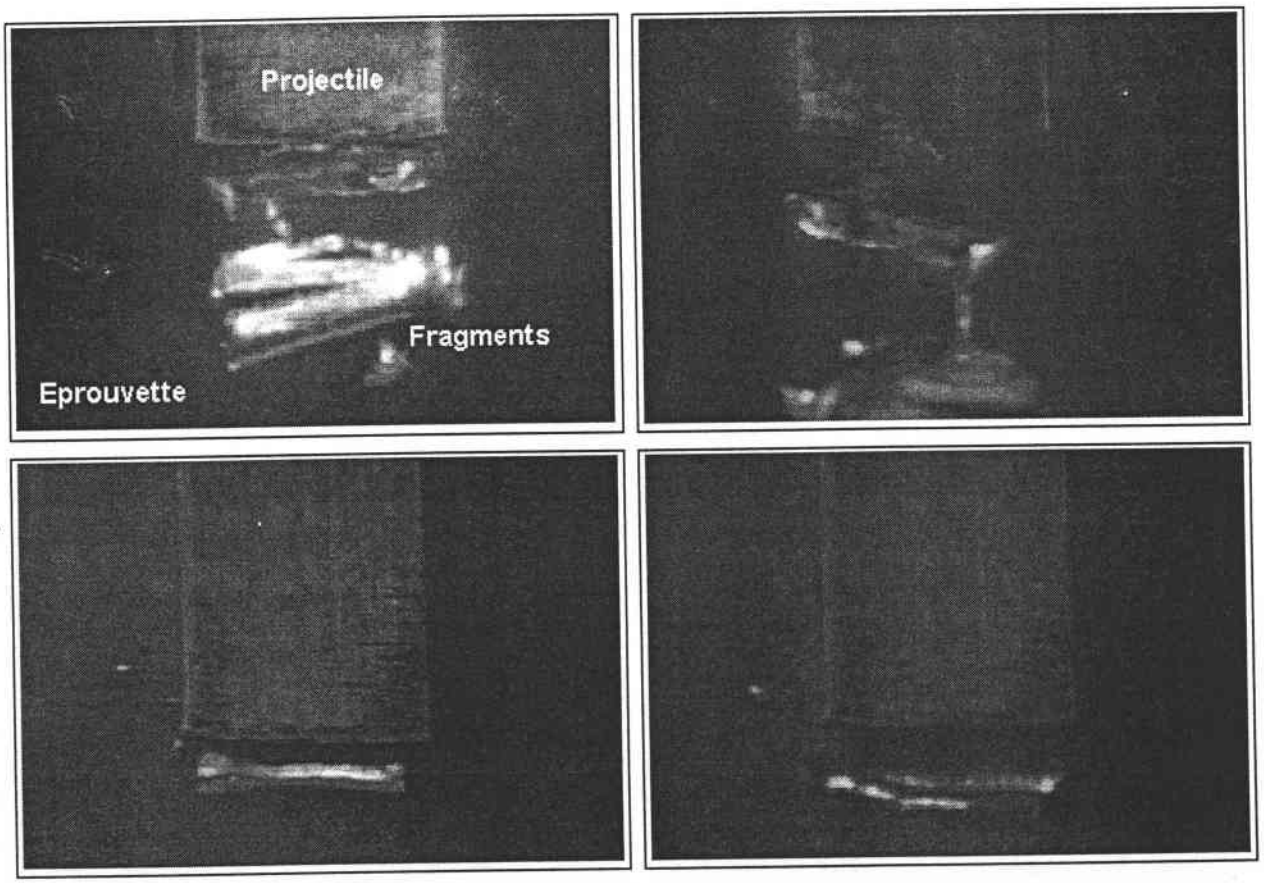


FIG. IV-8 : *Séquence photographique d'un impact sur une éprouvette en 40-NCD-16 pré entaillée. (Temps exposition 1 μsec)*

Nous avons donc entrepris de nouveaux essais sur un matériau tout à fait différent, un acier mi dur XC-18. Les résultats que nous avons obtenus sont décrits dans les paragraphes suivants.

IV - Essais sur un Acier Mi dur XC-18

IV - 1 : Premiere Configuration Geometrique

Des éprouvettes en XC-18, d'une géométrie identique aux précédentes en 40-NCD-16, ont donc été testées à des vitesses comprises entre 35 m/sec et 65 m/sec. Les examens des échantillons obtenus révèlent une déformation plastique dans la zone impactée. Cependant elle est moins importante que celle observée sur les autres éprouvettes en XC-18 non entaillées. Les entailles ont provoqué l'apparition de fissures parallèles, mais qui ne se sont pas propagées au travers de l'éprouvette. Il est clair que l'énergie cinétique du projectile, avec cette configuration expérimentale et avec cet acier, n'occasionne qu'une déformation plastique du matériau, concentrée au niveau de la face d'impact. Elle ne provoque aucune apparition de B.C.A., ni aucune propagation de fissures. Une photographie du type de déformation obtenue est montrée à la figure **IV-9**.

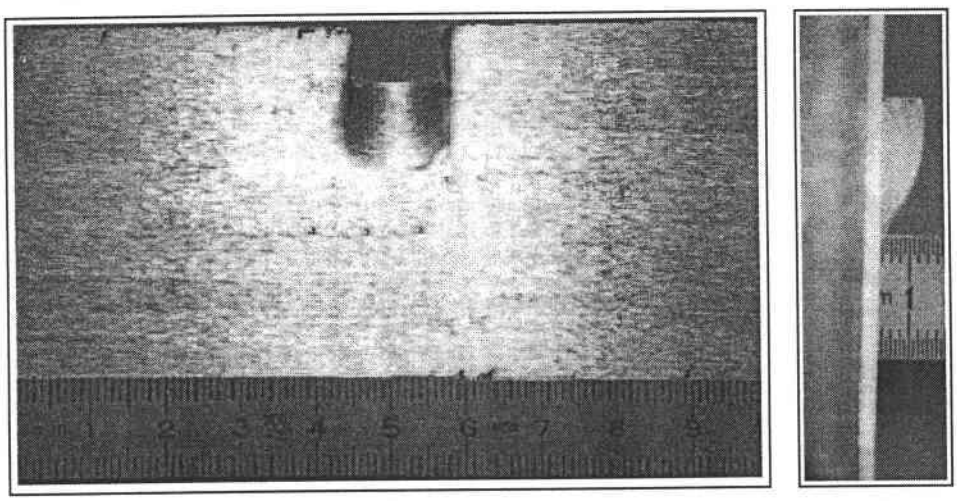


Fig. IV-9 : *Vue d'une éprouvette en XC-18 pré entaillée impactée à 37 m/sec.*

Trois exemples de signaux obtenus lors de ces essais, réalisés à 37,7 m/sec et 57,3 m/sec sont représentés à la figure **IV-10**. Une analyse analogue à celle concernant les enregistrements sur les échantillons en XC-18 non entaillés, peut être effectuée. Un premier pic est suivi de plusieurs oscillations qui sont imputées aux réflexions de l'onde de chargement au sein de l'éprouvette. La durée du deuxième impact est supérieure au premier. Cette différence est causée par un enfoncement plus important du projectile au cours du second essai. Dans toutes les éprouvettes, la longueur des fissures apparues est inférieure à la pénétration du projectile.

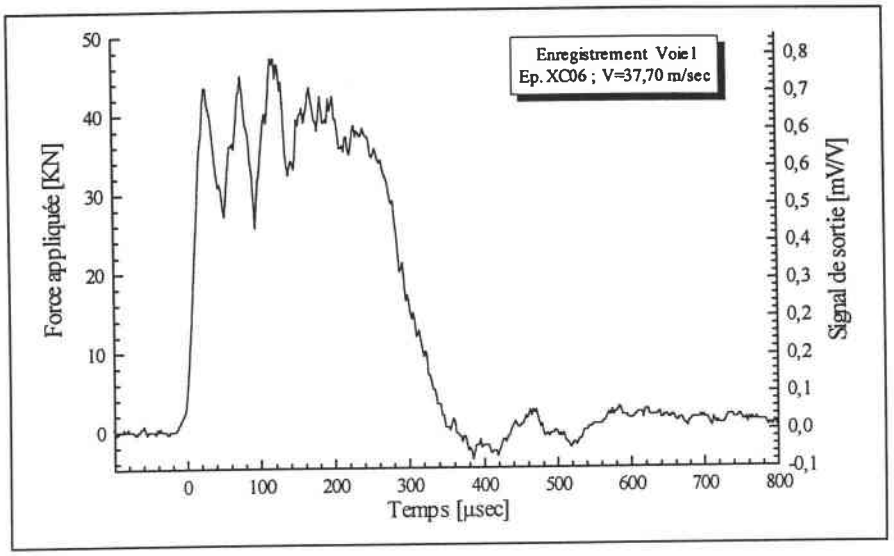


FIG. IV-10(a) : Essai à 37,7 m/sec ; XC-18 entaillée.

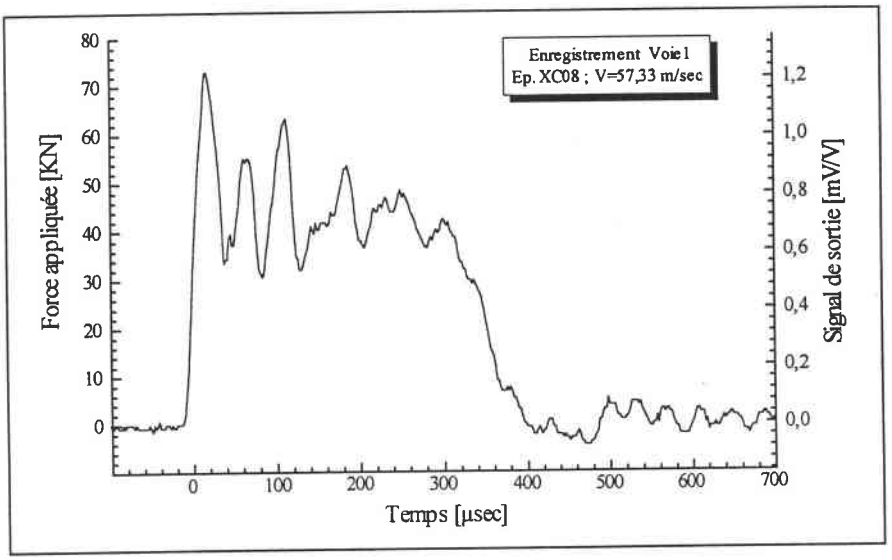


FIG. IV-10(b) : Essai à 57,3 m/sec ; XC-18 entaillée.

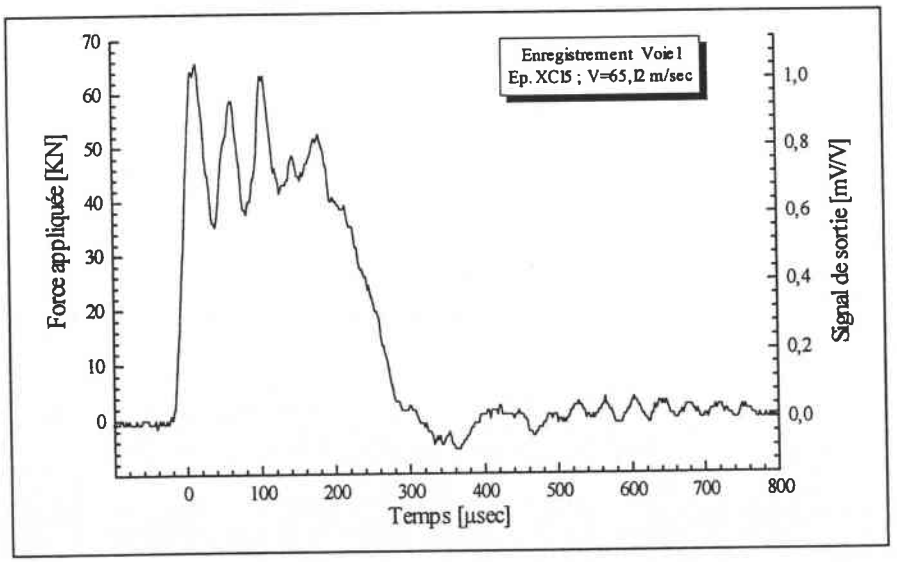


FIG. IV-10(c) : Essai à 65,1 m/sec ; XC-18 entaillée.

FIG. IV-10 : *Signaux de sortie des jauges pour trois impacts sur un acier XC-18 entaillé.*

Les efforts moyens au cours des impacts sont déterminés à partir des signaux enregistrés et sont reportés dans le tableau ci-dessous. Il est visible que leur intensité augmente avec la vitesse.

Eprouvettes entaillées XC18		
N° Eprouvette	Vitesse d'impact [m/sec]	Force appliquée [KN]
XC 06	37,7	40,5
XC 07	45,2	42,3
XC 08	57,3	44,8
XC 09	65,1	46,7

L'évolution de ces efforts moyens en fonction de la vitesse d'impact est représentée à la figure **IV-11**. Dans une gamme des vitesses comprises entre 35 m/sec et 70 m/sec, nous constatons que cette évolution est quasiment linéaire. Les efforts augmentent d'environ 14% lorsque la vitesse d'impact double.

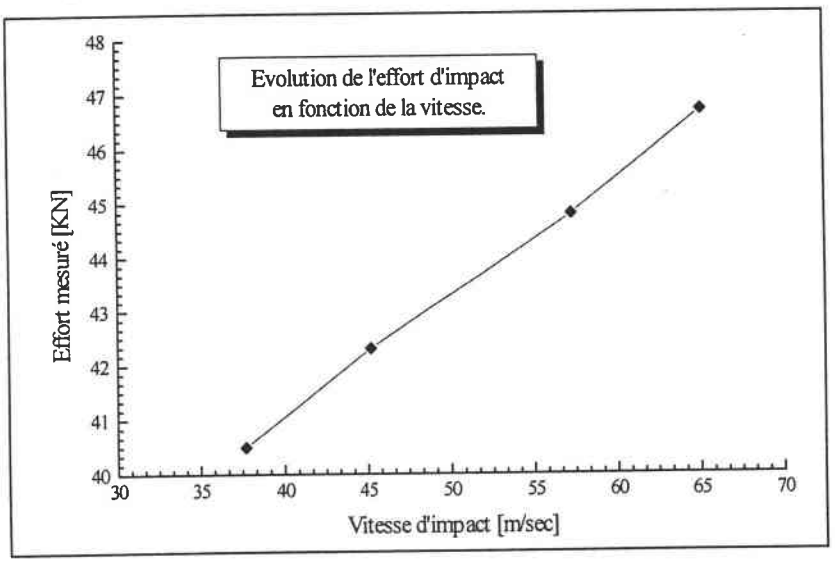


FIG. IV-11 : *Evolution des efforts moyens appliqués sur l'éprouvette en fonction de la vitesse d'impact.*

Une modification dans la géométrie des éprouvettes a donc été apportée pour corriger son comportement sous impact. L'épaisseur de la zone cisaillée a été réduite et ramenée à 4 mm (au lieu de 10 mm initialement). Deux rainures parallèles ont ainsi été usinées dans le prolongement des entailles. Leur rôle, tout en amincissant localement l'éprouvette, est aussi de guider la propagation des B.C.A. dans la direction de l'impact et des entailles.

Une représentation de ces nouveaux échantillons est montrée à la figure **IV-12**. Dans la suite nous les nommerons "éprouvettes rainurées" par opposition à entaillées.

Pour les essais, la face d'impact a été intervertie. Le projectile vient frapper à présent l'échantillon sur la face opposée aux entailles, pour la raison suivante. L'importante déformation engendrée dans la zone d'impact, par les ondes plastiques, annihile l'effet de concentration de contrainte que doivent provoquer les entailles. En les plaçant en opposition par rapport à l'impact, elles ne subissent plus cette perturbation. Ainsi l'onde de chargement atteint des pointes d'entailles intactes et non déformées, augmentant ainsi les chances de formation de B.C.A..

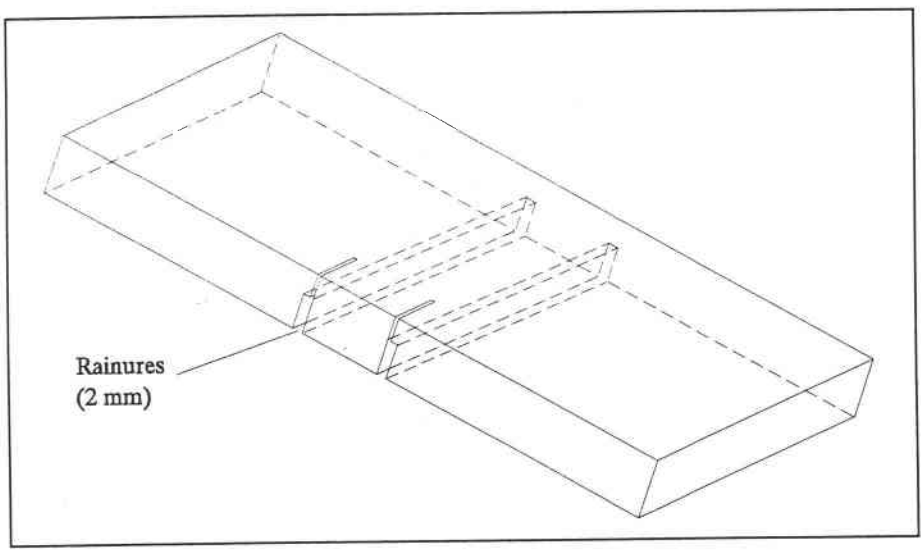


FIG. IV-12 : *Schéma de l'éprouvette modifiée.*

IV - 2 : SECONDE CONFIGURATION GEOMETRIQUE

Les résultats obtenus avec cette configuration révèlent différents comportements à la déformation des échantillons, en fonction de la vitesse d'impact. Nous pouvons distinguer trois principaux types de déformation. Une rupture totale de l'éprouvette, par B.C.A., se produit pour une faible gamme de vitesses, que nous appellerons vitesses critiques. En deçà et au delà de cet intervalle, une forte déformation plastique est créée au point d'impact par la pénétration du projectile. Ce comportement est appelé "effet champignon", en raison de la forme générée par l'impact, similaire à celle d'un test de Taylor.

IV - 2.1 : 1ER CAS DE DEFORMATION POUR $V<V_c$

En dessous d'une certaine vitesse critique, l'énergie cinétique du projectile n'est pas suffisante pour amorcer la rupture des éprouvettes. La partie centrale située entre les deux rainures s'est simplement déplacée vers l'arrière, sans se rompre, d'environ 2 mm au maximum tandis que le projectile a pénétré de 10 mm dans l'éprouvette. Ce déplacement a engendré deux zones de 1,5 à 2 mm de large, le long des rainures, où le cisaillement est très prononcé. Une analyse microscopique révèle que la déformation est restée homogène à l'intérieur de ces zones. Aucune B.C.A. ou fissure n'est apparue.

L'impact a aussi produit une forte déformation plastique principalement concentrée au niveau de la face d'impact. En ce point, une région est apparue, où la matière est refoulée d'une manière identique aux premiers essais avec les éprouvettes non entaillées. Un exemple d'éprouvette de ce type est montré à la figure **IV-13**.

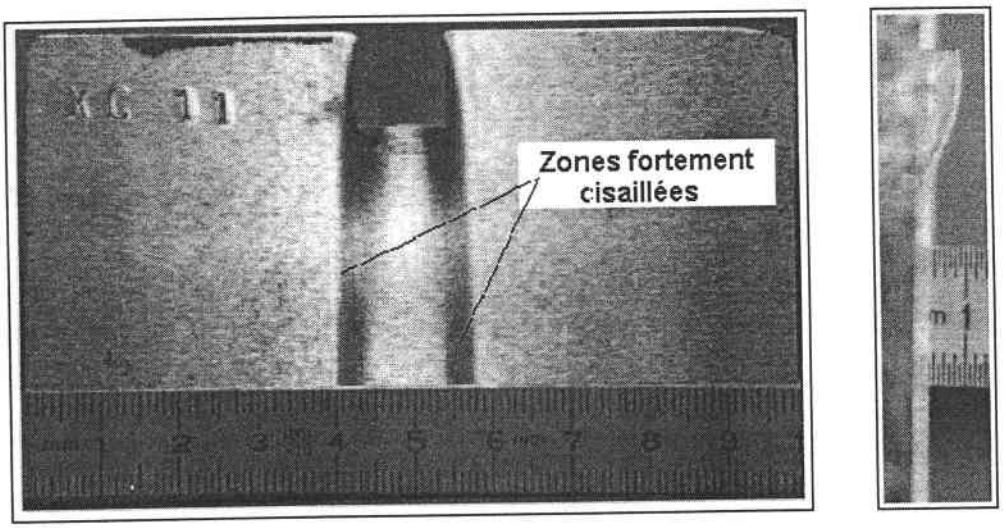


FIG. IV-13 : *Vue d'une éprouvette en XC-18 rainurée impactée à 40 m/sec.*

Deux enregistrements des efforts sont représentés à la figure **IV-14**. L'allure de ces signaux est très voisine de celles déjà observées auparavant. Après un pic initial, son amplitude moyenne est constante dans le temps jusqu'à la chute, coïncidant avec l'arrêt du projectile. Nous constatons cependant un niveau des efforts moyens nettement plus bas, comparativement aux éprouvettes entaillées, et pour des vitesses d'impacts voisines. Ceci est dû à la diminution de la section de la zone cisaillée.

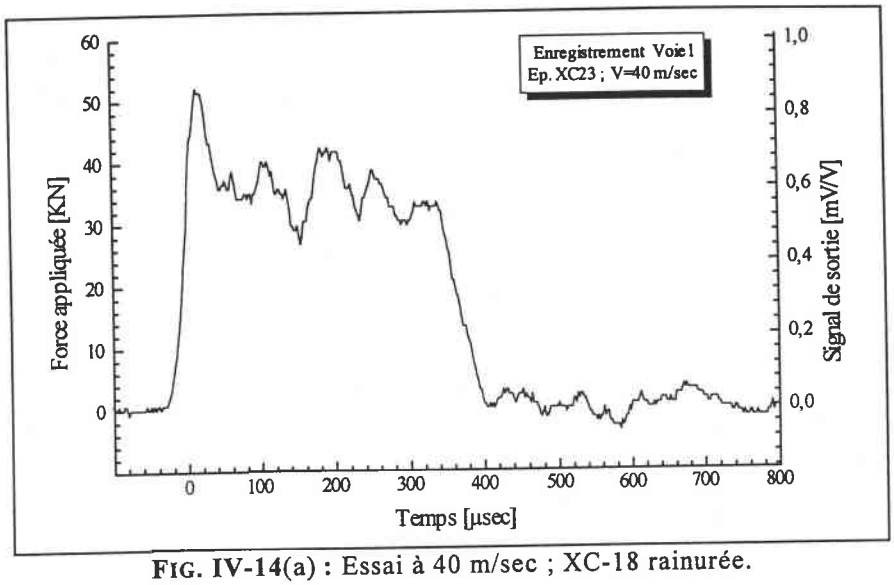


FIG. IV-14(a) : Essai à 40 m/sec ; XC-18 rainurée.

