

YASSIR SADKI

**CARACTÉRISATION DES EMPREINTES DE  
CONTACT DE DEUX FILS D'ALUMINIUM SOUS  
UNE FORCE NORMALE**

Mémoire présentée  
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval  
dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique  
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

2007

# *Résumé*

Le travail de recherche de ce mémoire, porte sur la mesure expérimentale d'empreintes résiduelles lorsque deux fils d'aluminium sont mis en contact par une force normale.

Le but de la recherche, présenté en introduction, est d'établir la relation expérimentale entre la force normale de contact et la trace plastique résultante du contact entre deux cylindres croisés.

Au second chapitre, l'aperçu théorique est un résumé de la mécanique de contact appliquée aux cylindres où on présente les équations relatives à des surfaces lisses et à des surfaces rugueuses. Le but est de mettre en évidence les paramètres influençant le contact.

Dans le troisième chapitre, on présente les caractéristiques de l'équipement technique employé lors du travail expérimental ainsi que les équations définissant le principe de fonctionnement de la technique des jauges de déformation utilisée pour étalonner les deux montages expérimentaux.

Ces derniers sont décrits dans le chapitre quatre ainsi que leurs processus d'étalonnage.

Le chapitre cinq présente les résultats expérimentaux de l'aire de la trace plastique en fonction de la force normale, pour des angles d'intersection des fils de  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$ .

L'analyse des résultats expérimentaux, dans le chapitre six, montre qu'il existe une correspondance entre les dimensions et la forme de l'aire des traces plastiques sur la surface des fils d'aluminium et la force normale appliquée au point de contact des fils croisés. L'aire de la trace plastique varie linéairement en fonction de la force normale appliquée pour les trois angles d'intersection testés, soient  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  et  $90^\circ$ .

La pente de ces droites expérimentales est pratiquement la même et l'influence de l'angle d'intersection ne semble pas avoir un effet significatif.

La dispersion des résultats expérimentaux par rapport aux droites expérimentales déduites par régression linéaire est très réduite.

La conclusion de ce mémoire résume la contribution du travail de recherche et énumère certains travaux futurs qui pourraient être envisagés.

## *Remerciements*

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Monsieur Sylvain Goudreau, pour sa disponibilité, son appui, ses précieux conseils et sa patience. Tout le long de ma maîtrise, Monsieur Sylvain Goudreau m'a guidé de multiples façons et a su m'insuffler la motivation nécessaire pour faire un travail de recherche de qualité.

J'aimerai aussi remercier Monsieur Alain Cardou, le co-directeur pour m'avoir fait confiance dans la réalisation de ce mémoire. Aussi, je n'oublierai pas de remercier toutes les personnes du département de génie mécanique qui m'ont apporté leur aide au cours de des années que j'ai passé à l'université Laval.

Enfin je voudrai remercier mes parents qui m'ont soutenu financièrement et moralement pour venir étudier et vivre au Québec. Ma femme Ouafa qui a toujours été à mes côtés pour me soutenir dans les moments difficiles et s'occuper de notre petit bébé Aymen. Et tous les amis et les personnes que j'ai rencontré ces dernières années, spécialement : Amine, Yasser, Slim, Salim et Soufiane.

# *Table des matières*

<i>Résumé</i>	<i>I</i>
<i>Remerciements</i>	<i>II</i>
<i>Table des matières</i>	<i>III</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>IV</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>VII</i>
<i>Liste des symboles</i>	<i>VIII</i>
<i>Liste des annexes</i>	<i>X</i>
<b>Chapitre 1</b>	
<i>Introduction</i>	1
<b>Chapitre 2</b>	
<i>Aperçu théorique</i>	
2.1 Introduction	3
2.2 Contact entre deux surfaces lisses	3
2.3 Contact entre deux surfaces rugueuses	6
<b>Chapitre 3</b>	
<i>Description du matériel expérimental</i>	
3.1 Matériel expérimental	10
3.2 Principe de fonctionnement de la cellule de charge	14
<b>Chapitre 4</b>	
<i>Préparation du travail expérimental</i>	
4.1 Objectif du travail expérimental	19
4.2 Description du montage	19
4.3 Étalonnage des cellules de charge	23
4.4 Étalonnage du montage	28
4.5 Matériau	34
<b>Chapitre 5</b>	
<i>Travail expérimental</i>	
5.1 Programme d'essais	35
5.2 Résultats	36
<b>Chapitre 6</b>	
<i>Analyse des résultats</i>	
6.1 Relation entre l'aire de contact et la charge appliquée	55
6.2 Rapport b/a	58
6.3 Influence de l'état de surface	64
<i>Conclusion</i>	65
<i>Bibliographie</i>	66
<i>Annexes</i>	68