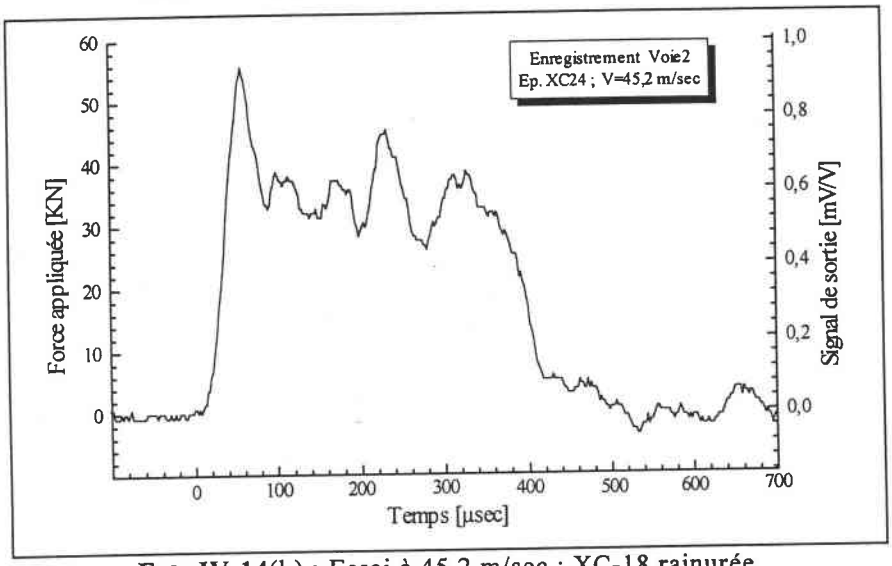


FIG. IV-14(b) : Essai à 45,2 m/sec ; XC-18 rainurée.

FIG. IV-14 : *Signal de sortie des jauges pour un impact à 40 m/sec sur une éprouvette XC-18 rainurée.*

IV - 2.2 : 2EME CAS DE DEFORMATION POUR $V=V_c$

Dans un intervalle de vitesse compris entre 50 m/sec et 60 m/sec environ, les éprouvettes sont cisaillées. La partie centrale est totalement désolidarisée du reste de l'échantillon. Dans cette gamme de vitesse, l'énergie du projectile est suffisante pour initier la rupture et entretenir la propagation. La déformation plastique, l'effet champignon, au niveau de la zone d'impact est nettement moins marquée que lors des vitesses inférieures. Il existe donc une vitesse de transition au delà de laquelle la rupture des éprouvettes se produit. Un exemple de ce type d'éprouvette est montré à la figure **IV-15**.

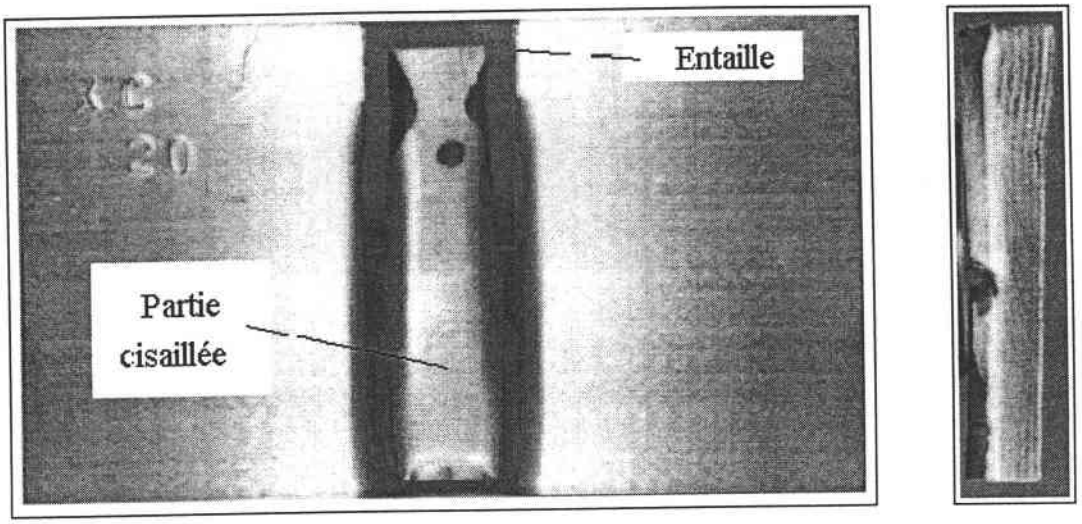


FIG. IV-15 : *Vue d'une éprouvette en XC-18 rainurée impactée à 54,7 m/sec.*

Le point de départ de la rupture est situé en fond d'entaille et la propagation s'effectue dans la direction opposée à l'impact. Des enregistrements associés à ces essais, montrés à la figure **IV-16**, révèlent que l'amplitude du signal n'est pas constante dans le temps, comme pour les autres signaux observés, mais qu'elle décroît régulièrement suivant la propagation. La chute finale du signal correspond à l'instant où la rupture est complète et l'éprouvette cisaillée. Comme nous connaissons la distance parcourue et le temps écoulé, il est donc possible de déterminer la vitesse moyenne de la propagation.

Pour une vitesse d'impact d'environ 55 m/sec, la durée du signal est située entre 210 μsec et 220 μsec. La profondeur des entailles étant de 10 mm et la largeur des éprouvettes de 60 mm, la longueur de la partie cisaillée est donc de 50 mm. Mais à cause de la déformation provoquée par l'avancée du projectile, cette longueur n'est plus que de 43 mm. Ainsi la vitesse moyenne de propagation est calculée à 200 m/sec.

Lorsque la vitesse du projectile est de 50 m/sec, la durée du signal croît à 380 μsec. La vitesse de propagation est alors calculée à 110 m/sec. (Longueur cisaillée : 42 mm). La vitesse d'impact semble donc avoir une très forte influence sur la vitesse de propagation. Cette dernière diminue presque de moitié dans un intervalle de 5 m/sec. Un comportement similaire a aussi été rapporté par ZHOU & al. [14] dans un acier C-300.

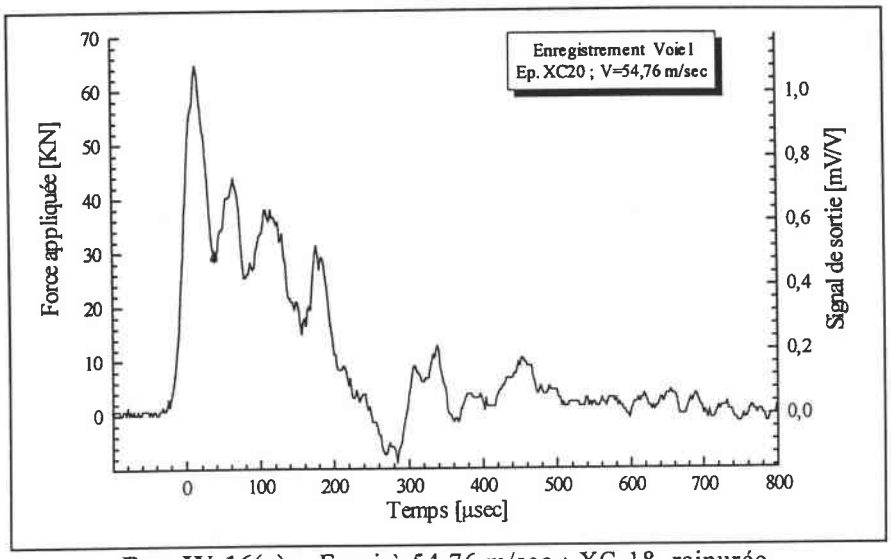


FIG. IV-16(a) : Essai à 54,76 m/sec ; XC-18 rainurée.

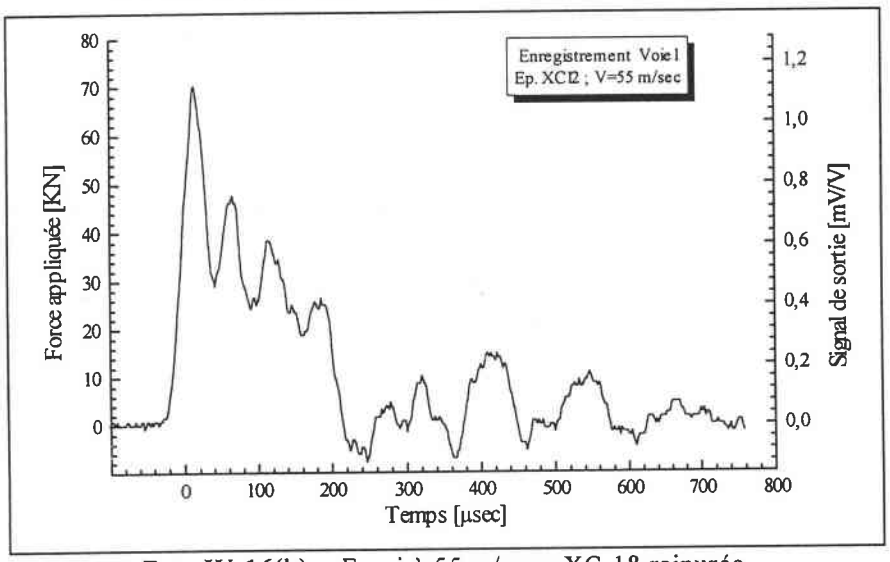


FIG. IV-16(b) : Essai à 55 m/sec ; XC-18 rainurée.

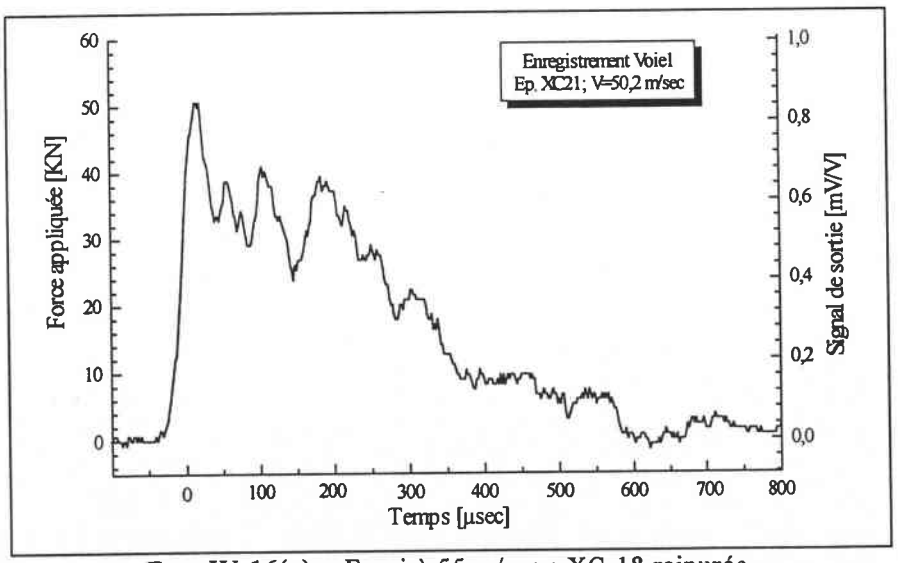


FIG. IV-16(c) : Essai à 55 m/sec ; XC-18 rainurée.

FIG. IV-16 : *Signaux de sortie des jauges pour trois impacts sur une éprouvette XC-18 rainurée.*

Des essais supplémentaires, à des vitesses proches de 70 m/sec, ont été effectués pour confirmer cette observation dans l'XC-18. Ils ont fait apparaître un nouveau mode de déformation, décrit dans un paragraphe suivant.

Des observations au microscope électronique ont été menées sur les faciès de rupture des éprouvettes cisaillées. Un exemple de micrographie est visible sur la figure **IV-17**. La direction du cisaillement est horizontale sur ces images. Le nombre important de cavités allongées indique qu'une rupture ductile en cisaillement s'est produite. Les micrographies montrent clairement que la rupture à l'intérieur de la B.C.A. est le résultat direct d'une coalescence de cavités qui sont cisaillées par le mouvement relatif des deux cotés de la B.C.A.. Les tailles des vides créés sont variables mais excèdent rarement 10 μm.

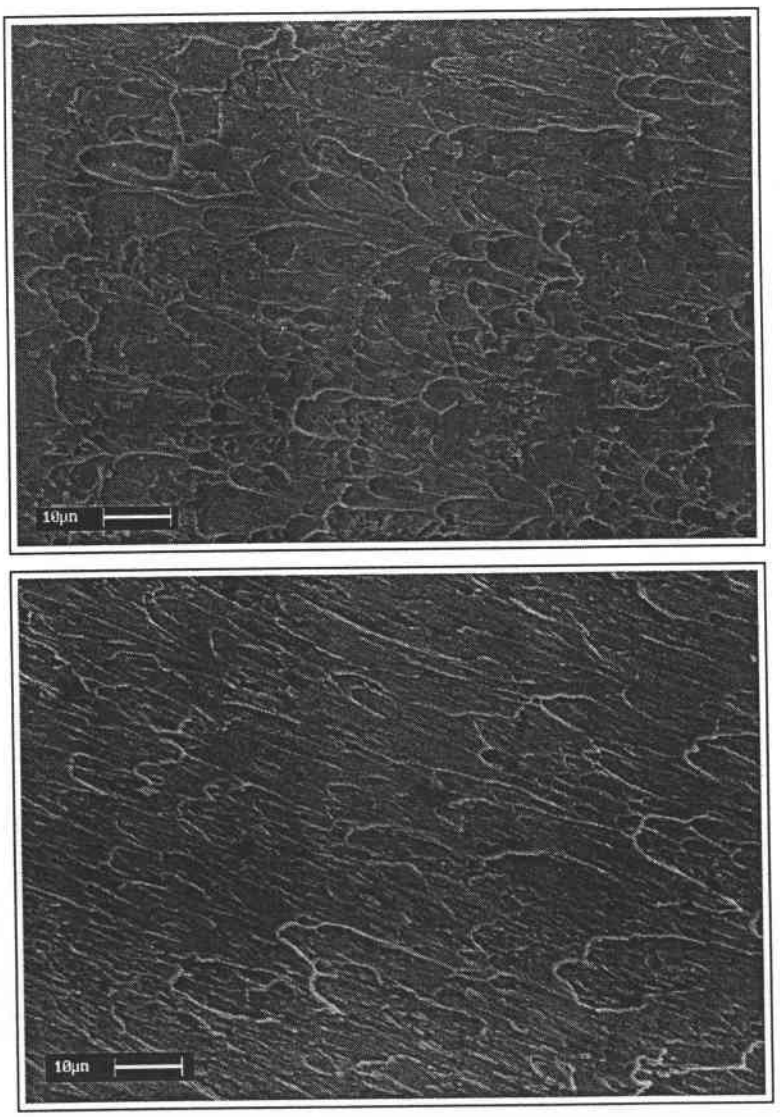


FIG. IV-17 : *Faciès de rupture sur deux zones de l'échantillon.*

IV - 2.3 : 3EME CAS DE DEFORMATION POUR $V>V_c$

Lorsque la vitesse d'impact dépasse la gamme de vitesses comprise entre 50 m/sec et 60 m/sec, la rupture ne se produit plus et un nouveau mode de déformation apparaît. La vitesse où apparaît la transition entre les deux modes n'est pas bien définie, (elle se situe aux environs de 60 à 65 m/sec) et des essais supplémentaires sont nécessaires pour la déterminer plus précisément. Les impacts réalisés aux plus grandes vitesses se situent entre 70 m/sec et 90 m/sec.

L'effet champignon, qui avait quasiment disparu dans la gamme inférieure réapparaît de nouveau, comme montré à la figure **IV-18**. La partie centrale de l'éprouvette ne subit aucun déplacement et les deux zones latérales de cisaillement ont disparu. La déformation plastique est uniquement concentrée dans la zone d'impact et est beaucoup plus marquée que dans les cas précédants.

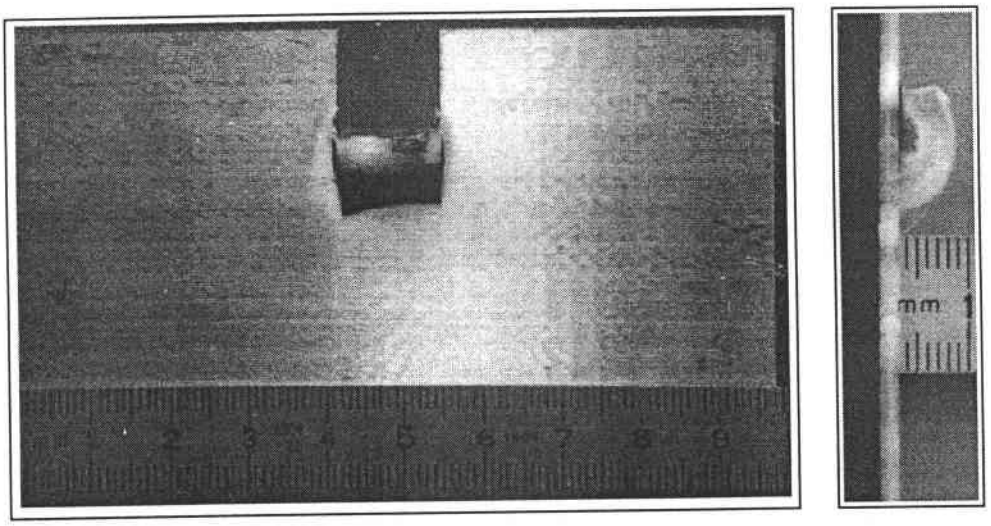


FIG. IV-18 : *Vue d'une éprouvette en XC-18 rainurée impactée à 78,8 m/sec.*

Une explication sur cet effet champignon peut être fournie par la vitesse de propagation des ondes plastiques de compression dans l'éprouvette. Sur la figure **IV-19**(a) est représenté un enregistrement d'un impact à 78,8 m/sec. La force appliquée par le projectile, soit dans ce cas 40 KN, induit une contrainte de compression dans l'éprouvette qui est proche de la valeur de la contrainte à rupture où le module tangent $d\sigma/d\varepsilon = f'(\gamma)$ est très faible. En conséquence, la vitesse de propagation des ondes plastiques de compression est peu élevée et la déformation engendrée par l'impact s'accumule au devant du projectile dans une zone très réduite.

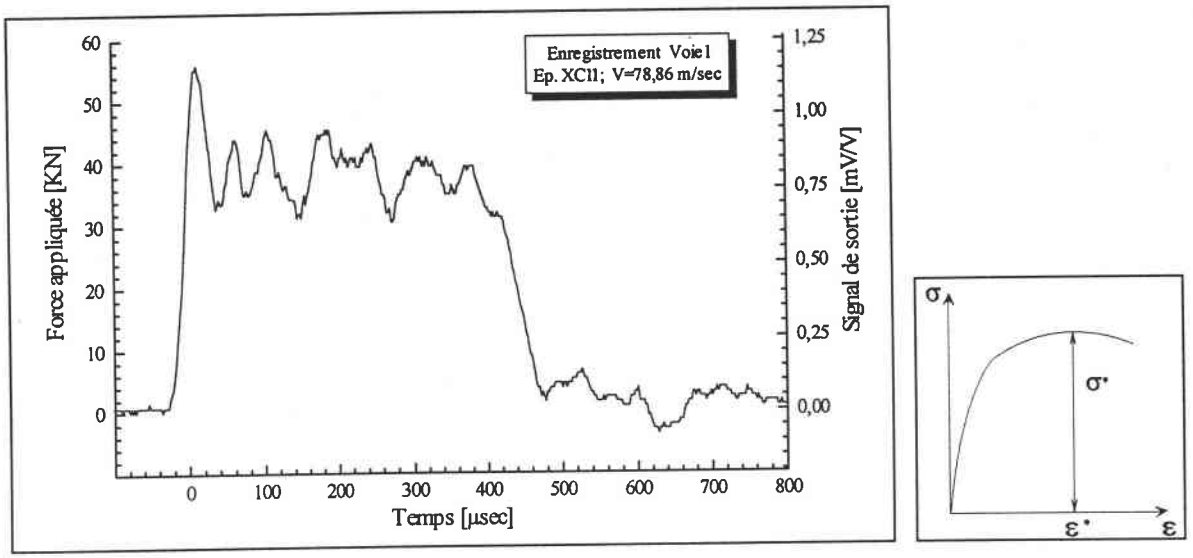


FIG. IV-19(a) : Essai à 78,8 m/sec ; XC-18 rainurée.

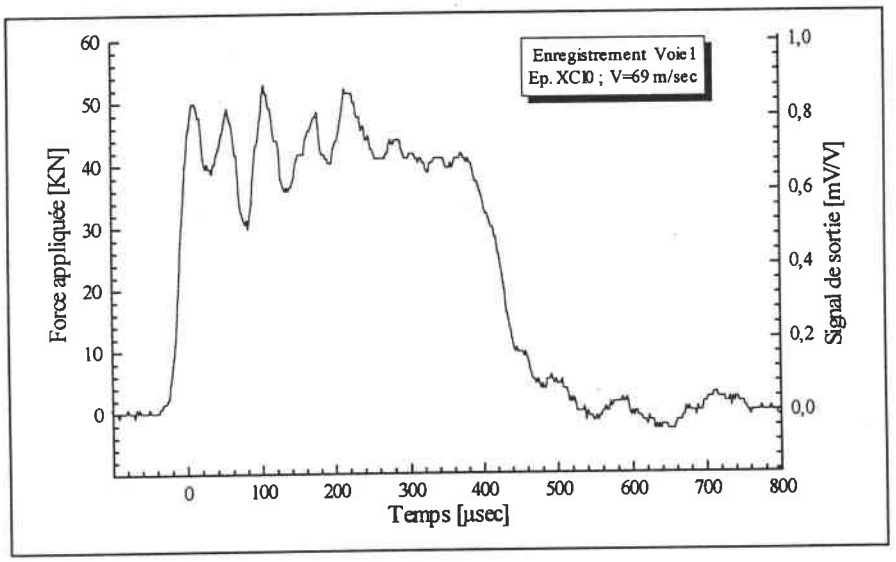


FIG. IV-19(b) : Essai à 69 m/sec ; XC-18 rainurée.

FIG. IV-19 : *Signaux de sortie des jauges pour un impact à 78,8 m/sec et à 69 m/sec sur une éprouvette XC-18 rainurée.*

Les essais et les efforts moyens mesurés sont reportés dans le tableau suivant. Deux niveaux d'efforts sont déterminés pour les éprouvettes cassées. Il s'agit de l'effort moyen "maximum", situé en début d'enregistrement; c'est la force critique d'amorçage de la rupture. Puis l'effort moyen "minimum", mesuré en fin d'enregistrement, juste avant la rupture de l'échantillon.

	Eprouvettes rainurées XC18		
	N° Eprouvette	Vitesse d'impact [m/sec]	Force appliquée [KN]
V < Vc	XC 23	40	38,1
	XC 24	45,2	38,8
V = Vc	XC 21	50	Maxi : 39,9 Mini : 17,6
	XC 20	54,8	Maxi : 40,2 Mini : 20,2
	XC 12	55	Maxi : 40,6 Mini : 21,5
V > Vc	XC 10	69	40
	XC 11	78,8	39,3

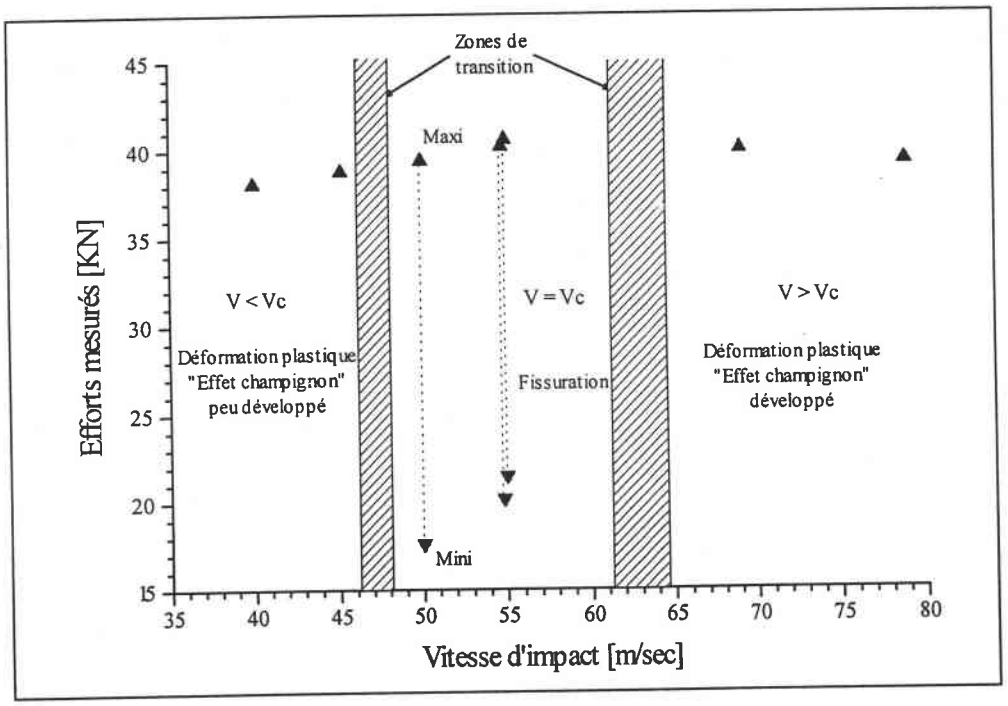


FIG. IV-20 : *Evolution des efforts moyens d'impact en fonction de la vitesse pour des éprouvettes rainurées.*

Les zones de transition restent à définir, mais les valeurs des efforts sont très voisines sur toute la gamme de vitesse. Ils croissent jusqu'à la zone V=Vc, atteignent le niveau nécessaire au déclenchement de la rupture et continuent encore à augmenter dans cette zone. Ils semblent ensuite arriver à un maximum, pour décroître progressivement dans la zone V<Vc. La fissuration s'effectue pour un intervalle d'effort très réduit qui se situe entre 40 et 41 KN environ.

V - CONCLUSION

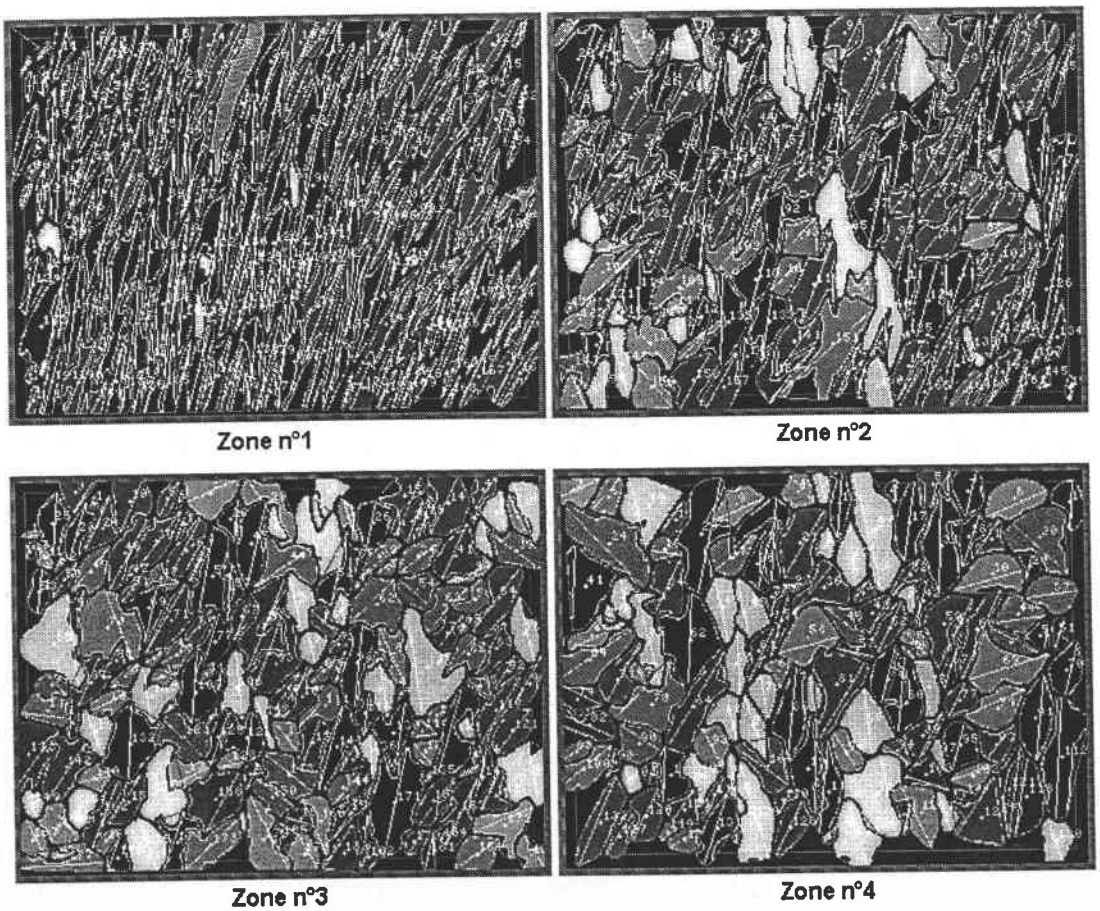
Des essais avec cette nouvelle géométrie d'éprouvette rainurées ont été réalisés ensuite sur l'acier 40-NCD-16 afin de comparer le mode de rupture avec ceux obtenus avec l'XC-18. Les résultats des impacts montrent un comportement des échantillons similaire à celui de l'ancienne géométrie avec des éprouvettes entaillées. Des plans de cisaillement sont générés et des fragments se forment exactement comme dans les cas précédents. La seule différence notable est un enfoncement plus prononcé du projectile dans l'éprouvette dû à une épaisseur de cisaillement plus faible.

Néanmoins, la capacité de notre montage à réaliser des impacts a été démontrée. Tous les essais ont été doublés et les résultats obtenus prouvent la reproductibilité des expériences tant au niveau des enregistrements des efforts, que des mesures des vitesses ou des comportements des éprouvettes.

Le mode de rupture des éprouvettes en 40-NCD-16 n'a encore jamais été rapporté dans la littérature. KALTHOFF & al. [60], MASON & al. [61] ou encore ZHOU & al. [14] obtiennent des B.C.A. parallèles à la direction d'impact. Ceci peut être dû à la distance entre les entailles qui est trop faible et créé des interférences entre les ondes de chargement conduisant à ce comportement. Toutefois la rupture obtenue sur les éprouvettes en XC-18 montre que cette configuration expérimentale est capable de produire un mode de chargement en cisaillement. La mise au point se poursuit pour trouver les bonnes proportions géométriques des éprouvettes en 40-NCD-16 et du projectile, qui permettront de créer des B.C.A. se propageant dans la direction des entailles. Elles deviendront alors visibles par l'intermédiaire des caméras rapides. Leur propagation ainsi filmée, il sera possible d'entamer une étude sur leurs comportements en fonction des vitesses d'impact.

CHAPITRE V

ANALYSE MICROSCOPIQUE DE LA DEFORMATION



Analyse numérique de la microstructure dans une éprouvette en acier XC-18.

CHAPITRE V

ANALYSE MICROSCOPIQUE DE LA DEFORMATION

Table des Matières

I - INTRODUCTION 110

II - PREPARATION DES ECHANTILLONS 111

III - PROCEDURE DE L'ANALYSE D'IMAGES 113

IV - TRAITEMENT DES DONNEES 116

IV - 1 : PREMIERE ETAPE : DISTRIBUTION DES GRAINS 117

IV - 2 : SECONDE ETAPE : VALEURS MOYENNES 120

IV - 3 : TROISIEME ETAPE : INFLUENCE DE LA VITESSE D'IMPACT 123

V - CONCLUSION 124

VI - RECAPITULATION DE LA PROCEDURE D'ANALYSE 126

Chapitre V

ANALYSE MICROSCOPIQUE DE LA DEFORMATION

I - INTRODUCTION

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent, au cours des essais accomplis sur les éprouvettes en acier XC-18, les observations des zones impactées font ressortir différents comportements en fonction de la vitesse d'impact. Une déformation plastique des échantillons, très concentrée au niveau de la face d'impact, sans formation de fissure et d'ampleur variable suivant la vitesse d'impact, apparaît aux basses vitesses tandis. Des fissures ou des B.C.A. ne se forment que pour une certaine gamme de vitesses plus élevées.

Les analyses microscopiques montrent qu'au voisinage des régions impactées, apparaissent des zones fortement cisaillées, lieu de formation des fissures ou des B.C.A., qui subissent des modifications de leur microstructure. Ces régions n'ont que quelques dizaines de micromètre de largeur et dans le reste de l'éprouvette, la microstructure n'évolue pas par rapport à son état initial. Il existe ainsi un gradient de déformation, de ces régions cisaillées où les grains sont déformés, vers les zones non affectées par l'impact.

Le but de ce chapitre est de présenter une nouvelle méthode pour définir les gradients de déformation, en déterminant l'évolution des déformations moyennes des grains, en fonction de leur position par rapport aux zones cisaillées.

Nous avons donc effectué, à l'aide d'une technique d'analyse d'images numériques, une étude morphologique de la microstructure, qui nous permet d'établir individuellement, les caractéristiques géométriques des grains (longueurs, largeurs, orientations, aires, etc...) qui la composent. Celle ci est réalisée sur plusieurs éprouvettes et dans quatre zones voisines plus ou moins éloignées des parties cisaillées.

Nous avons ensuite conçu et développé un logiciel qui recueille et traite les données de l'analyse numérique. Il permet de déterminer une valeur moyenne de chaque caractéristique géométrique, en fonction de la répartition des grains dans chaque zone, à partir desquelles les déformations seront calculées. L'évolution de ces caractéristiques peut ainsi être tracée d'une zone à l'autre, définissant un gradient de déformation. Cette étude est de plus menée sur un ensemble de quatre éprouvettes impactées à différentes vitesses, ce qui nous permet aussi de définir l'influence de la vitesse sur l'état de la microstructure.

II - PREPARATION DES ECHANTILLONS

Au cours d'un impact, une empreinte est produite par le projectile sur la face avant de l'éprouvette. Dans cette région, la microstructure initiale du matériau se retrouve alors fortement perturbée. Afin d'étudier la nature et l'ampleur des modifications engendrées, nous avons sélectionné un domaine de cette région que nous avons divisé en quatre zones, d'égales dimensions (300 μm x 200 μm), suivant le schéma représenté à la figure **V-1**. Le point d'origine de la partie étudiée est situé au niveau de l'arête créée par l'empreinte du projectile, comme montré à la figure **V-1**(b). A partir de cette position quatre zones numérotées de 1 à 4 ont été définies représentant une aire totale de 0,24 mm^2. Dans chacune de ces zones, une analyse microscopique de la structure du matériau a donc été réalisée.

La partie de l'éprouvette contenant l'empreinte du projectile a été découpée, puis polie. Une attaque au Nital à 2% (solution : Ethanol 98% - Acide nitrique 2%) de la surface polie permet de découvrir la structure métallographique de l'échantillon. Un exemple représentant une région impactée à 38m/sec et agrandie 50 fois est visible sur la figure **V-1**(b). Le champ de déformation de la structure dû à un cisaillement intense est nettement visible.

Les quatre zones distinctes sont choisies afin d'étudier plus particulièrement les variations de tailles et d'orientations des grains les uns par rapport aux autres. En effet si à l'état initial, les dimensions et les directions axiales des grains semblent

relativement variées, après l'impact il apparaît une certaine cohésion de ces caractéristiques au sein des parties fortement cisaillées.

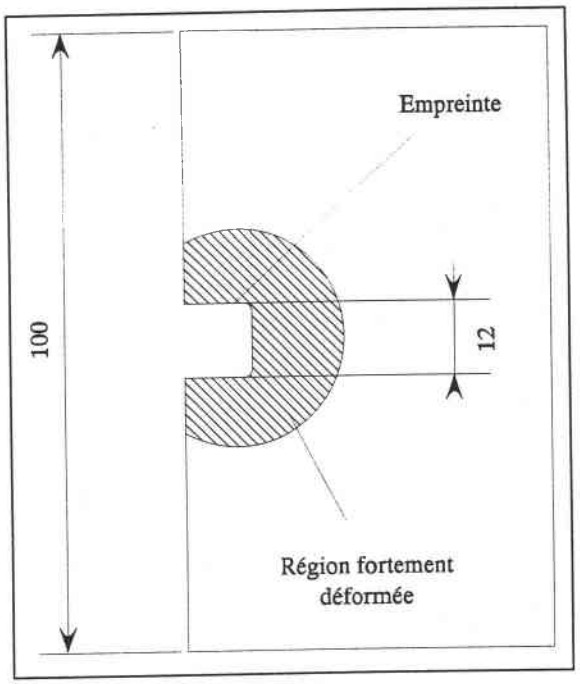


FIG. V-1(a)

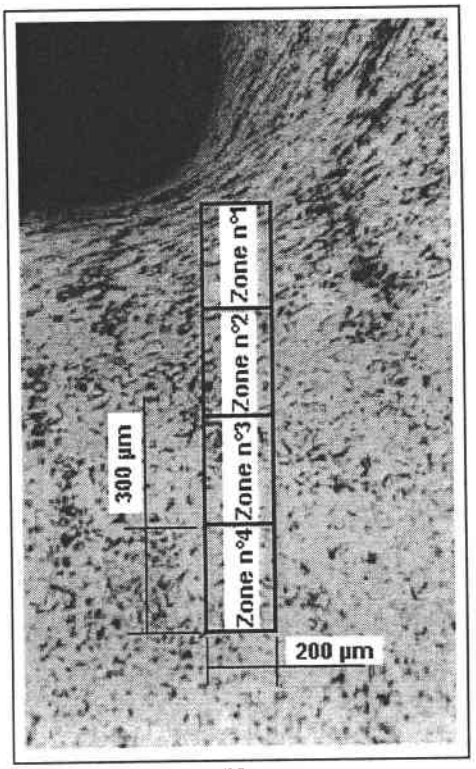


FIG. V-1(b)

FIG. V-1 : *Zones d'étude dans les éprouvettes impactées.*

La zone n° 4 est la plus distante de la partie la plus déformée, elle est située entre 900 μm et 1200 μm de l'empreinte. A cause de cet éloignement, sa structure granulaire est représentative de l'état initial non déformé du matériau. Elle est donc prise comme zone de référence pour déterminer les caractéristiques moyennes originelles des grains (longueur, largeur, aire, orientation).

Plus nous nous rapprochons de l'empreinte plus la structure est modifiée et évolue à l'intérieur des trois zones suivantes. Les nouvelles caractéristiques des particules propres à ces celle-ci sont alors établies et comparées avec les valeurs initiales déterminées dans la zone n° 4.

III - PROCEDURE DE L'ANALYSE D'IMAGES

Les différentes parties sélectionnées sont photographiées au microscope optique. Une série d'images est montrée à la figure **V-2** extraite d'un échantillon impacté à 48 m/sec (répertorié pour la suite XCO5). La zone la plus proche de l'empreinte est fortement cisaillée mais aucune fissure n'est apparue.

Nous remarquons notamment (dans la zone n° 1) une orientation très nette des grains ainsi qu'un fort allongement dans une direction proche de celle de l'impact. L'examen de plusieurs éprouvettes au même point fait apparaître un comportement similaire mais avec des variations des caractéristiques géométriques des grains en fonction de la vitesse d'impact. Le comportement des particules peut être alors représenté schématiquement tel qu'à la figure **V-3**. Le travail mené au cours de cette étude permet de quantifier les variations de tailles et d'orientations et d'analyser l'influence de la vitesse de l'impact sur la déformation finale des grains.

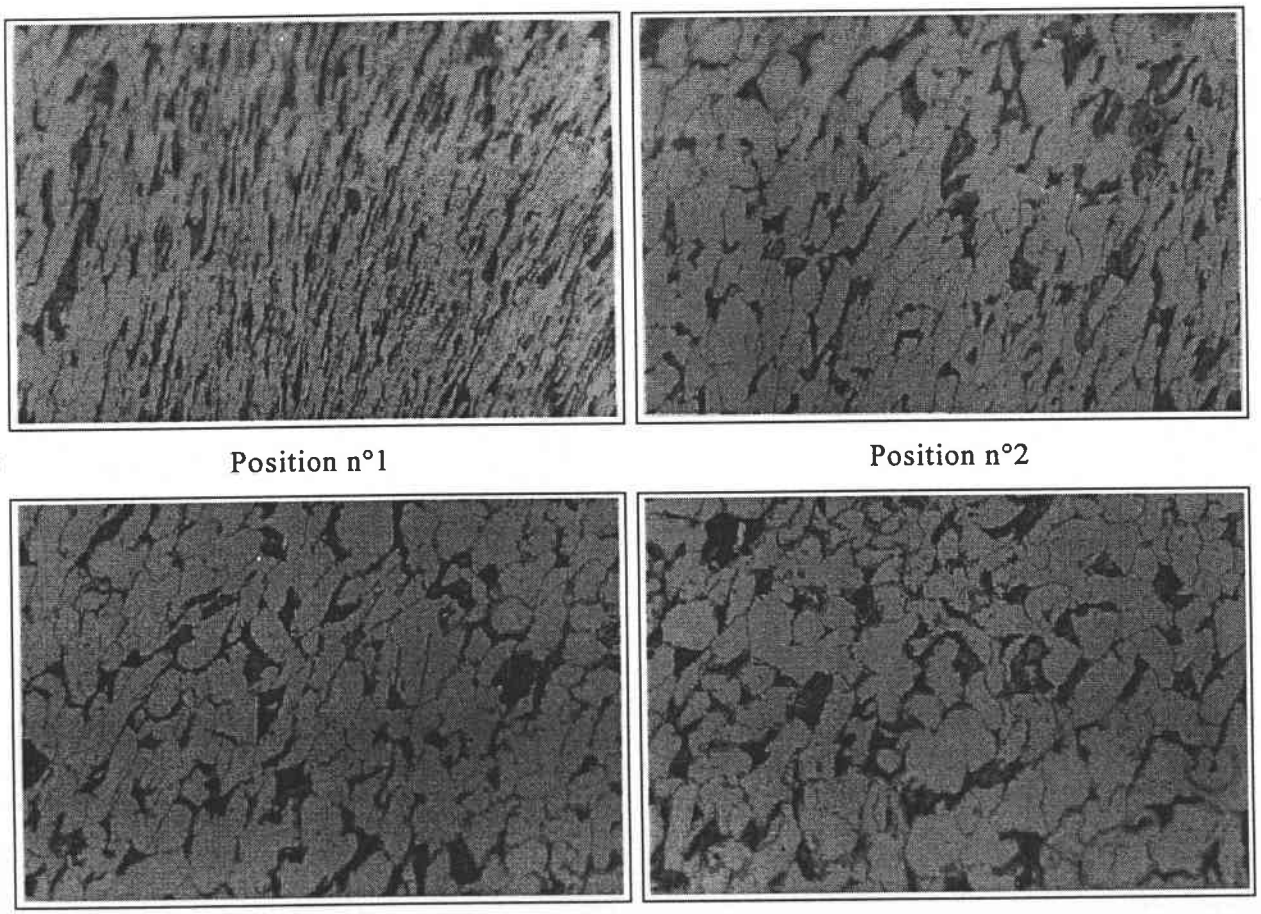


FIG. V-2 : *Exemple de l'évolution de la structure dans les différentes zones d'une éprouvette (XC05) impactée à 45 m/sec.*

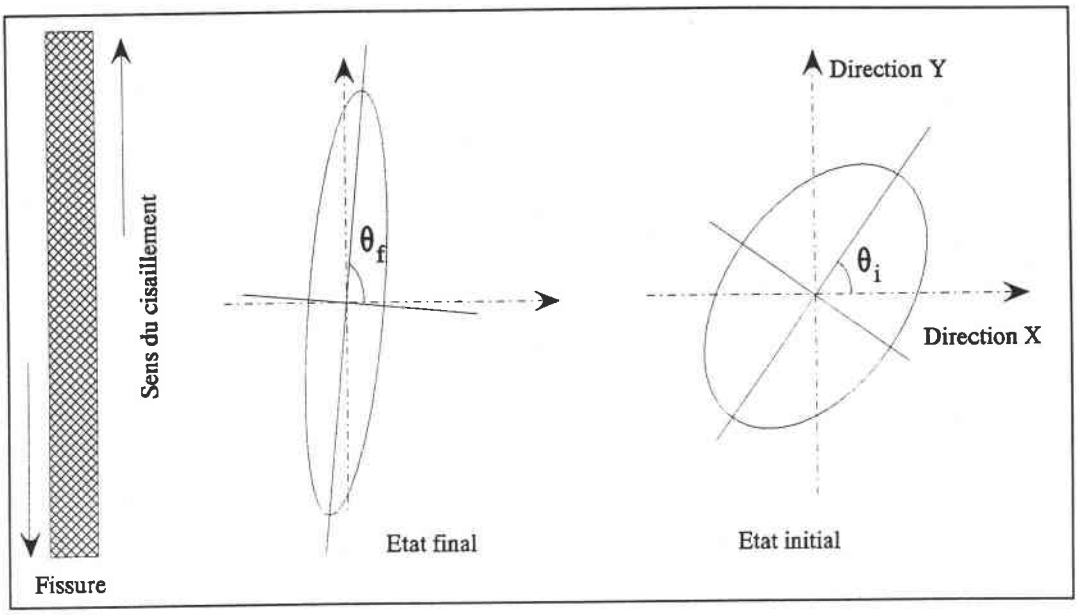


FIG. V-3 : *Déformation des grains au cours d'un impact.*

La caractérisation de la structure est basée sur une technique d'analyse d'images numériques, effectuée sur les différentes zones. Nous utilisons à cet effet un logiciel spécialisé dans l'étude des images numérisées : "VOYAGER ". Il peut réaliser plusieurs opérations qui permettent de déterminer les caractéristiques géométriques individuelles de chacun des grains d'une zone. La figure **V-4** montre la représentation d'une particule numérisée avec ses caractéristiques géométriques telles qu'elles sont définies par le logiciel "VOYAGER".

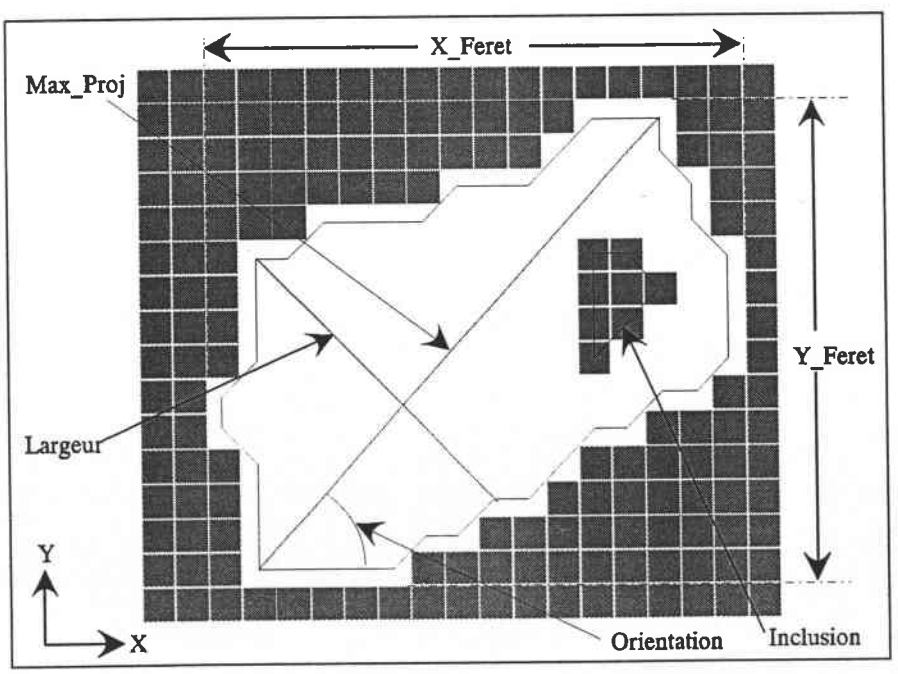


FIG. V-4 : *Particule numérisée et ses caractéristiques géométriques.*

Il acquiert une image numérique, via la cellule CCD d'une caméra, de la photographie de la structure du matériau. Il repère les zones sombres engendrées par les joints de grains et trace ainsi le contour de chaque particule. La définition de l'image numérisée, et donc des particules traitées, est liée à celle de la cellule CCD (512 x 512 pixels). Un contour fermé représente une particule à laquelle il devient possible d'associer plusieurs grandeurs géométriques.

Pour cette étude nous avons sélectionné les dimensions suivantes :

* *X - Feret* : est la projection sur l'axe X de la particule.

* *Y - Feret* : est la projection sur l'axe Y de la particule.

* *Max-Proj* : est la plus grande distance entre deux points du périmètre de la particule (appelée *Longueur* dans la suite).

* *Largeur* : est la plus grande distance entre deux points du périmètre dans la direction perpendiculaire à *Max-Proj.*

* *Orientation* : est l'angle entre l'axe X et la direction de *Max-Proj.* (Il est compté positif dans le sens antitrigonométrique)

* *Aire* : est le nombre de pixels contenus dans la particule.

* *Aspect-ratio* : est le rapport entre *Max-Proj* et *largeur.*

Ce sont donc sept catégories d'étude qui sont définies. Pour chaque photo, tous les grains sont isolés, répertoriés et analysés individuellement dans chacune de ces catégories. La figure **V-5** montre un résultat d'une telle décomposition après numérisation. Il s'agit du traitement de la série de photos de l'échantillon XC05 impacté à 45 m/sec visible sur la figure **V-4**. Dans cet exemple chacune des particules est associée à un niveau de gris suivant son orientation. Vingt niveaux sont définis qui couvrent l'intervalle [+90° ; -90°]. L'orientation dans le sens de l'impact correspond à la valeur -90°.

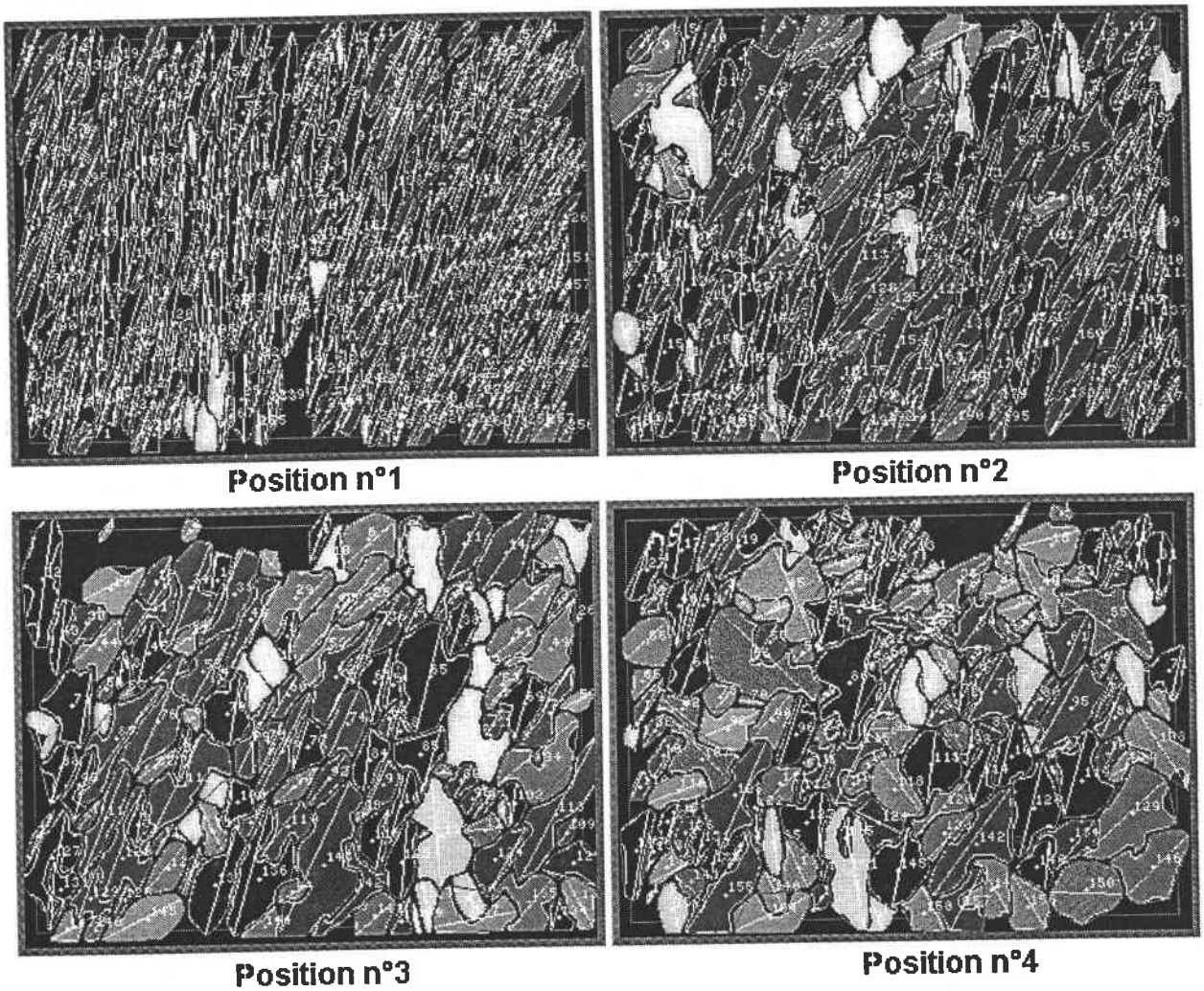


FIG. V-5 : *Résultat d'une analyse d'image sur une éprouvette (XC05) impactée à 45 m/sec.*

IV - TRAITEMENT DES DONNEES

Dans cette étude, nous étudions en tout quatre éprouvettes en XC-18, impactées à différentes vitesses V_1 = 28m/sec, V_2 = 32 m/sec, V_3 = 38 m/sec et V_4 = 45 m/sec. Rappelons que chaque éprouvette est analysée grâce à quatre images qui représentent en tout quelques centaines de particules. Avec ce logiciel, chaque image ne peut être traitée qu'individuellement. Les fichiers des caractéristiques géométriques des grains (longueur, etc...), associés à chaque photographie sont donc recueillis séparément.

La seconde partie de ce travail consiste à regrouper les quatre fichiers des données d'analyse d'une même éprouvette afin de pouvoir les comparer et déterminer ainsi une évolution des caractéristiques des grains au sein d'un échantillon. La totalité des

fichiers des éprouvettes sont donc transférés et assemblés sous la base de données du logiciel EXCEL V. Nous avons ensuite conçu un programme écrit en macro programmation EXCEL qui traite l'ensemble de ces données.

Dans un premier temps nous déterminons une distribution des grains dans chaque catégorie (*Longueur, Largeur, Orientation...*) par intervalles réguliers. Ensuite, nous calculons les valeurs moyennes de ces caractéristiques en fonction de la distribution précédemment établie. Cette valeur est définie à partir d'un nombre de grains qui représente au moins 90% du total. Cette opération est renouvelée pour les quatre zones et pour toutes les éprouvettes. Il est ensuite possible de tracer l'évolution de ces moyennes en fonction de la distance par rapport à l'empreinte.

Le traitement des données s'effectue donc en 2 étapes principales qui sont :

* Détermination de la répartition des grains au sein de chaque catégorie.
* Calcul des caractéristiques dimensionnelles moyennes dans ces catégories en fonction de la répartition.

IV - 1 : Premiere Etape : Distribution des Grains

Pour établir une répartition des grains, la première opération consiste à trouver parmi toutes les données des éprouvettes traitées, la valeur maximum dans chaque catégorie. Par exemple, le logiciel a déterminé une longueur maximum des grains de 118,4 μm dans la catégorie *Max_Proj* pour l'échantillon XCO3 et pour la position n°1 (cf. tableau représenté à la figure **V-6**). Un domaine d'analyse pour l'ensemble des éprouvettes, dans ce cas *Max_Proj* [0 μm ; 118,4 μm], est donc défini dans lequel nous allons établir une répartition des grains par intervalles réguliers.

	AREA (μm^2)	X_FERET (μm)	Y_FERET (μm)	MAX_PROJ (μm)	ORIENTATION (°)	LARGEUR (μm)	ASPECT_RA
XC02	2862 (n°3)		98,70 (n°3)				
XC03		76,30 (n°1)		118,4 (n°1)			
XC04							
XC05					- 90 (n°1)	39,85 (n°4)	13,95 (n°1)

Fig. V-6 : *Valeurs maximum des dimensions géométriques en fonction de l'échantillon et de la position.*

Nous obtenons alors une distribution des grains, associée à chaque position à l'intérieur d'une catégorie. L'exemple de la figure **V-7** détaille cette répartition entre [-90° et +90° par intervalle de 4,5°] pour l'échantillon XC05 dans la catégorie *Orientation*.

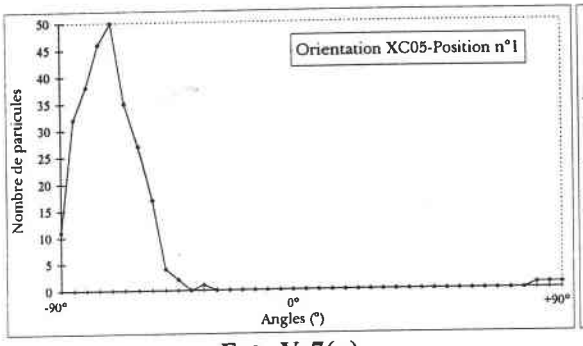


FIG. V-7(a)

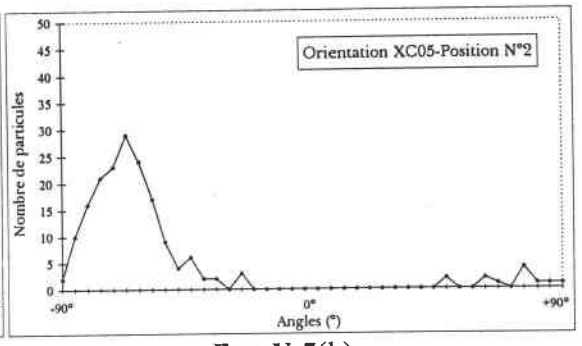


FIG. V-7(b)

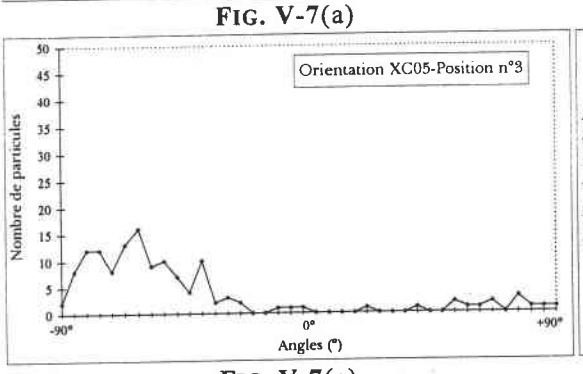


FIG. V-7(c)

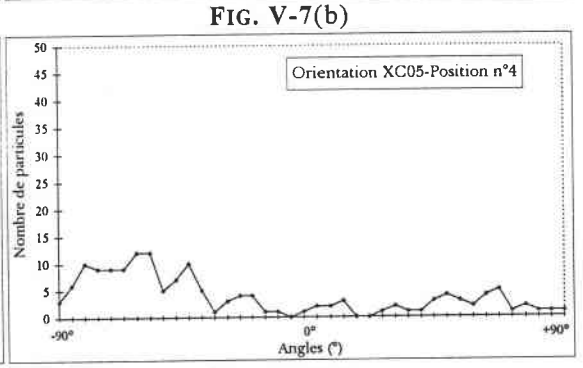


FIG. V-7(d)

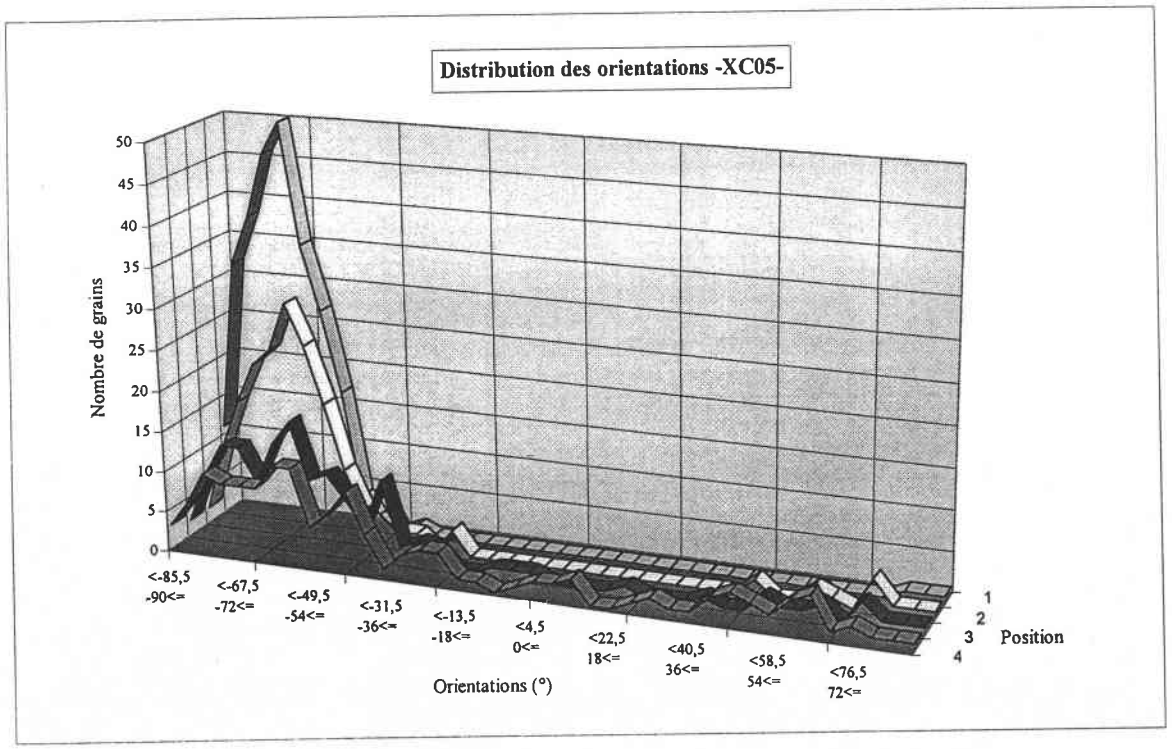


FIG. V-7 : *Exemple de distribution des grains dans la catégorie "Orientation" en fonction de leur position dans l'échantillon XC05.*

La position n°4 correspondant à l'état non déformé, nous voyons une répartition plus ou moins uniforme sur le domaine, avec au maximum une dizaine de grains dans chaque intervalle. Au fur et à mesure que l'on se rapproche de la position n°1, proche de l'empreinte de l'impact, soit [0 μm ; 300 μm], le nombre de particules d'une orientation proche de la direction d'impact augmente sensiblement, pour finalement atteindre environ une proportion de 80% des grains orientés entre -90° et -63°.

Sur la figure **V-8** est montré le résultat du calcul pour la catégorie *Largeur,* effectué sur le domaine [0 μm - 39,85 μm par intervalles de 0,99 μm] pour l'échantillon XC05. Ici aussi la largeur des grains semble à peu prés homogène dans la première zone, alors que le nombre de particules de faible largeur augmente lorsque la distance par rapport à la zone d'impact diminue.

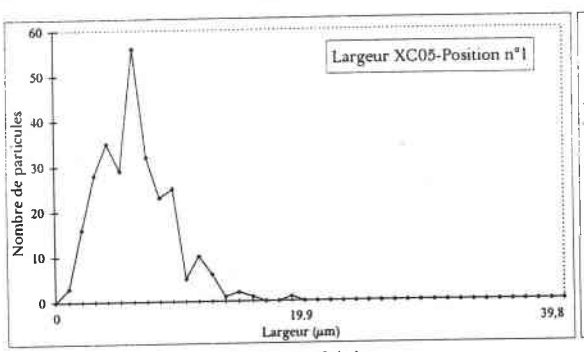


FIG. V-8(a)

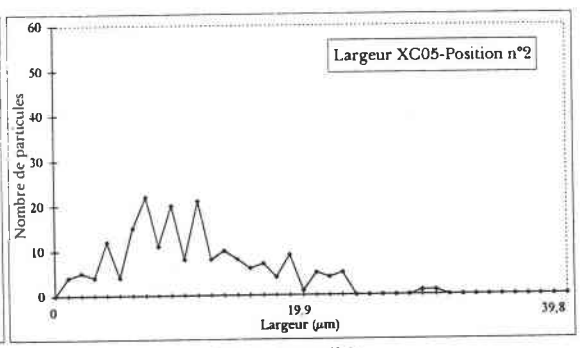


FIG. V-8(b)

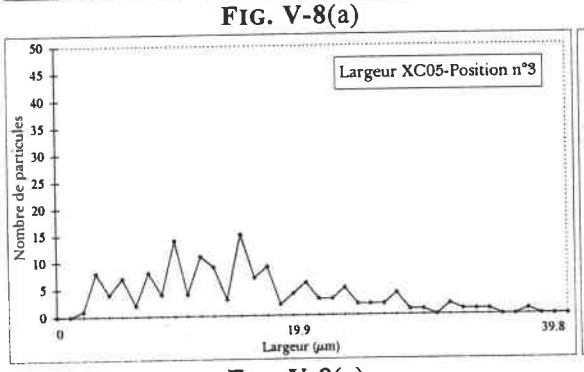


FIG. V-8(c)

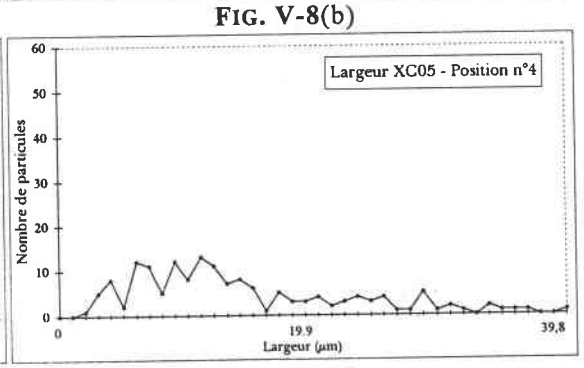


FIG. V-8(d)

FIG. V-8 : *Exemple de distribution des grains dans la catégorie "largeur" en fonction de la position dans l'échantillon XC05.*

Cette opération de répartition est menée pour chacune des caractéristiques dimensionnelles et pour chaque éprouvette. Une répartition globale est ainsi obtenue qui va nous permettre d'entreprendre la seconde partie de l'étude. Celle-ci consiste à déterminer une valeur moyenne dans chaque catégorie, en fonction de la distribution définie à chaque position, puis de tracer l'évolution de cette valeur en fonction de la position.

IV - 2 : Seconde Etape : Valeurs Moyennes

Prenons le cas de la figure **V-7**(d) pour exemple. Une grande majorité des particules de la zone n°1, environ 97 %, ont une orientation comprise entre -90° et -45°. Il convient donc de calculer la moyenne des orientations sur cet ensemble de valeur et non pas sur le domaine entier [+90°;-90°], ce qui donnerait une fausse indication de la représentation au sein de la catégorie. La valeur moyenne ainsi déterminée est de -69,9°.

En fait, la moyenne des caractéristiques dimensionnelles n'est pas calculée sur la totalité des grains mais sur une partie du domaine où sont présentes environ 90 à 95% des particules. Les moins représentées ne sont pas prises en comptes. Ce schéma de calcul est repris pour les quatre autres zones de l'éprouvette et finalement nous pouvons tracer l'évolution des caractéristiques moyennes des grains au sein d'un échantillon.

Les figures **V-9**(a)(b)(c)(d)(e) et (f) décrivent respectivement les évolutions des moyennes des longueurs (L), des largeurs (l), des dimensions suivant l'axe Y, des dimensions suivant l'axe X, des orientations (θ) et du rapport (L/l) pour l'éprouvette XC05.

L'abscisse "x=4" correspond à la zone de la microstructure initiale où le matériau est considéré comme non déformé, soit [900 μm ; 1200 μm]. L'abscisse "x=1" est la plus proche de l'empreinte de l'impact soit [0 μm ; 300 μm]. Ces courbes montrent une augmentation de la longueur des grains de 31,35 μm à 47,52 μm lorsque l'on se rapproche de "x=1". Dans le même temps, leur largeur diminue de 16,35 μm à 7,01 μm et leur orientation de -69,9° se rapproche celle de la direction de l'impact (-90°). La projection des dimensions sur les axes X et Y, perpendiculaire et parallèle à la direction d'impact indiquent aussi un étirement des grains dans cette direction. Les résultats sur cet essai montrent l'influence de l'impact sur la structure du matériau. La texture initiale évolue graduellement jusqu'à la zone de l'empreinte du projectile. La géométrie des grains subit une forte modification qui se traduit par un allongement et une orientation dans la direction de l'impact dus à la pénétration.

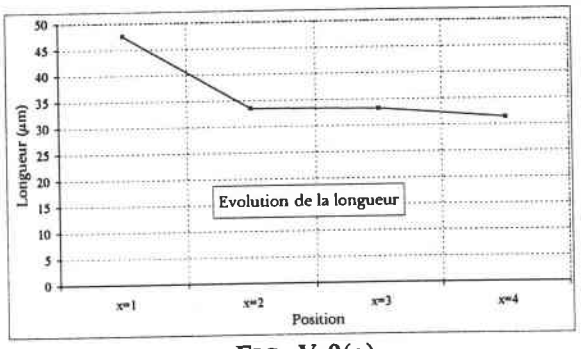


FIG. V-9(a)

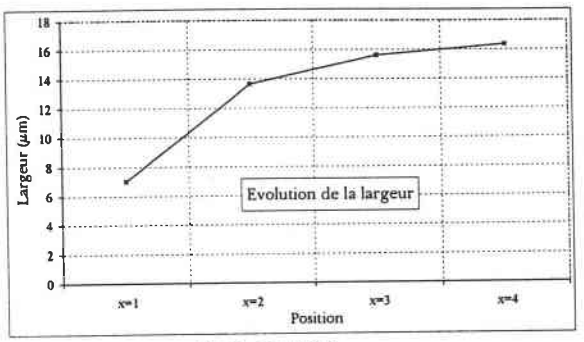


FIG. V-9(b)

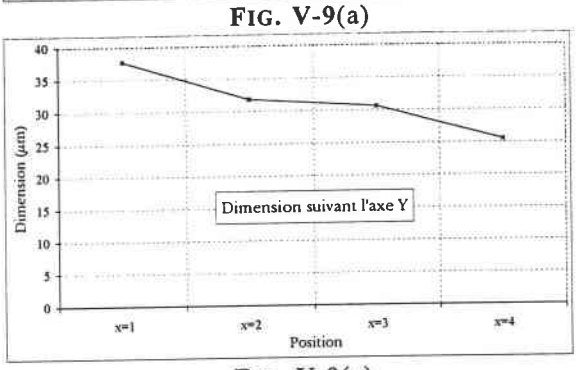


FIG. V-9(c)

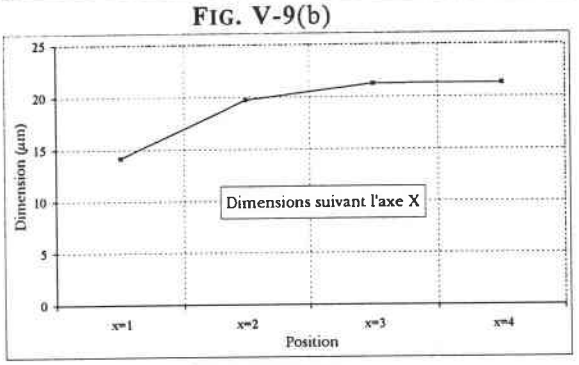


FIG. V-9(d)

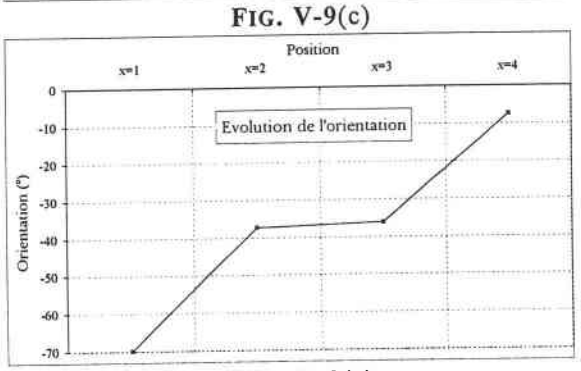


FIG. V-9(e)

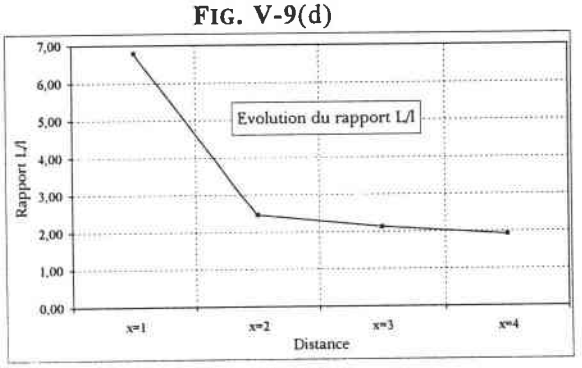


FIG. V-9(f)

FIG. V-9 : *Evolutions des moyennes des paramètres dimensionnels en fonction de la position dans l'échantillon XC05.*

La texture de la position "x=4" étant prise comme référence de l'état initial, les déformations moyennes ε_{moy} subies par les grains peuvent être déterminées pour les trois zones suivantes. Celles-ci sont déterminées à l'aide de la relation :

$$\varepsilon_{moy} = \frac{L}{L_0} - 1$$

avec L : Dimension initiale,

L_0 : Dimension à l'état déformé.

Les résultats des déformations en longueur, en largeur sont présentés sur les figures **V-10**(a)(b).

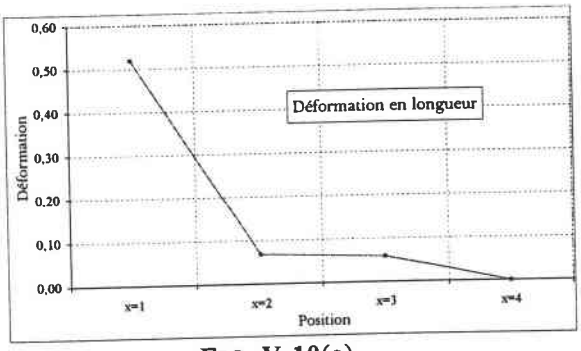


FIG. V-10(a)

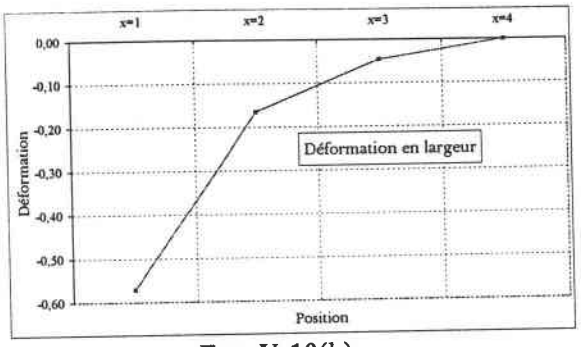


FIG. V-10(b)

FIG. V-10 : *Evolution de la déformation des grains en fonction de la position dans l'échantillon XC05.*

Ces courbes montrent notamment une croissance faible mais régulière de la déformation en longueur dans les zones les plus éloignées [300 μm à 1200 μm] puis brusquement une très forte augmentation de la déformation dans le domaine [0 μm ; 300 μm], où elle atteint la valeur de 0,52 alors qu'elle n'est que de 0,07 dans la zone précédente. Ceci semble indiquer une forte localisation de la déformation dans la zone la plus proche de l'impact, qui a tendance à allonger fortement les grains. Dans le même temps, la déformation en largeur des grains suit une progression quasi-identique. Régulière dans un premier temps, elle augmente d'un facteur d'environ 3 dans le dernier stade. La courbe **V-9**(d) montre qu'à l'allongement des grains est associée une rotation qui a tendance à les orienter dans une unique direction qui est celle de l'impact.

Rappelons que ces résultats sont extraits d'un échantillon impacté à 45m/sec. La troisième partie du logiciel et la dernière partie de cette étude est la comparaison de ces comportements avec les autres éprouvettes soumises à des vitesses d'impact différentes.

IV - 3 : TROISIEME ETAPE : INFLUENCE DE LA VITESSE D'IMPACT

Une analyse identique à celle décrite précédemment et portée sur l'éprouvette XCO5 (45 m/sec) a été effectuée sur trois autres spécimens impactés aux vitesses V_1= 28m/sec, V_2= 32 m/sec, V_3= 38 m/sec.

Pour cette dernière partie, nous nous sommes intéressés tout particulièrement à la zone comprise entre 0 μm et 300 μm. Elle est la plus intéressante, c'est en effet dans ce domaine que les modifications de la structure sont les plus marquées. Les résultats concernant les évolutions des orientations des grains ainsi que les déformations associées en fonction de la vitesse d'impact sont présentés aux figures **V-11** (a)(b)(c)(d) et (e).

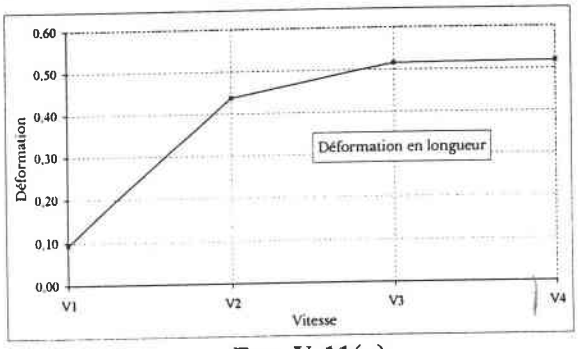


FIG. V-11(a)

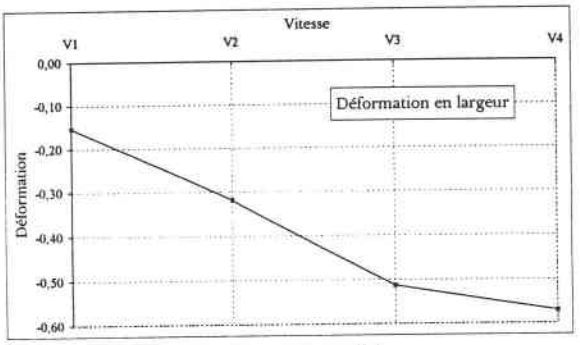


FIG. V-11(b)

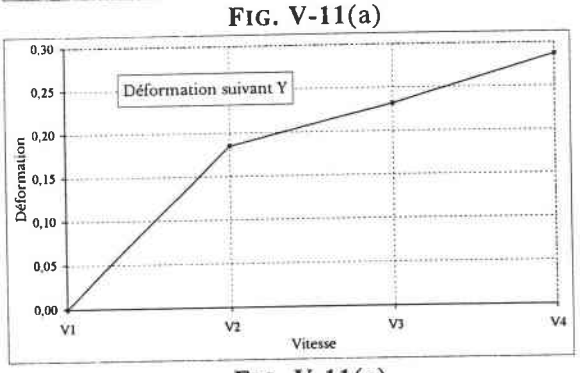


FIG. V-11(c)

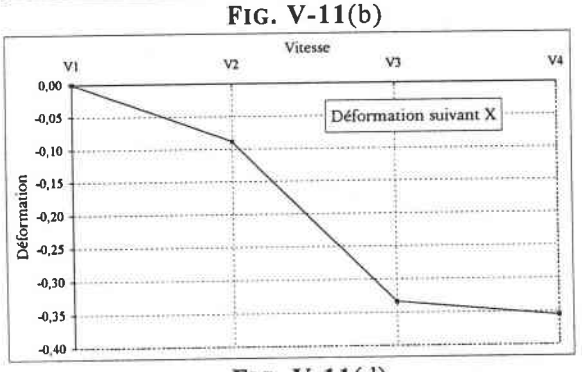


FIG. V-11(d)

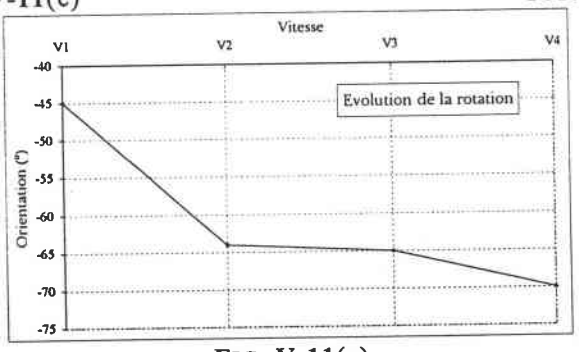


FIG. V-11(e)

FIG. V-11 : *Evolution de la déformation en fonction de la vitesse d'impact dans la zone [0 µm - 300 µm].*

Les grains semblent subir des déformations assez élevées dès les faibles vitesses d'impact. En effet la déformation en longueur augmente fortement entre 28 m/sec et 32 m/sec passant de 0,09 à 0,44. Alors qu'entre 32 m/sec et 38 m/sec cette déformation progresse de 0,44 à 0,52. Ensuite, elle n'évolue quasiment plus entre 38 m/sec et 45 m/sec.

Un comportement presque similaire est visible en ce qui concerne les déformations en largeur où la variation entre deux états de déformation est beaucoup plus faible pour les vitesses élevées.

Il faut atteindre ce niveau de vitesses pour remarquer une orientation sensible des grains vers la direction d'impact. Cependant, la zone d'étude, large de 300 μm est sans doute trop grande pour que tous les grains qu'elle contient soient orientés à 90°, même pour des vitesses plus importantes. C'est sans doute la raison pour laquelle la valeur moyenne la plus haute des orientations se situe à environ -70°.

IV - CONCLUSION

Cette étude menée dans ce chapitre, présente une nouvelle méthode pour déterminer les gradients de déformation plastique, via l'analyse d'images numériques et l'analyse statistique des grains déformés. L'objectif est d'analyser l'évolution de la microstructure d'une éprouvette en fonction de la position par rapport à la zone cisaillée et en fonction de la vitesse d'impact. Une méthode basée sur l'utilisation d'un logiciel d'analyse d'images numérisées a été utilisée, permettant de définir certaines caractéristiques géométriques des grains de la structure et d'en établir individuellement l'état dans chacune des zones.

Un logiciel que nous avons développé utilisant une base de données a permis de déterminer dans un premier temps une répartition des grains dans les différentes zones en fonction de l'état de leurs caractéristiques. Nous avons quantifié la variation de dimensions telles que la longueur, la largeur ou l'orientation des grains et ainsi décrit leur évolution en fonction de la position dans l'échantillon.

Cette analyse menée simultanément sur plusieurs éprouvettes soumises à différentes vitesses d'impact a établi l'influence de ce paramètre sur la variation des caractéristiques géométriques dans la zone proche de l'impact. Les déformations des grains ont aussi été calculées. Les calculs montrent une forte progression des déformations en longueur et en largeur dans le domaine des faibles vitesses d'impact puis une tendance à une saturation vers les vitesses plus élevées.

V - RECAPITULATION DE LA PROCEDURE D'ANALYSE

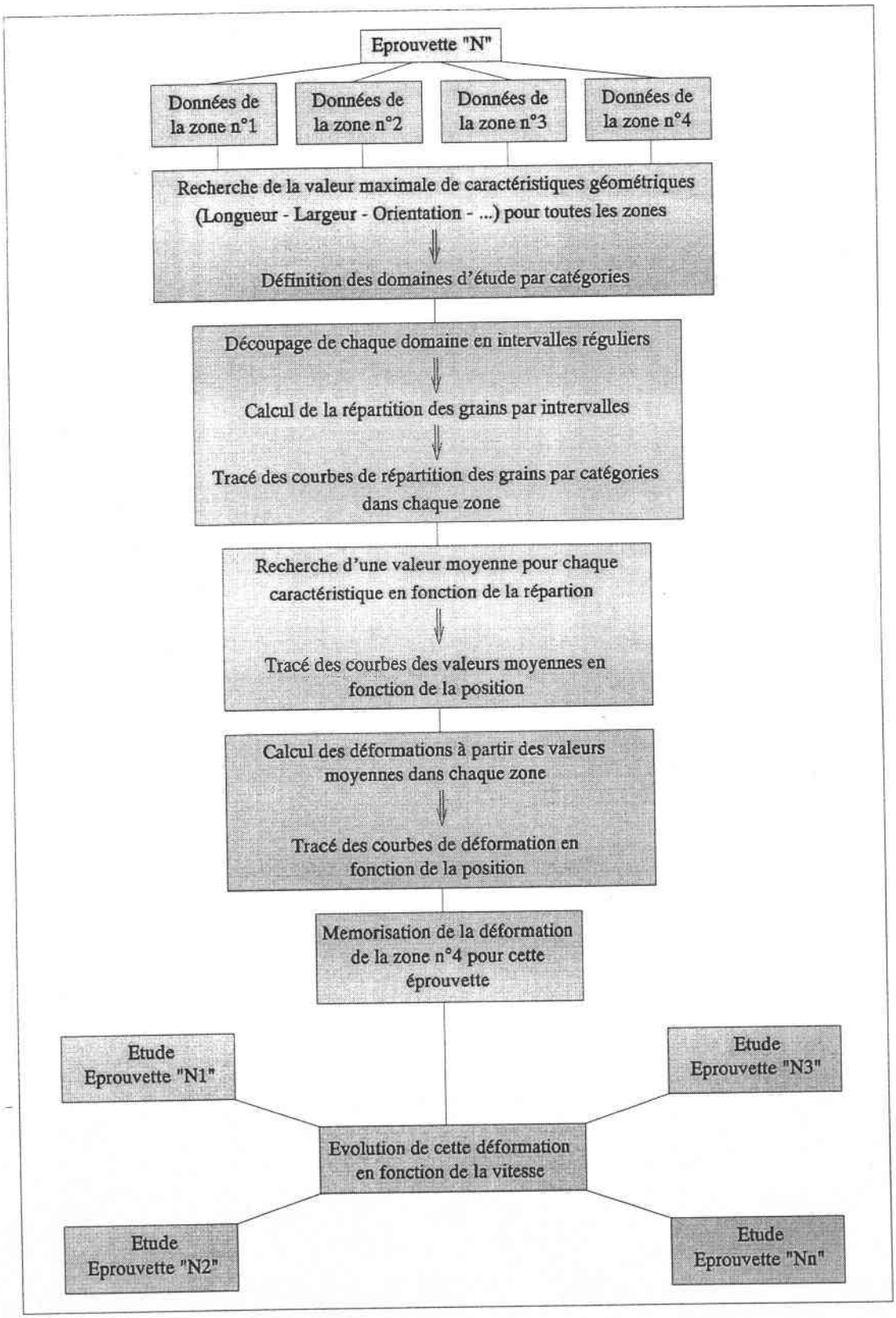
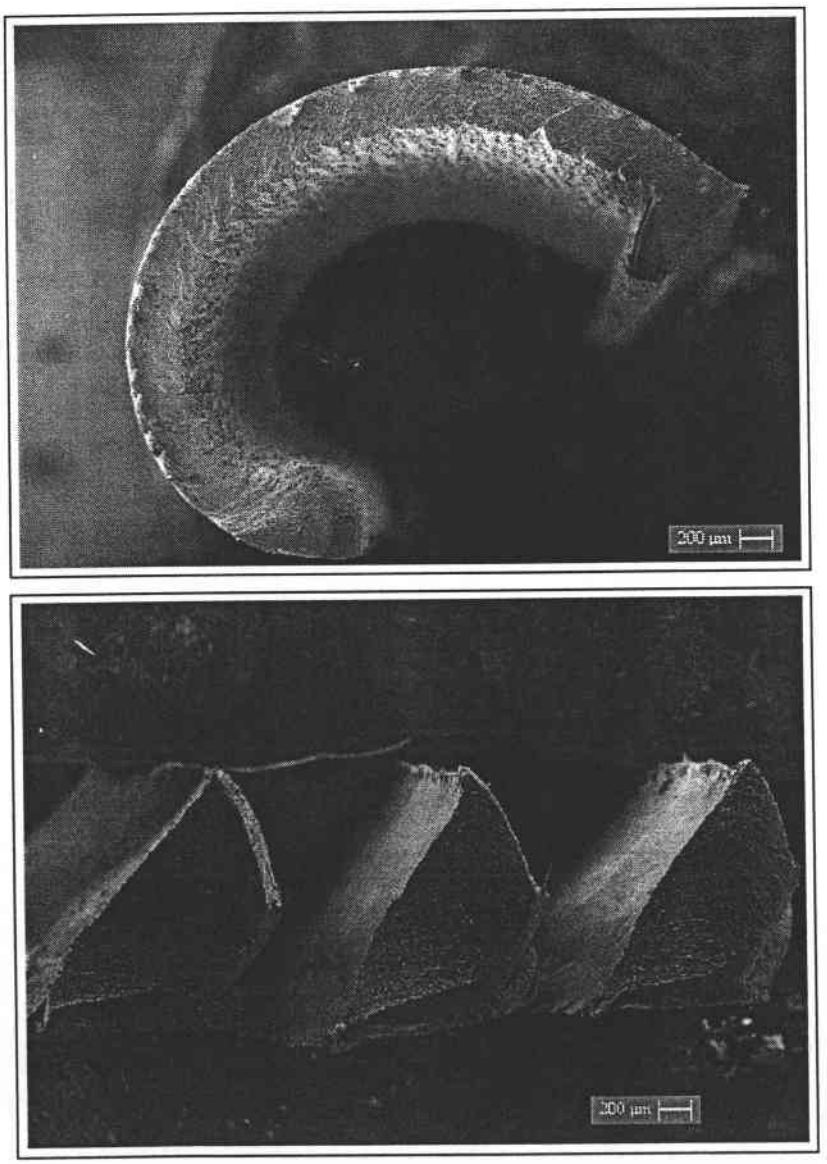


FIG. V-12 : *Procédure d'analyse.*

CHAPITRE VI

USINAGE TRES GRANDE VITESSE



Copeaux obtenus en usinage grande vitesse.

CHAPITRE VI

USINAGE TRES GRANDE VITESSE

Table des Matières

I - INTRODUCTION **127**

II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL **127**

II - 1 : PRINCIPE DU DISPOSITIF 128

II - 2 : TETE PORTE-OUTIL ET PROJECTILE 129

II - 2.1 : TETE PORTE-OUTIL 129

II - 2.2 : PROJECTILE 130

III - RESULTATS EXPERIMENTAUX **130**

III - 1 : FORMATION D'UN COPEAU 131

III - 2 : MORPHOLOGIE DES COPEAUX 133

III - 3 : ETUDE DES EFFORTS DE COUPE 138

III - 3.1 : ACIER MI-DUR 140

III - 3.2 : ACIER DUR 142

IV - CONCLUSION **144**

Chapitre VI

USINAGE TRES GRANDE VITESSE

I - INTRODUCTION

Le banc d'essai expérimental est aussi conçu pour permettre l'étude du cisaillement adiabatique lors de l'usinage des métaux aux très grandes vitesses de coupe. Quelques différences de principe, notamment au niveau de la tête support et du projectile apparaissent par rapport au dispositif d'impact présenté précédemment.

En production, les vitesses de coupe les plus couramment utilisées se situent aux environ de 100 à 200 m/min. Cependant durant ces dernières années un intérêt croissant s'est développé pour l'Usinage Très Grande Vitesse (U.T.G.V.), correspondant à des vitesses de coupe supérieures à 2500 m/min environ. Cet intérêt est suscité par les gains de productivité qui sont engendrés grâce à cette technique, ou encore par les états de surface obtenus, qui peuvent permettre la suppression de certaines phases de finition. De plus certains matériaux nouveaux ne sont usinables qu'avec des vitesses de coupe très élevées. L'augmentation de la rentabilité ainsi que l'élaboration de nouvelles techniques de mises en forme sont les principales motivations qui poussent les chercheurs et les industriels à explorer la gamme des très hautes vitesses en usinage.

II - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le dispositif d'usinage rapide est identique à celui utilisé pour l'impact sauf au niveau de la tête et du projectile. La différence fondamentale est qu'après la coupe, le projectile va continuer sa course dans le tube d'HOPKINSON pour être stoppé en bout par un amortisseur. En fonction du poids des projectiles utilisés, une gamme de vitesses de coupe s'échelonnant de 7 à 100 m/sec peut être obtenue.

II - 1 : Principe du Dispositif

La figure **VI-1** montre le principe de la coupe orthogonale réalisée sur le canon. Celle-ci est effectuée au moyen de deux outils au carbure disposés de manière diamétralement opposée sur la tête porte-outil. L'éprouvette est quant à elle supportée par le projectile et est située sur sa face avant.

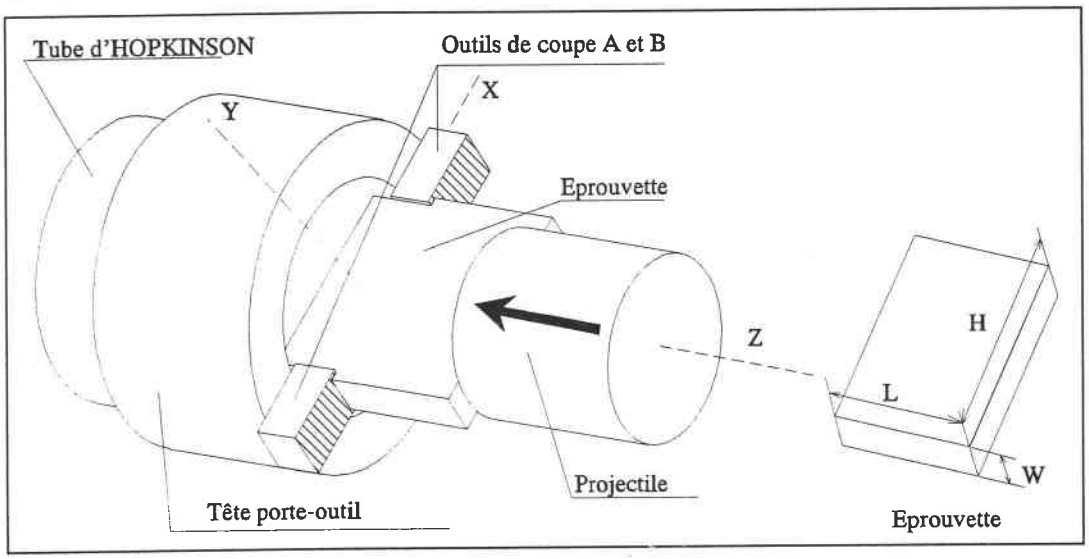


Fig. VI-1 : *Représentation de la coupe orthogonale sur le dispositif expérimental.*

Cette configuration permet de réaliser une longueur de coupe pouvant atteindre 35 mm, une largeur de 10 mm et une profondeur maximale de 1 mm. En effet pour des dimensions géométriques plus grandes, les efforts engendrés lors de la coupe seraient trop élevés et la puissance du lanceur ne serait plus suffisante pour assurer un usinage quasi-stationnaire. La variation de vitesse du projectile due à l'absorption de son énergie cinétique pendant le processus de coupe serait trop importante, pouvant provoquer son arrêt complet pendant l'usinage.

Différents projectiles sont donc utilisés en fonction des vitesses de coupe désirées pour minimiser les variations d'énergie cinétique lors de l'usinage. Un projectile en acier d'une masse de 1,5 kg pour les faibles vitesses, jusqu'à 30 m/sec, un autre en aluminium de 700 grammes pour une gamme de vitesses moyennes, de 30 à 70 m/sec. Enfin un projectile en matière plastique, d'une masse de 450 grammes est utilisé pour les grandes vitesses. En procédant ainsi, l'énergie cinétique du projectile est toujours suffisante par rapport aux efforts de coupe pour que nous ayons à la fin de l'usinage une variation de vitesse du projectile inférieure à 4% de sa vitesse initiale.

II - 2 : TETE PORTE-OUTIL ET PROJECTILE

II - 2.1 : TETE PORTE-OUTIL

La tête est utilisée pour supporter les outils carbures. Ceux-ci ne possèdent pas d'arêtes brise-copeaux. Ceci permet de vérifier l'aptitude de l'U.T.G.V. à générer des copeaux segmentés, qui est un effet souhaité en usinage. La tête est réalisée en acier 42-CD-4 et a subi un traitement thermique analogue à celle du dispositif d'impact afin de supporter les chocs répétés.

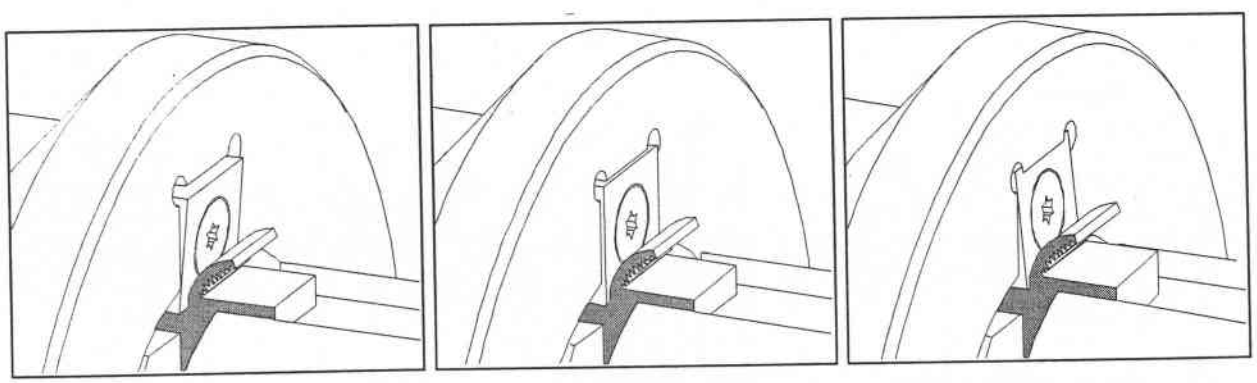
De plus des jauges d'extensomètrie, montées en pont complet, sont collées sur cette tête dans une zone située à l'arrière des outils de coupe. Le signal obtenu est ainsi lié à la déformation d'une partie fortement sollicitée et est plus intense que celui du tube d'HOPKINSON. La force mesurée par ces ponts est la force moyenne donnée par :

$$F_m = \frac{F_A + F_B}{2}$$

avec F_A et F_B les efforts longitudinaux de coupe exercés respectivement sur les outils A et B.

L'étalonnage du pont de la tête est obtenu en effectuant des essais de coupe sur la machine de traction hydraulique ZWICK présentée au chapitre I, jusqu'à des vitesses de 4 m/sec. Le calibrage est réalisé en comparant l'intensité du signal obtenue par le pont de jauges est avec celle de la cellule de charge de la machine.

Lors des essais, trois têtes différentes sont utilisées afin de simuler la coupe orthogonale et sur lesquelles les outils sont fixés à 0°, +5° et -5°, permettant ainsi de faire varier l'angle de coupe comme montré sur la figure **VI-2**.



(a)-Usinage à -5° (b)-Usinage à 0° (c)-Usinage à +5°

FIG. VI-2 : *Schéma des différents angles de coupe.*

II - 2.2 : PROJECTILE

Le projectile qui maintient l'éprouvette a une longueur de 150 mm. Son guidage dans le tube de lancement est assuré par des bagues en Téflon. Grâce au rail, une précision de 0,01 mm dans le positionnement du projectile par rapport aux outils est obtenue. Ceci est très important pour avoir une profondeur de coupe quasiment identique au niveau des deux outils et ainsi obtenir un usinage symétrique, donnant des efforts de coupe longitudinaux F_A et F_B très voisins. Le chargement du tube d'HOPKINSON se rapproche alors d'un cas de compression pure, la dissymétrie des efforts entraînant un chargement en flexion du tube. Dans ce cas, le branchement particulier des jauges de déformation, décrit dans le chapitre III, permet d'éliminer la mesure de la flexion du tube.

L'éprouvette est d'une forme simple, parallélépipédique, dont les caractéristiques sont mentionnées sur la figure **VI-1** (L=5 ou 10 mm ; W=10 mm ; H=45 mm). Les avantages d'une telle géométrie sont d'une part une réduction considérable du coût de fabrication, mais se répercutent aussi sur le système de maintient. En effet celui-ci permet d'effectuer un réglage en position très simple et rapide de l'échantillon, par un système de bride. Avant chaque tir nous vérifions le positionnement de l'éprouvette par rapport aux outils (pour la symétrie d'usinage). Il est possible de le modifier aisément si besoin est, avec ce système. Ce ne serait pas le cas avec une fixation par vis où la position de l'éprouvette serait fixe. Enfin le projectile doit pouvoir se glisser dans le tube de mesure pour être amorti dans un absorbeur de chocs. Deux rainures sont donc usinées sur ses flancs pour le passage des outils.

III - RESULTATS EXPERIMENTAUX

Ce paragraphe traite des résultats obtenus concernant plusieurs types d'aciers usinés dans un intervalle de vitesses compris entre 10 m/sec et 98 m/sec. Les matériaux testés sont de duretés différentes. Dans la suite, pour plus de commodité nous les classerons en quatre catégories nommées A, B, C et D de duretés croissantes.

Les paramètres expérimentaux de coupe sont les suivants :

* *la profondeur de passe* : deux épaisseurs de coupe sont choisies, une faible profondeur, soit 0,3 mm par copeau et une plus élevée 0,5 mm par copeau.

* *l'angle de coupe* : 3 angles de coupe +5°, 0° et -5° sont choisis pour chaque profondeur de passe.

* *la vitesse de coupe.*

Dans un premier temps nous allons nous intéresser à la nature des copeaux générés. Leur géométrie varie considérablement en fonction des conditions de coupe et des matériaux usinés. Nous étudions ensuite l'évolution des efforts de coupe mesurés en fonction de la vitesse. Nous montrons qu'il existe une relation entre la morphologie des copeaux et les niveaux des efforts mesurés, liée à l'apparition de bandes de cisaillement adiabatique dans les copeaux.

III - 1 : Formation d'un Copeau

Il existe deux catégories principales de copeaux :

* *les copeaux continus* : lors de l'avance de l'outil dans le matériau, le flux de matière subit un brusque changement de direction au contact de l'arête de coupe de l'outil. Ce comportement est illustré à la figure **VI-3**.

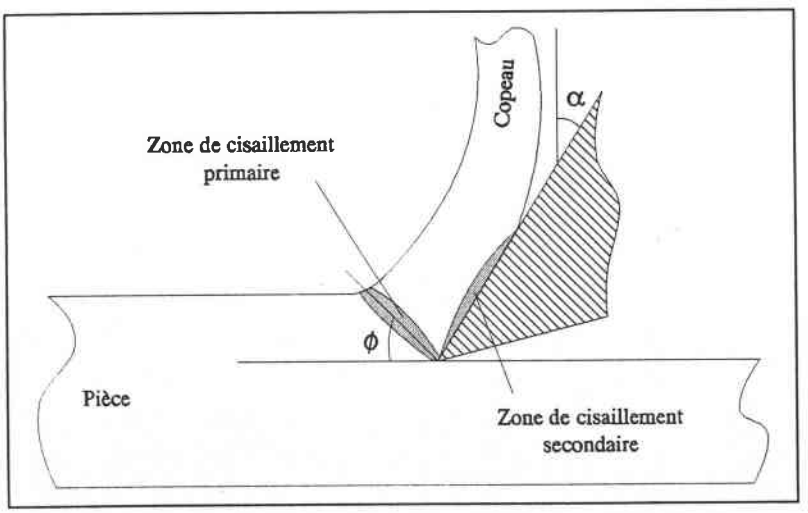


Fig. VI-3 : *Formation d'un copeau continu*

Il se crée alors une zone très étroite de cisaillement intense de la matière qui s'étend de l'arête de coupe de l'outil à la surface libre du matériau. Elle est appelée zone de cisaillement primaire. Cette zone forme un plan de cisaillement qui est incliné d'un

angle Φ par rapport au plan usiné. Le modèle de MERCHANT [73]-*1944*- établit la valeur de cet angle à :

$$\phi = \frac{\pi}{4} - \frac{\lambda - \alpha}{2}$$

avec λ : angle de frottement à l'interface outil/matière, α : angle de coupe,

Φ : angle de cisaillement.

Mais ce résultat n'est qu'indicatif et n'est pas toujours représentatif des résultats expérimentaux. En effet, lorsque le copeau s'écoule le long de l'outil, le frottement intense à leur interface créé une zone où le matériau est fortement cisaillé, appelée zone de cisaillement secondaire. Nous pouvons raisonnablement penser que les propriétés du matériau à l'interface avec l'outil varient avec la vitesse de coupe, provoquant une variation de l'angle de frottement λ. La conséquence directe est alors une évolution de l'angle Φ avec la vitesse.

* *les copeaux discontinus* : dans ce cas le principe de production du copeau est identique au cas précédent. Cependant un mécanisme d'instabilité dans la zone de cisaillement primaire conduit à la rupture du matériau. Cette rupture peut être de type fragile pour des matériaux durs et des déformations peu élevées dans la zone de cisaillement. Une rupture de type ductile apparaîtra pour des matériaux moins durs mais pour des vitesses de déformations plus importantes. Elle est alors souvent accompagnée par la formation de bandes de cisaillement dans la zone primaire. Une seconde cause de formation de copeaux discontinus est le phénomène de "stick-slip" lié au frottement à l'interface outil-copeau.

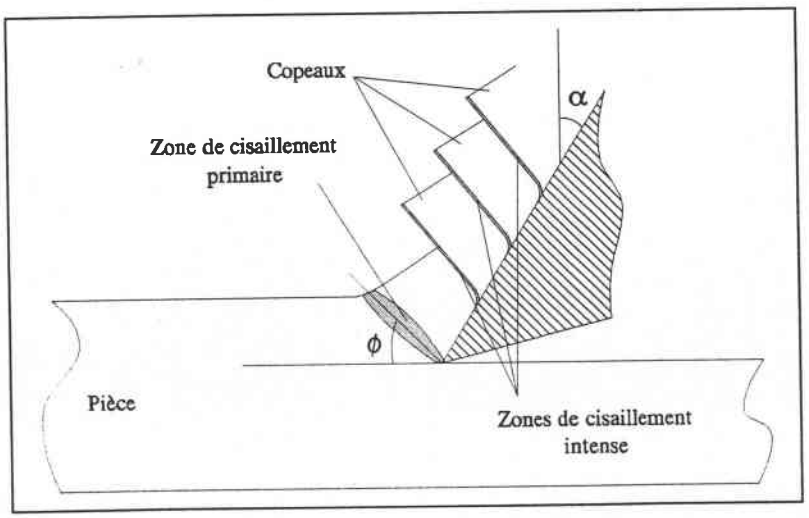
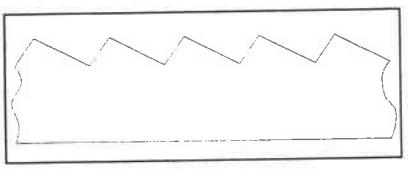


FIG. VI-4 : *Formation d'un copeau discontinu.*

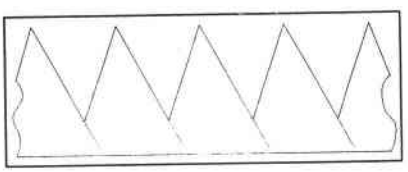
III - 2 : MORPHOLOGIE DES COPEAUX

Plusieurs approches ont été effectuées dans le passé afin de déterminer une classification des différents types de copeaux. KOMANDURI & BROWN [74]-*1981*- ont proposé un classement qui se décompose en quatre catégories distinctes :

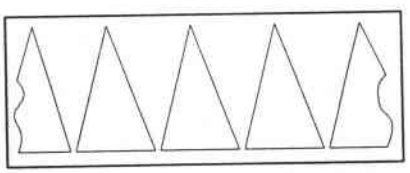
* *le copeau festonné* : qui se caractérise par une surface à vagues régulières et symétriques. Cette forme particulière peut s'expliquer par les vibrations liées au processus de coupe. Lorsque celles-ci deviennent proches de la fréquence propre du dispositif d'usinage, il apparaît un phénomène de résonance. La conséquence directe est une vibration de l'ensemble à l'origine des vagues sur la surface usinée.



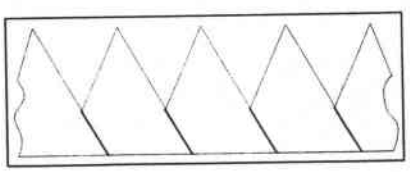
* *le copeau segmenté* : est constitué d'une succession de segments attachés les uns aux autres et dont l'épaisseur varie de façon périodique. La fréquence de segmentation est dépendante des paramètres de coupe (angle, profondeur de passe ...) ainsi que de la composition et de la microstructure du matériau usiné. Les vibrations induites par l'usinage jouent aussi un rôle non négligeable dans cette segmentation.



* *le copeau discontinu* : est un cas particulier du copeau segmenté pour lequel il y a rupture complète entre les différents segments. Ce type est surtout rencontré pour les matériaux fragiles. La rupture entre les différents segments est produite par la propagation de fissures au niveau des zones de cisaillement intense.



* *le copeau à bandes de cisaillement adiabatique* : présente une forte localisation de la déformation qui se traduit par une transformation de phase à l'intérieur des parties fortement cisaillées.



Notons également une seconde approche présentée par BAYOUMI & Xi [75]-*1995*- qui conserve aussi un classement en quatre catégories proche de celle de KOMANDURI & al.

La campagne d'essai d'usinage rapide, intégrant une période de réglage du dispositif expérimental de plusieurs mois, représente un total d'environ 200 essais. Une partie de ces tests a été effectuée pour les premières mises au point du dispositif, le "rodage" de la partie mécanique ainsi que l'étalonnage des divers composants électroniques.

Grâce à la quantité de copeaux produite durant cette période d'essai, nous sommes en mesure d'établir une classification morphologique associée aux diverses conditions de coupe (profondeur de passe, angle, vitesse). Celle-ci est basée sur les modèles déjà existants mais est plus complète et plus détaillée. Le critère principal de classification est bien sûr l'aspect externe, macroscopique du copeau, mais une analyse microscopique visant à déterminer la présence ou non de bandes de cisaillement intervient aussi.

De sorte qu'une table de classification la plus représentative possible des observations soit élaborée, plusieurs niveaux de sélections ont été définis.

* Niveau I : il définit deux grandes classes de copeaux, les continus et les discontinus, qui englobent la totalité des copeaux étudiés.

* Niveau II : il décrit la surface du copeau. Il est divisé en trois catégories qui représentent une surface lisse, festonnée ou segmentée. Dans ce dernier cas les morceaux sont toujours rattachés les uns aux autres.

* Niveau III : il représente la régularité de la surface. Par exemple si le festonnement est périodique ou totalement aléatoire, de même pour la segmentation.

* Niveau IV : fait apparaître ou non la présence de bandes de cisaillement adiabatique. Celles-ci sont mises en évidence par une attaque au Nital (2%) des échantillons.

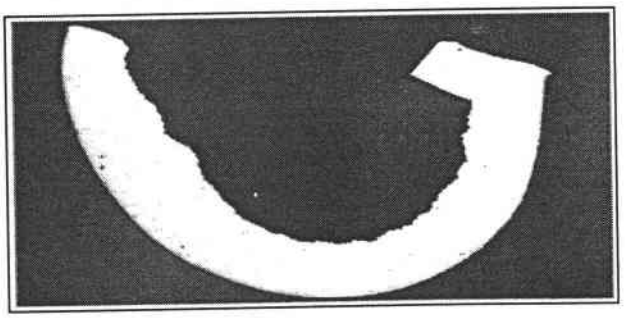
Les copeaux observés peuvent être classés suivant le tableau montré à la figure **VI-5**.

<table>
<tr><td>I</td><td colspan="7">Continu [C]</td><td colspan="2">Discontinu [D]</td></tr>
<tr><td>II</td><td>Lisse [L]</td><td colspan="2">Festonné [F]</td><td colspan="4">Segmenté [S]</td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td>III</td><td></td><td>Régulier [R]</td><td>Irrégulier [I]</td><td colspan="2">Régulier [R]</td><td colspan="2">Irrégulier [I]</td><td>Régulier [R]</td><td>Irrégulier [I]</td></tr>
<tr><td>IV</td><td></td><td></td><td></td><td>BCA [X]</td><td>Sans BCA [Φ]</td><td>BCA [X]</td><td>Sans BCA [Φ]</td><td></td><td></td></tr>
</table>

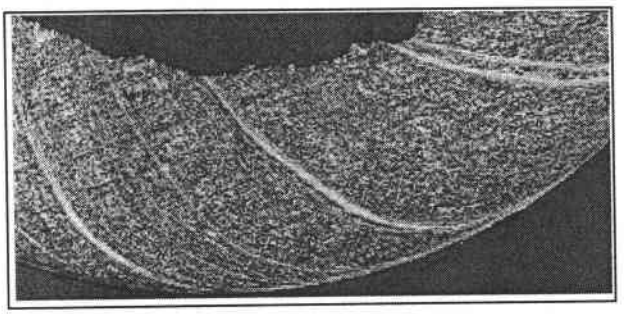
FIG. VI-5 : *Tableau de classification des copeaux.*

Chaque type de copeau est donc symbolisé par quatre lettres qui permettent de le situer précisément dans une catégorie. Par exemple C-S-R-X : Continu-Segmenté-Régulier-avec B.C.A..

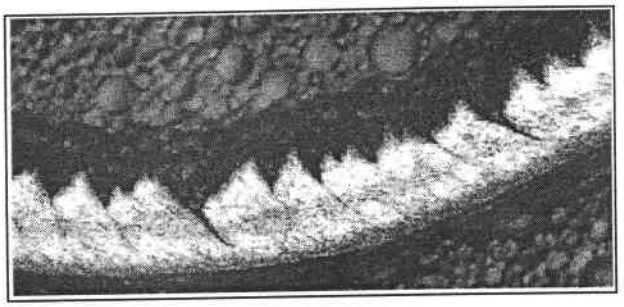
Il est à noter que la catégorie "discontinu" ne présente que deux sous niveaux. En effet dans ce cas le copeau ne peut être divisé qu'en parties régulières ou non. La présence de B.C.A. est, de plus, assez difficile à montrer. L'observation microscopique de ce type de copeau fait néanmoins apparaître, dans quelques cas, des B.C.A. au niveau des parties segmentées. La discontinuité peut donc résulter de la propagation de ces B.C.A.. La seconde cause plausible est la propagation d'une fissure. Plusieurs exemples de copeaux appartenant à ces diverses catégories sont montrés sur les photographies suivantes.



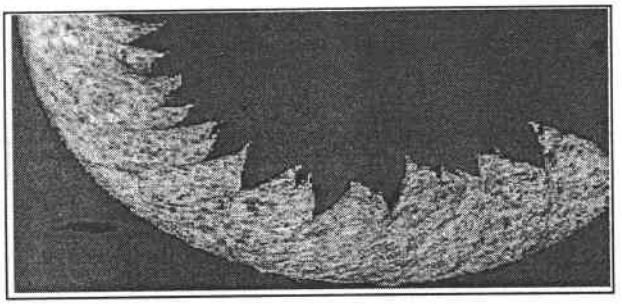
Copeau continu à surface lisse sans B.C.A. : C-L-R-Φ.



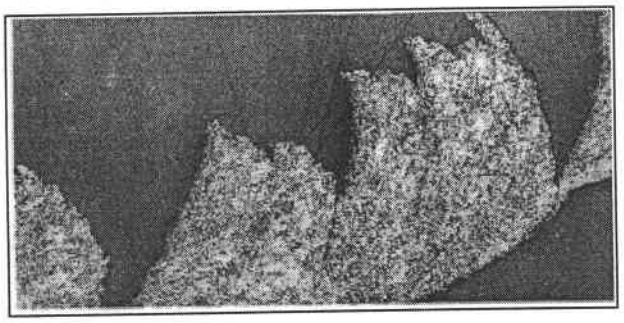
Copeau continu à surface lisse avec B.C.A. : C-L-R-X.



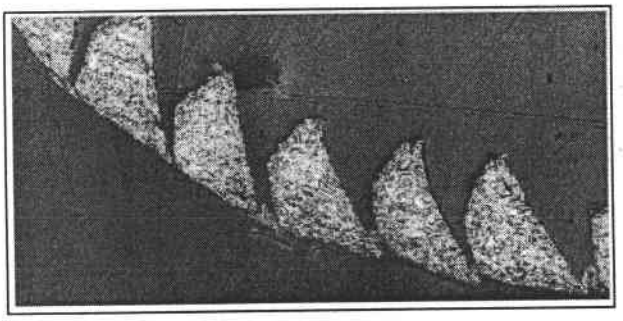
Copeau festonné régulier sans B.C.A. : C-F-R-Φ.



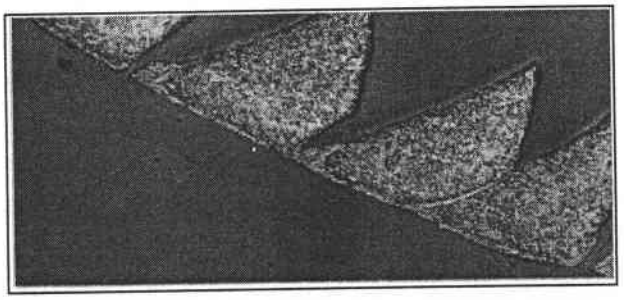
Copeau festonné régulier avec B.C.A. : C-F-R-X.



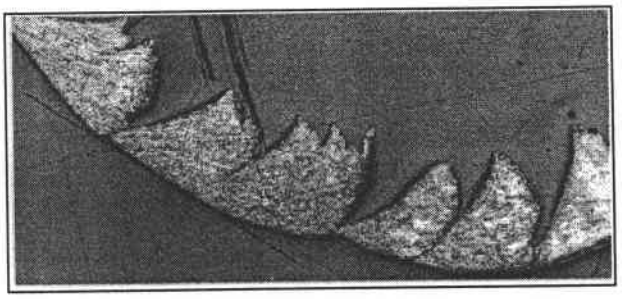
Copeau festonné irrégulier sans B.C.A. : C-F-I-Φ.



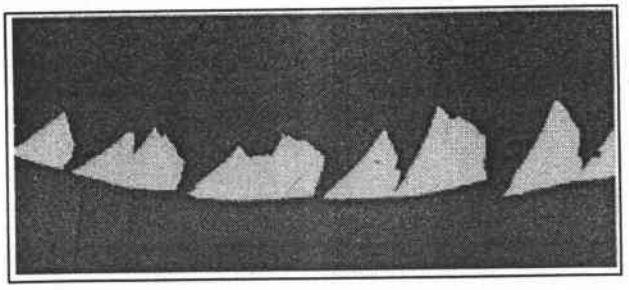
Copeau segmenté régulier sans B.C.A. : C-S-R-Φ.



Copeau segmenté régulier avec B.C.A. : C-S-R-X.



Copeau segmenté irrégulier sans B.C.A. : C-S-I-Φ.



Copeau discontinu irrégulier.

La seconde étape de cette étude consiste à répertorier tous les types de copeaux observés en fonction des paramètres expérimentaux.

* le matériau,
* la profondeur de coupe,
* la vitesse de coupe,
* l'angle de coupe.

Il est possible ensuite de déterminer le rôle que jouent ces paramètres sur la morphologie du copeau. Les résultats des observations microscopiques sont présentés dans le tableau de la figure **VI-6**. Les catégories "épais" et "mince" sont associées respectivement aux profondeurs de coupe 0,5 mm et 0,3 mm. Les vitesses sont égales à 1 m/s $< V_1 <$ 2 m/s; 15 m/s $< V_2 <$ 20 m/s; 35 m/s $< V_3 <$ 40 m/s; 70 m/s $< V_4 <$ 75 m/s.

		Vitesse	V_1			V_2			V_3			V_4		
		Angle	-5°	0°	5°	-5°	0°	5°	-5°	0°	5°	-5°	0°	5°
B	Epais		-	C-L-X	C-S-I-Φ	C-S-R-X	-	D-I	D-I	-	D-R	C-S-R-X	C-S-R-X	D-R
	Mince		C-L-X	C-L-X	-	D-R-X	C-S-R-X	C-S-R-Φ	D-R	-	C-S-R-X	D-R	D-R-X	-
C	Epais		C-F-I-Φ	C-L-Φ	C-S-R-Φ	C-S-I-Φ	C-F-I-X	C-F-I-Φ	C-S-R-X	C-F-I-X	C-F-I-Φ	D-R-X	C-S-I-X	C-S-I-Φ
	Mince		-	-	C-S-I-Φ	C-F-I-X	C-F-I-X	C-F-I-Φ	C-S-R-X	C-F-I-X	C-F-I-Φ	D-R-X	C-S-I-X	C-S-I-X
D	Epais		C-L-Φ	C-L-Φ	C-L-Φ	C-F-I-X	C-S-R-X	C-F-I-Φ	C-F-I-Φ	C-F-I-X	C-S-R-Φ	D-I	C-F-I-X	C-F-I-X
	Mince		-	C-L-Φ	-	D-R	C-F-R-Φ	D-R	C-F-I-Φ	C-F-I-X	C-S-R-Φ	D-I	D-R	C-S-I-Φ

FIG. VI-6 : *Morphologie des copeaux en fonction des paramètres de coupe.*

* *Epaisseur du copeau* : la proportion des copeaux discontinus est sensiblement plus importante dans la catégorie des copeaux de faible épaisseur (0,3 mm) par rapport à ceux d'épaisseur plus élevée (0,5 mm). Un copeau mince semble donc se segmenter plus facilement. La différence de largeur entre les zones à cisailler entre ces deux types de copeaux est de 2/10ème mm. Néanmoins, à très grande vitesse (V_4), pour un angle négatif (-5°) et pour les matériaux C et D, les copeaux sont discontinus qu'ils soient longs ou minces.

**Angle de coupe* : pour un angle négatif (-5°), les copeaux apparaissent en majorité discontinus, surtout aux grandes vitesses de coupe, ou alors continus mais segmentés avec présence de B.C.A.. Sous ces conditions de coupe, le cisaillement au sein de la matière est plus important que pour les angles supérieurs et ceci favorise l'apparition de B.C.A. qui mènent à la rupture ou à la discontinuité des copeaux.

Ceci est confirmé par l'observation aux angles -5° et 0° où quasiment tous les copeaux présentent des B.C.A., qu'ils soient continus ou non. Il semble donc qu'un angle de coupe négatif ou nul soit un facteur important dans la présence du cisaillement adiabatique.

* *Vitesse de coupe* : les vitesses s'échelonnent de 1 m/sec à 75 m/sec. Une observation globale montre une augmentation sensible du nombre de copeaux présentant des B.C.A. avec la vitesse de coupe. Dans le cas de la vitesse maximum, V_4, des B.C.A. sont même observées avec un angle positif (+5°). Ce comportement peut être justifié par l'augmentation des vitesses de déformation dans la matière, propice à l'apparition du cisaillement adiabatique. Cette raison explique aussi la proportion croissante des copeaux discontinus ou segmentés avec la vitesse.

Quelques tendances générales sur l'influence des paramètres de coupe ont pu être dégagées. Cependant nous constatons qu'il est difficile d'associer une morphologie bien définie d'un copeau à un seul paramètre. La forme finale d'un copeau est le résultat d'une combinaison complexe de tous les facteurs expérimentaux.

Une seconde partie de ce travail a consisté à étudier les efforts de coupe mesurés et à essayer d'établir une corrélation entre leur niveau et la nature des copeaux. Les résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

III - 3 : Etude des Efforts de Coupe

Les efforts sont mesurés au moyen des ponts complets disposés sur le tube d'Hopkinson. L'étalonnage de ce tube est décrit au chapitre III. Un signal typique des signaux des jauges lors de l'usinage rapide d'une éprouvette est montré à la figure VI-7. Cet exemple correspond à une vitesse de coupe V = 15,64 m/sec, à une profondeur de passe e = 0,5 mm et à un angle de coupe de α = -5° pour un matériau de type D.

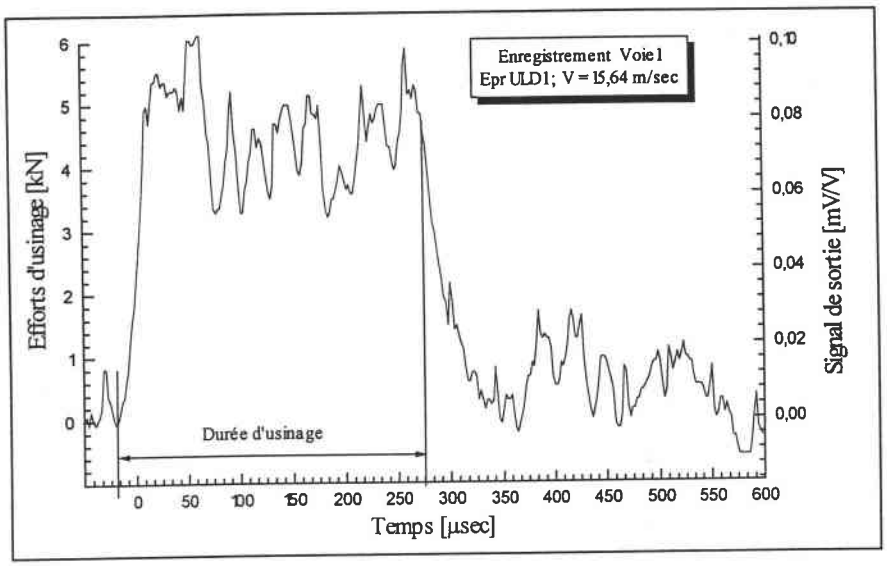


FIG. VI-7 : *Oscillogramme typique des efforts longitudinaux de coupe; n°1.*

Des oscillations sont observées après un premier pic. Certaines d'entre elles peuvent être imputées à des réflexions au sein du projectile et de l'éprouvette. De plus, les copeaux obtenus avec cet échantillon sont très finement segmentés. Ceci a pour conséquence de générer de nombreuses oscillations au niveau des efforts d'usinage qui sont répercutées par l'oscillogramme.

Un autre type d'enregistrement correspondant à une vitesse de coupe $V = 17{,}02$ m/sec, $\alpha = 0$ °, $e = 0{,}5$ mm et matériau A est illustré à la figure **VI-8**. Dans ce cas, le copeau obtenu est continu, les oscillations sont moins nombreuses et moins marquées. Après le premier pic, l'amplitude des efforts mesurés est presque constante, effet qui résulte d'un processus de coupe quasi-stationnaire.

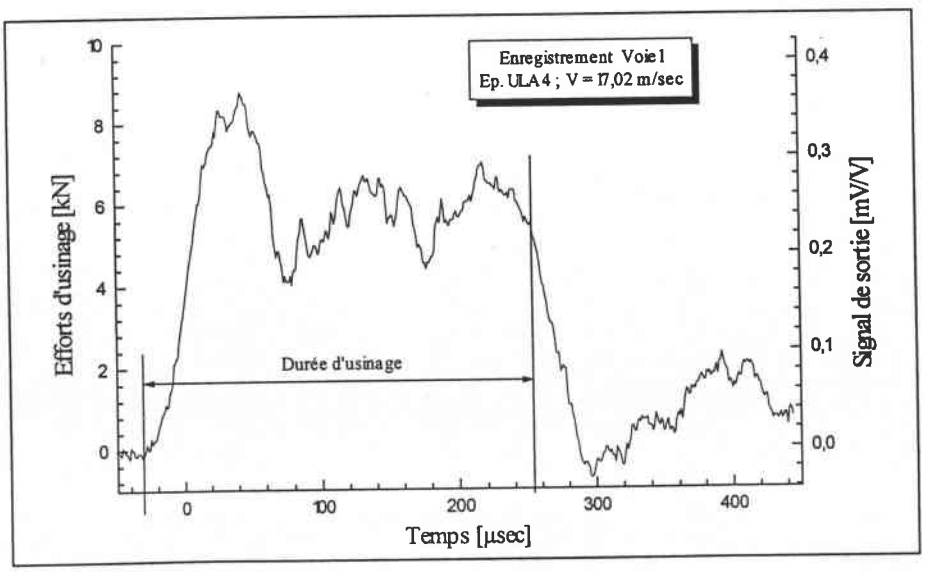


FIG. VI-8 : *Oscillogramme typique des efforts longitudinaux de coupe; n°2.*

III - 3.1 : ACIER MI-DUR

Des premiers essais ont été réalisés sur un acier mi-dur de type A (XC-18), avec un angle de coupe constant $\alpha = 0°$, ainsi que la profondeur de passe $e_0 = 0{,}4$ mm. La variable expérimentale est la vitesse de coupe qui s'échelonne de $V = 0{,}1$ m/sec à $V = 86{,}2$ m/sec. Les tests à faibles vitesses sont effectués avec la machine hydraulique ZWICK sur laquelle un montage d'usinage (Tête porte-outil + Eprouvette) identique à celui du dispositif dynamique a été adapté. Le tableau présentant les résultats obtenus est montré à la figure **VI-9**.

La profondeur de passe e_m mesurée pour chaque test est inférieure ou égale à la valeur prévue de $e_0 = 0{,}4$ mm. Ceci est dû à un accroissement de la distance entre les deux outils pendant le processus de coupe qui résulte de l'action d'une force d'usinage radiale sur les outils. C'est pourquoi une correction est apportée à la force moyenne de coupe longitudinale F_m en rapportant sa valeur à une profondeur de coupe de référence e_0. Elle est donnée par l'expression :

$$F_{mc} = \frac{e_0}{e_m} F_m$$

avec F_m : effort longitudinal de coupe moyen mesuré,

F_{mc} : effort longitudinal de coupe moyen corrigé,

e_0 : profondeur de coupe théorique,

e_m : profondeur de coupe mesurée.

N° d'éprouvette	Vitesse de coupe [m/s]	ΔV/V %	Durée d'usinage [µsec]	Profondeur de coupe moyenne mesurée e_m [mm]	Force de coupe longitudinale moyenne F_{mc} [N]
UE61	0,1	-	39180	0,395	8860
UE63	1,1	-	4438	0,395	6930
UE64	1,1	-	4575	0,395	7180
UE14	11	9	460	0,395	4240
UE11	22,7	2	220	0,395	4040
UE12	23,2	1,9	215	0,400	3990
UE24	44,6	0,5	112	0,390	3680
UE21	66,2	0,4	76	0,410	3500
UE25	69,9	0,4	71,5	0,375	3940
UE15	86,2	0,3	58	0,385	4350

FIG. VI-9 : *Tableau des efforts longitudinaux de coupe en fonction de la vitesse de coupe.*

Le résultat de l'évolution de la force de coupe F_{mc} en fonction de la vitesse V est représentée à la figure **VI-10**.

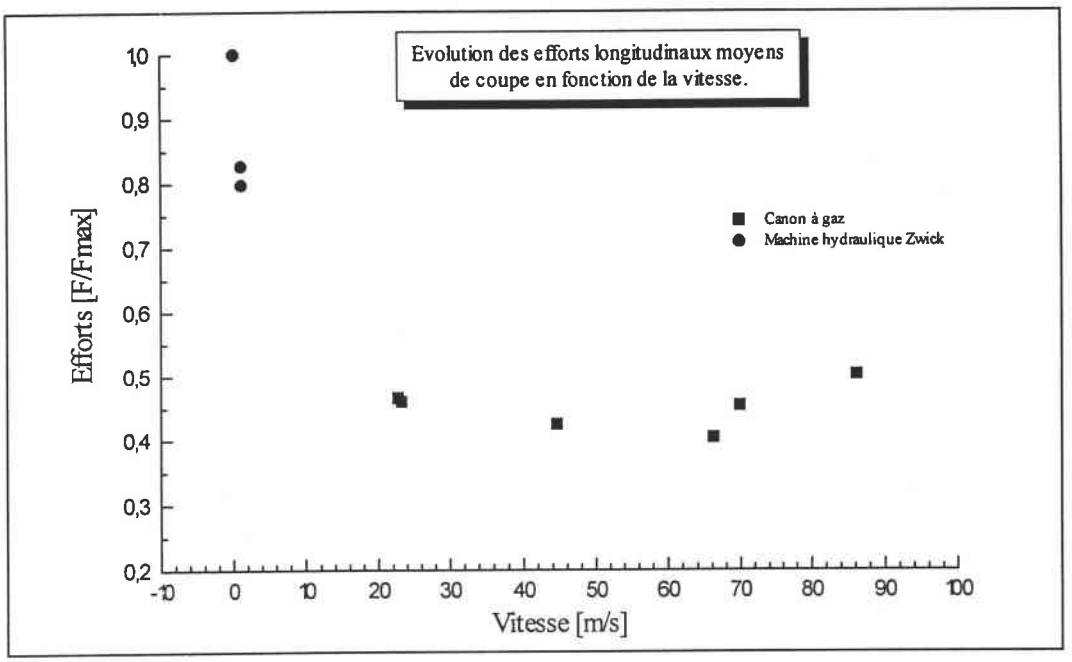


FIG. VI-10 : *Evolution de la force longitudinale moyenne de coupe en fonction de la vitesse.*

Nous observons une force minimum de coupe. Cette observation a aussi été effectuée par RECHT [76]-*1984*-. La diminution de la force longitudinale apparaît pour des vitesses de coupe comprises entre 10 m/sec < V < 40 m/sec. Elle peut être attribuée à la réduction du coefficient de frottement à l'interface outil-copeau lorsque la vitesse de coupe croît. Après cette gamme de vitesse, les efforts augmentent. Ceci est dû aux effets d'inertie provoqués par le brusque changement de direction de la matière au niveau de l'arête de coupe. La contribution des effets d'inertie sur les efforts de coupe est décrite analytiquement par MOLINARI & DUDZINSKI [77]-*1992*-.

Un autre facteur qui peut contribuer à l'augmentation de la force exercée sur les outils est la sensibilité à la vitesse de déformation très prononcée de cet acier aux très grandes vitesses de déformation et montrée par KLEPACZKO [22]. La vitesse de coupe optimum pour laquelle le minimum d'énergie de coupe est obtenu résulte d'une interaction entre ces différents phénomènes aux effets contradictoires.

III - 3.2 : ACIER DUR

D'autres tests ont ensuite été menés sur les aciers de types B, C et D avec trois angles de coupe : -5°, 0°, +5° et deux profondeurs de passe e_0 = 0,3 mm et 0,5 mm par angle. Nous présentons ici uniquement les résultats obtenus sur l'acier C. Nous pouvons donc essayer d'établir un lien entre le niveau des efforts enregistrés et la nature des copeaux. Les résultats de mesure des efforts longitudinaux mesurés en fonction de la vitesse sont représentés aux figures **VI-11** et **VI-12**.

Les résultats montrés sont rapportés aux efforts maximum respectifs au deux cas. Au dépouillement, une différence au niveau de l'intensité de cet effort est constatée entre les copeaux épais et les copeaux minces. L'augmentation de la profondeur de passe contribue effectivement à l'accroissement des efforts.

Une seconde observation nous indique que dans les deux cas, le niveau des efforts pour les angles -5° et +5° sont quasiment identiques alors que les efforts relatifs à l'angle 0° se situent nettement en deçà des deux précédents. Dans un premier temps, ce résultat peut sembler surprenant. En effet, plus l'angle de coupe croît et plus l'écoulement de la matière le long de la surface de l'outil est facilité. Donc théoriquement, les efforts devraient être les plus élevés pour -5° et décroître ensuite jusqu'à +5°. Ici ce n'est pas le cas, un facteur autre que l'angle de coupe joue donc un rôle important sur le niveau des efforts. Cet élément peut être trouvé par l'analyse microscopique des copeaux.

L'analyse du tableau **VI-5** nous révèle que des B.C.A. sont visibles essentiellement dans les copeaux correspondant aux angles -5° et 0° et pour des vitesses supérieures à 15 m/sec. La présence de B.C.A. contribuerait donc à diminuer le niveau des efforts correspondants à ces angles de coupe en segmentant les copeaux ou en provoquant une discontinuité. De cette façon, il est possible d'expliquer le fait que les efforts à 0° aient été abaissés et soient devenus inférieurs à ceux de +5° où il n'apparaît pas de B.C.A.. De même, le niveau normalement plus élevé des efforts à -5° dû aux frottements avec l'outil est abaissé par la présence des B.C.A. dans les copeaux et rejoint celui de +5°.

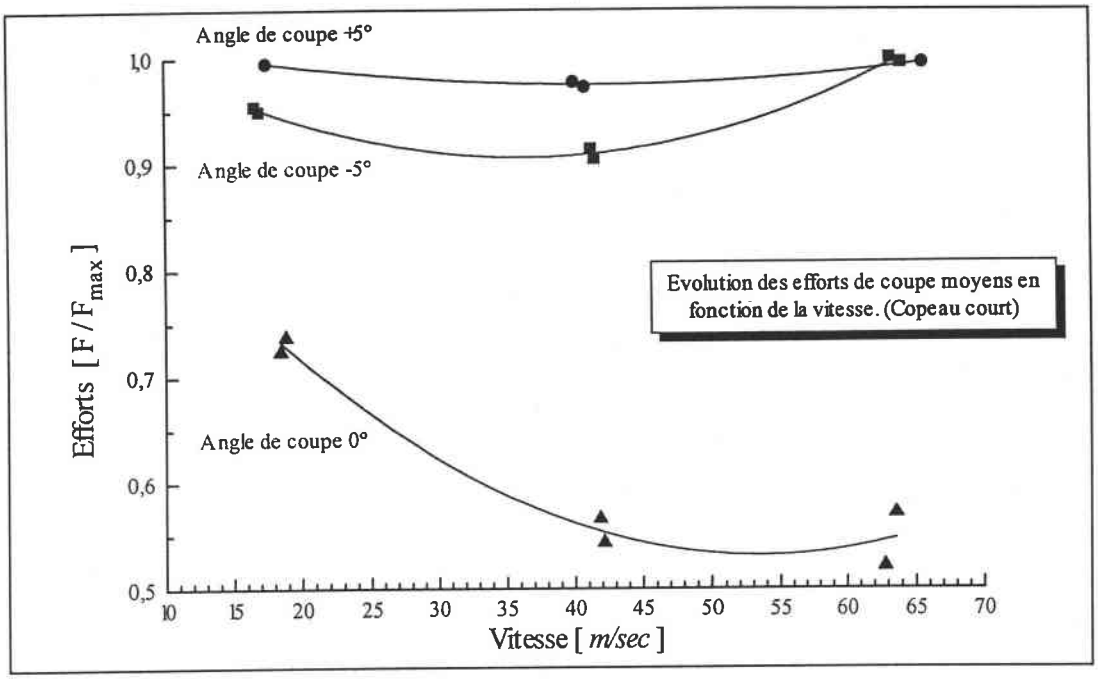


FIG. VI-11 : *Efforts longitudinaux de coupe en fonction des angles de coupe et de la vitesse de coupe.(Copeaux minces)*

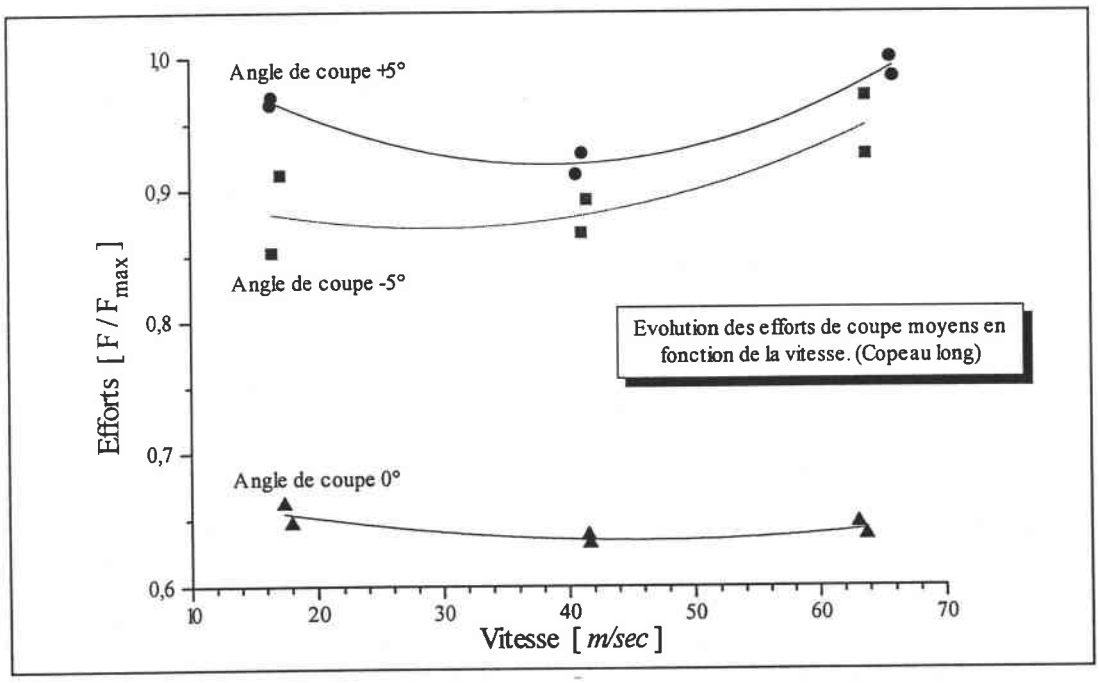


FIG. VI-12 : *Efforts longitudinaux de coupe en fonction des angles de coupe et de la vitesse de coupe.(Copeaux épais)*

IV - CONCLUSION

Les expérimentations en usinage rapide ont permis la mise au point du dispositif expérimental. Plusieurs matériaux de duretés différentes ont été testés jusqu'à des vitesses de coupe proches de 80 m/sec. De nombreux copeaux sont obtenus dont la forme est dépendante des paramètres de coupe (vitesse, angle, profondeur, matériaux). Une nouvelle classification des types de copeaux est proposée, basée sur des critères morphologiques (lisse, segmenté...) et structuraux (présence de B.C.A.). Un inventaire des copeaux générés pendant la coupe permet de dégager l'influence des paramètres expérimentaux sur leur nature finale et plus particulièrement sur l'apparition de bandes de cisaillement adiabatique dans les zones fortement cisaillées.

La mesure des efforts en fonction de la vitesse, sur un acier XC-18, fait apparaître un minimum de la force de coupe pour une certaine plage de vitesse. Ce minimum résulte de la compétition entre l'effet du frottement à l'interface de l'outil et des effets d'inertie.

Enfin le niveau des efforts sur acier dur a pu être relié à la présence de bandes de cisaillement dans les copeaux apparaissant pour des angles de coupe négatifs ou nuls.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Le travail effectué au cours cette étude est principalement fondé sur la conception et l'exploitation d'un dispositif expérimental dynamique. L'objectif à atteindre était de créer un dispositif original et polyvalent, capable de générer un chargement en mode II dans des éprouvettes pré entaillées, ou encore de simuler l'usinage des métaux aux très grandes vitesses de coupe.

Nous avons ainsi opté pour un banc d'essai, basé sur le principe du canon à gaz, nous inspirant des dispositifs expérimentaux de double cisaillement de KLEPACZKO et d'impact de KALTHOFF & al., dans lesquels un projectile est propulsé à plusieurs dizaines de mètres par seconde dans un tube, grâce à la détente soudaine d'air comprimé dans une chambre haute pression. Une des originalités de notre dispositif réside dans son rail de guidage qui élimine toute rotation du projectile à l'intérieur du tube de lancement, au cours de sa phase d'accélération. De cette manière un positionnement très précis (de l'ordre du centième de mm) du projectile est obtenu à la sortie du tube. Ceci est avantageux, vu que d'une part les impacts peuvent être réalisés dans des conditions de contact, entre le projectile et l'éprouvette, similaires d'un essai à l'autre, et que d'autre part ce rail nous assure une très grande précision et une reproductibilité des profondeurs de coupe lors des essais d'usinage.

Une autre particularité de notre dispositif est de posséder un tube de mesure, ou tube d'HOPKINSON, sur lequel sont adaptés les différents montages supportant les plaques pré entaillées ou les outils de coupe, et qui nous permet de déterminer les efforts engendrés lors des essais d'impacts ou d'usinage. Le principe de mesure, similaire à celui utilisé pour les barres d'HOPKINSON, est fondé sur la propagation des ondes élastiques de compression, produites lors des essais. Plusieurs ponts de jauges d'extensomètrie, collés sur la circonférence de ce tube, mesurent les déformations dues aux passages des ondes élastiques. Un calibrage de ces ponts établi par des impacts à faibles vitesses permet de relier les déformations mesurées aux efforts mis en jeu au cours des essais.

Le dispositif expérimental est de plus équipé d'un système vidéo rapide, conçu en même temps, et articulé autour de six caméras à cellule CCD. Ce système multi caméras a l'avantage de produire des images numériques de grande résolution, immédiatement visibles sur un moniteur vidéo, et qui peuvent être stockées sous un P.C. pour des analyses à l'aide de logiciels d'images spécialisés. De plus la technologie de ces caméras permet de s'affranchir d'un équipement d'éclairage coûteux et encombrant pour n'utiliser que des flashes photographiques classiques.

Une fois l'assemblage des multiples éléments mécaniques et électroniques réalisé, plusieurs mois furent consacrés aux divers essais de mise au point de notre dispositif, durant lesquels de nombreuses modifications et réglages ont été réalisés; opérations indispensables avant que le dispositif ne devienne opérationnel et tout à fait fiable dans les diverses mesures.

L'objectif fixé avec les impacts sur plaques était de provoquer l'initiation de B.C.A. en fond d'entaille, par une technique identique à celle de KALTHOFF & al. ou de ROSAKIS & al., et de suivre leur propagation à travers l'éprouvette grâce aux caméras rapides. Deux aciers de différentes duretés, un XC-18 et un 40-NCD-16, ont été testés afin de comparer leurs comportements. Après essais, les observations sur le 40-NCD-16 révèlent un mode de rupture inattendu vus les résultats reportés dans la littérature. Des B.C.A. se forment effectivement mais dans un plan perpendiculaire à celui prévu initialement, rendant ainsi toute observation par caméra impossible. Des essais ont ensuite été réalisés sur l'acier XC-18, moins dur, avec une géométrie d'éprouvette identique à celle du 40-NCD-16. Les résultats se sont montrés peu concluant, aucune B.C.A. n'étant observée.

La géométrie de l'éprouvette a donc été modifiée; la section de la partie cisaillée a été réduite et les entailles placées en opposition par rapport à l'impact. Pour l'XC-18, il est alors apparu plusieurs modes de déformation en fonction de la vitesse d'impact. Une gamme de vitesses critiques, comprises entre 50 m/sec et 60 m/sec environ, a pu être définie, dans laquelle les analyses par microscopie électronique montrent que la rupture des éprouvettes se produit par cisaillement adiabatique. Une vitesse moyenne de propagation des B.C.A. a pu être déterminée, se situant aux alentours de 200 m/s

dans cet acier, pour une vitesse d'impact de 55 m/s. Une sensibilité de la vitesse de propagation des B.C.A. en fonction de la vitesse d'impact semble apparaître, mais demande des essais supplémentaires pour être confirmée. Pour les vitesses inférieures et supérieures à cette gamme, une importante déformation plastique est observée au point d'impact du projectile, sans formation de B.C.A.. Par la suite, cette nouvelle configuration d'éprouvette a été appliquée à l'acier 40-NCD-16. Cependant le mode de rupture par B.C.A. est resté identique à celui des premiers essais. Ce comportement peut être imputé à la géométrie de l'éprouvette et notamment à une distance entre les entailles trop faible, qui provoquerait des interférences entre les ondes de chargement au niveau des pointes d'entailles, favorisant ainsi le mode de rupture observé. Une nouvelle conception de l'éprouvette, ainsi que de son support et du projectile est en cours d'étude, ce qui permettra d'effectuer de nouveaux essais.

Les analyses microscopiques des éprouvettes impactées révèlent une importante modification de la microstructure dans les parties des échantillons fortement cisaillées. Le gradient de déformation moyen des grains, de ces régions vers les zones non déformées, a pu être évalué par une nouvelle méthode basée sur l'analyse numérique des photographies des zones déformées. Cette technique permet de déterminer certaines caractéristiques dimensionnelles telles que la longueur, la largeur ou l'orientation de tous les grains à l'intérieur des zones étudiées. Un logiciel que nous avons développé permet de recueillir les données de cette analyse et de calculer la répartition statistique des grains. Cette étude met en évidence l'évolution de la déformation et de l'orientation des grains, en fonction de la distance par rapport au point d'impact de la zone étudiée, et de la vitesse d'impact du projectile.

Le dispositif expérimental a aussi été utilisé pour simuler la coupe orthogonale des métaux aux très grandes vitesses et analyser l'influence du cisaillement adiabatique sur le niveau des efforts de coupe. Plusieurs aciers de duretés différentes ont ainsi été testés dans une gamme de vitesses variant de 10 m/s à 100 m/s. Cette étude révèle une région pour l'acier XC-18, correspondant à un certain intervalle de vitesses, dans laquelle les efforts de coupe sont minimum. Ce comportement peut être attribué dans un premier temps à la diminution du coefficient de frottement à l'interface outil copeau lorsque la vitesse de coupe augmente, faisant décroître les efforts. Puis les

effets d'inertie au niveau de l'arête de coupe deviennent prépondérant aux vitesses plus importantes, les efforts croissent alors. L'étude suivante menée sur des aciers plus durs révèle le rôle considérable joué par le cisaillement adiabatique sur la segmentation du copeau et sur les efforts de coupe. Il a ainsi été montré que des B.C.A. se forment plus facilement dans ces aciers, pour des angles de coupe négatifs ou nuls ce qui a pour conséquence d'abaisser les efforts relatifs à ces angles.

Références Bibliographiques

[1] **Tresca H.**
On Further Applications of the Flow of Solids, Proc. Int. Mech. Eng., 30, 1878, p. 304. II

[2] **Zener C. & Hollomon J.H.**
Effect of Strain Rate upon Plastic Flow of Steel, Journal of Physic, Vol. 15, 1944, p. 22-32. II

[3] **Recht R.F.**
Catastrofic Thermoplastic Shear, J. of Applied Mech., 1964, p. 189. IV

[4] **Culver R.S.**
In Metallurgical Effects at High Strain Rates, Eds. Rohde, R.W.; Butcher, B.M.; Holland, J.R. and Karnes, C.H., p.519-530, 1973, Plenum Press, New York. IV

[5] **Staker M.R.**
The Relation Between Adiabatic Shear Instability Strain and Material Properties, Acta Metall., Vol. 29, 1981, p. 683-689. IV

[6] **Molinari A. & Clifton R.J.**
Analytical Characterization of Shear Localization in Thermoviscoplastic Materials, Journal of Applied Mechanics, Vol. 54, 1987, p. 806. IV

[7] **Marchand A. & Duffy J.**
An Experimental Study of the Formation Process of Adiabatic Shear Bands in a Structural Steel, J. Phys. Solids, 36, n°3, 1988, p. 251-283. IV

[8] **Wu F.H. & Freund L.B.**
Deformation Trapping due to Thermoplastic Instability in One-dimensionnal Wave Propagation, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 32, 1984, p. 119-132. IV

[9] **Grady D.E. & Kipp M.E.**
The Growth of Unstable Thermoplastic Shear with Applicatin to Steady-Wave Shock Compression in Solids, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 35, n°1, 1987, p. 95-118. VI

[10] **Grady D.E. & Kipp M.E.**
Properties of an Adiabatic Shear-Band Process Zone, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 40, n°6, 1992, p. 1197-1215. VI

[11] **Freund L.B., Wu F.H. & Toulios M.**
Initiation and Propagation of Shear Band in Antiplane Shear Deformation, Proceedings of the Considere Memorial Symposium, Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1985, p. 125. VI

[12] **Giovanola J.H.**
Adiabatic Shear Banding Under Pure Shear Loading, Part I : Direct Observation of Strain Localisation and Energy Dissipation Measurements, Mech. Mat., 1988, p. 59. VI

[13] GIOVANOLA J.H.
Adiabatic Shear Banding Under Pure Shear Loading, Part II : Fractographic and Metallurgic Observations, Mech. Mat., 1988, p. 73. VI

[14] ZHOU M., ROSAKIS A.J. & RAVICHANDRAN G.
Dynamically Propating Shear Bands in Prenotched Plates : I - Experimental Investigations of Temperatures Signatures and Propagation Speed, J. Mech. Phys. Solids, 44, 1996. VI

[15] NEEDLEMAN A.
Dynamic Shear Developpement in Plane Strain, J. Appl. Mech., Vol. 56, 1989, p .1-9. VI

[16] BATRA R.C. & XIANGTHONG Z.
On the Propagation of a Shear Band in a Steel Tube, J. Eng. Mat. and Techn., Vol. 116, 1994, p. 155-161. VI

[17] NEEDLEMAN A. & TVERGAARD V.
Analysis of a Brittle-Ductile Transition under Dynamic Shear Loading, Int. J. Solids Structures. Vol. 32, 1995, p. 2571-2590. VI

[18] ZHOU M., RAVICHANDRAN G. & ROSAKIS A.J.
Dynamically Propating Shear Bands in Prenotched Plates : II - Finite Elements Simulations, J. Mech. Phys. Solids, 44, 1996. VI

[19] ROGERS H.C.
Adiabatic Plastic Deformation, Annual Revue of Material Science, 1979. VI

[20] DORMEVAL R.
The Adiabatic Shear Phenomenon, Materials at High Strain Rates, Eds T.Z. Blazynski, Elsevier Applied Science, Barking Essex, 1987, p. 47-70. VI

[21] BAI Y.L. & DODD B.
Adiabatic Shear Localization, Occurence Theorie and Application, 1992, Pergamon Press. VI

[22] KLEPACZKO J.R.
An Experimental Technique for Shear Testing at High and Very High Strain of Rates. The Case of Mild Steel, Int. J. Impact. Eng., Vol. 15, 1994, p. 25-39. VI

[23] KALTHOFF J.F. & WINKLER S.
Failure Mode Transition at High Rates of Shear Looding, C.Y. Chiem, M.D. Kunze and L.W. Meyers, eds, Impact Loading and Dynamic Behaviour of Materials, Verlag, Vol 1, 1987, p. 185-198. VI

[24] BRETTHAUER B, MEIER G.E. & STASICKI B.
An Electronic Crantz-Scharding Camera, Rev. Sci. Instrum., 62, 1991, p. 346. VII

[25] HOPKINSON B.
A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullet, Phil. Trans. A., Vol. 213, 1914, p. 437. 5

[26] DAVIES R.M.
A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar, Phil. Trans. A., Vol. 240, 1948, p. 375. 5

[27] KOLSKY H.
An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading, Proc. Royal Soc. B, Vol. 62, 1949. 5

[28] LINDHOLM U.S.
Some Experiments with the Split Hopkinson Presure Bar, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 12, 1964, p. 317. 7

[29] KOLSKY H.
Stress Waves in Solids, Dover Publications, New York, 1963. 8

[30] DHARAN C.K.H. & HAUSER F.E.
Determination of Stress-Strain Characteristics at Very High Rates, Exp. Mech., Vol. 10, 1970, p. 370. 11

[31] GORHAM D.A.
Measurements of Strain Stress Properties of Strong Metals at Very High Rates of Strain (in Mechanical Properties at High Rates of Strain), J. Harding, Ed., Institute of Physics Conference Series, n° 47, London, 1979, p. 16. 11

[32] POCHAMMER L.
On the Propagation Velocities of Small Oscillations in a Unlimited Isotropic Circular Cylinder, J. Reine Angewandte Math., Vol. 81, 1876, p. 324. 13

[33] CHREE C.
The Equations of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates, Their Solutions and Applications, Cambridge Phil. Soc. Trans., Vol. 14, 1889, p. 250. 13

[34] FOLLANSBEE P.S.& FRANTZ C.E.
Wave Propagation in the Split Hopkinson Pressure Bar, J. Eng. Mat. Tech., Vol. 105, 1983, p. 61. 13

[35] MALINOWSKY J.Z. & KLEPACZKO J.R.
A Unified Analytic and Numerical Approach to Specimen Behaviour in the Split-Hopkinson Pressure Bar, Int. J. Mech. Sc.i., Vol. 28, n°6, 1986, p. 381-391. 14

[36] AFFOUARD J.F.
Etude Expérimentale sur les Bandes de Cisaillement Adiabatique, Thèse, I.S.M.C.M., 1984. 14

[37] DELTORT B.
Etude Expérimentale et Numérique du Cisaillement Adiabatique dans un Acier Martensitique, Thése, Ecole Supérieure des Mines de Paris, 1993. 15

[38] LINDHOLM U.S. & AL.
Large Strain, High Strain Rate Testing of Copper, J. Eng. Mat. Technol., Trans. ASME, Vol. 102, 1980, p. 376-381. 16

[39] KLEPACZKO J.R.
Rate Sensitivity of Copper at Large Deformations and High Strain Rates, Mecamat'91, Teodosiu, Raphanel & Sidorof (eds), 1993, Rotterdam. 18

[40] CULVER R.S.
Torsionnal-Impact Apparatus, Exp. Mect., Vol. 12, 1972, p. 398-405. 19

[41] BAKER W.W. & YEW C.H.
Strain Rate Effects in the Propagation of Torsional Plastic Waves, J. Appl. Mech.,Vol. 33, 1966, p. 917-923. 20

[42] DUFFY J., CAMPBELL J.D. & HAWLEY R.H.
On the Use of a Torsional Split Hopkinson Bar to Study Rate Effects in 1100-O Aluminium, J. Appl. Mech., Vol. 38, 1971, p. 83-91. 21

[43] HARTLEY K.A., DUFFY J. & HAWLEY R.H.
Strain Rate and Temperature History Effects During Deformation of FCC and BCC Metals, in Mechanical Properties of Materials at High Rates of Strain, J. Harding Eds., The Institute of Physics, London, 1984, p. 21-38. 24

[44] KLEPACZKO J.R.
The Propagation of Plastic Wave Fronts in a Plastically Deforming Aluminium Alloy, Technical Report-Division, of Engineering Brown University, ARO-D-G182/2, Providence, USA, 1979. 26

[45] CAMPBELL J.D. & FERGUSSON W.G.
The Temperature and Strain Rate Dependance of Shear Strength of Mild Steel, Philos. Mag., Vol. 21, 1970, p. 63-82. 29

[46] HARTMANN K.H., KUNZE D.H. & MEYER L.W.
Metallurgical Effects on Impact Loaded Materials, In Shock Waves and High Strain Rate Phenomena in Metals, Eds. M.A. Meyers and L.E. Murr, Plenum Press, New York, 1981, p. 325-337. 30

[47] MEYER L.W. & MANWARING S.
In Metallurgical Applications of Shock Waves and High Strain Rate Phenomena, ed. L.E. Murr, K.P. Staudhammer and M.A. Meyer, New York, 1985, p. 675-688. 31

[1] CLARK E.N. & JURACIO I.P.
Mechanics of Fragmentations of Cylinders, Repport AMMRC MS 73-2, Army Materials and Mechanics Research Center, Watertorn, Massachusettes, 1973, p. 311-342..... 32

[2] ABOU-SAYED A.S., CLIFTON R.J. & HERMANN L;
The Oblique Plate Impact Experiment, Exp. Mech., Vol. 16, 1976, p. 127-132. 32

[50] VARFOLOMEEV I.V. & KLEPACZKO J.R.
Effect of Strain Rate on the Growth of the Plastic Zone near a Mode II Crack Tip. Parametric Analysis, Strenght of Materials, Vol. 27, n°3, 1995, p. 138-145. 35

[51] ERDOGAN F. & SIH G.C.
On the Crack Extension in Plates under Plane Loading and Transverse Shear, J. Basic Engineering, 1963, 85, p. 519. 35

[52] BROEK D.
Elementary Engineering Fracture Mechanics, 1986, Martinus Nijhoff Publications. 35

[53] LEE Y.L. & FREUND L.B.
Fracture Initiation due to Asymetric Impact Loading of an Edge Cracked Plate, Trans. ASME, 57, 1990, p. 104-111. 35

[54] MANOGG P.
Schattenoptische Messung der Sperzifischen Bruchenergie während des Bruchvorgangs bei Plexiglas, Proccedings, Inter. Conf Physics of Non - Crystalline Solids, Delft, The Netherlands, 1964, p. 481-490. 36

[55] THEOCARIS P.S.
Local Yielding Around a Crack Tip in Plexiglass, J. Appl. Mech., Vol. 37, 1970, p. 409-415. 36

[56] KALTHOFF J.F.
Stress Intensity Factor Determination by Caustic, Intl. Conf. Experimental Mechanics, Society for Experimental Stress Analysis and Japon Society of Mechanical Engineers, Honolulu, Maui, Hawai, USA, May 23- 28, 1982. 37

[57] KALTHOFF J.F. & WINKLER S.
Fracture Behaviour under Impact, Final Report, Part II, European Research Office of the U.S. Army, 1985. 38

[58] KALTHOFF J.F., BEINERT J. & WINKLER S.
Measurements of Dynamic Stress Intensity Factors for Fast Running and Arresting Crack in Double- Cantilever- Beam Specimens, ASTH STP 627 - Fast Fracture and Crack Arrest, American Society for Testing and Mater, 1987. 38

[59] KALTHOFF J.F., BEINERT J., WINKLER S. & KLEMM W.
Experimental Analysis of Dynamic Effets in Different Crack Arrest Test Specimens, ASTHP STP. Crack Arrest Methodology and Applications, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA., 1980. 39

[60] KALTHOFF J.F. & WINKLER S.
Failure Mode Transition at High Rates of Shear Looding, C.Y. Chiem, M.D. Kunze and L.W. Meyers, eds, Impact Loading and Dynamic Behaviour of Materials, Verlag, Vol. 1, 1987, p. 185-198. 40

[61] MASON J.J., ROSAKIS A.J. & RAVICHANDRAN G.
Full Field Measurements of the Dynamic Deformation Field Around a Growing Adiabatic Shear Band at the Tip of a Dynamically Loaded Crack or Notch, J. Mech. Solids, 42, n°11, 1994, p. 1679-1697. 43

[62] ZHOU M., ROSAKIS A.J. & RAVICHANDRAN G.
On the Growth of Shear Bands and Failure Modes Transition in Prenotched Plates, a Comparison of a Singly and Doubly Notched Specimens, 1996, Submitted to Int. J. Plasticity. 47

[63] TIPPUR, KRISHNASWAMY & ROSAKIS A.J.
A Coherent Gradient Sensor for Crack Tip Deformation Measurements : Analysis and Experimental Results, Caltech SM-Report 89-1, 1989, (Int. J. Fracture, 48, p. 193). 50

[64] HARTLEY K.A., DUFFY J. & HAWLEY R.H.
Measurements of the Temperature Profile During Shear Band Formation in Steels Deforming at High Strain Rates, Army Research Office Report, n° DAAG 29-85-K-0003/2, Brown University, 1986. 50

[65] VON KARMAN T. & DUVEZ P.
The Propagation of Plastic Deformation in Solids, J. of Applied Physics, Vol. 21, 1950, p. 987-994. 70

[66] JONES G.A.
High Speed Photography, Chapman and Hall, 1952, London. 71

[67] CHESTERMAN W.D.
The Photography Study of Rapid Events, Oxford Univ. Press, 1954, Oxford. 71

[68] CATALOGUE DES CAMERAS ELECTRONIQUES
Commission d'Imagerie Rapide et de Photographie, Association Nationale de la recherche Technique, Paris, Fev. 1988. 71

[69] SYSTEME TSN 506 NORMA
Division Systèmes Electroniques, Bagneux, 1990. 73

[70] KLEPACZKO J.R.
Adiabatic Shear Bands, Rewiew of Experimental Techniques and Results, Mécanique Modélisation Numérique et Dynamique des Matériaux, C.N.R.S, Publication du LMA N°124, 1991, p. 335. 71

[71] SUTTER G., FAURE L., MOLINARI A., KELPLACZKO J.R., DUDZINSKI D.
An Experimental Study of High Speed Orthogonal Machining, à paraître dans J. Eng. Indus., Nov. 1997. 72

[72] FAURE L. & KLEPACZKO J.R.
Dispositif Video CCD Rapide, Rapport final, Programme G.D.R. 972, Impact des Matériaux. 85

[73] MERCHANT
Basic Mechanics of the Metal Cutting Process, J. Applied Mech., Vol. 11, 1944, p. A168-A175. 132

[74] KOMANDURI R., BROWN R.H.
On the Mechanics of Chip Segmentation in Machining, J. of Eng. for Industry, Vol. 103, 1981 p. 33. 133

[75] **Bayoumi A.E. & Xie Q.E.**
Some Metallurgical Aspects of Chip Formation in Cutting TA 6V Alloy, Materials Science and Engineering, A190, 1995, p. 173-180. 134

[76] **Recht R.F.**
A Dynamic Analysis of High Speed Machining, in High Speed Machining, edited by R. Komanduri & al., 1984, ASME. 141

[77] **Molinari A. & Dudzinski D.**
C.R. Acad Sci., t.315, Serie 2, 1992, p. 399-405. 141