## *Liste des figures*

<b><i>Figure 2.1</i></b>	Contact Hertzien (du type contact non conforme) de deux corps élastiques	4
<b><i>Figure 2.2</i></b>	État de surface d'un fil électrique	8
<b><i>Figure 3.1</i></b>	Somme des tensions dans la boucle B-A-C-G-B	14
<b><i>Figure 3.2</i></b>	Somme des tensions dans la boucle B-D-C-G-B	15
<b><i>Figure 3.3</i></b>	Somme des tensions dans la boucle B-A-E <sub>i</sub> -D-B	15
<b><i>Figure 3.4</i></b>	Somme des courants au nœud B	16
<b><i>Figure 3.5</i></b>	Somme des courants au nœud C	16
<b><i>Figure 4.1</i></b>	Aperçu du montage expérimental	21
<b><i>Figure 4.2</i></b>	Photo du montage expérimental	22
<b><i>Figure 4.3.1</i></b>	Courbe d'étalonnage de la cellule de charge CC-100	24
<b><i>Figure 4.3.2</i></b>	Écart entre les résultats de l'étalonnage de la cellule CC-100 et l'équation d'étalonnage retenue	25
<b><i>Figure 4.4.1</i></b>	Courbe d'étalonnage de la cellule de charge CC-1000	26
<b><i>Figure 4.4.2</i></b>	Écart entre les résultats de l'étalonnage de la cellule CC-1000 et l'équation d'étalonnage retenue	27
<b><i>Figure 4.5.1</i></b>	Courbe d'étalonnage du montage FA	29
<b><i>Figure 4.5.2</i></b>	Écart entre les résultats de l'étalonnage du montage FA et l'équation d'étalonnage retenue	30

<b>Figure 4.6.1</b>	Courbe d'étalonnage du montage AE	31
<b>Figure 4.6.2</b>	Écart entre les résultats de l'étalonnage du montage AE et l'équation d'étalonnage retenue	32
<b>Figure 4.7</b>	Courbe d'étalonnage du montage AE à l'aide de CC-100	33
<b>Figure 5.1</b>	Essais de deux fils croisés selon un angle de 90 degrés avec le montage FA	37
<b>Figure 5.2</b>	Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.1)	38
<b>Figure 5.3</b>	Essais de deux fils croisés selon un angle de 90 degrés avec le montage AE	40
<b>Figure 5.4</b>	Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.3)	41
<b>Figure 5.5</b>	Essais de deux fils croisés selon un angle de 90 degrés avec les montages FA et AE	42
<b>Figure 5.6</b>	Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.5)	43
<b>Figure 5.7</b>	Essais de deux fils croisés selon un angle de 60 degrés avec le montage FA	45
<b>Figure 5.8</b>	Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.7)	46
<b>Figure 5.9</b>	Essais de deux fils croisés selon un angle de 30 degrés avec le montage AE	48
<b>Figure 5.10</b>	Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.9)	49
<b>Figure 5.11.A</b>	Distribution de b/a a partir des résultats du tableau 5.5	53
<b>Figure 5.11.B</b>	Distribution de b/a a partir des résultats du tableau 5.6	53
<b>Figure 5.12</b>	Distribution de b/a a partir des résultats des tableaux 5.7 et 5.8	54
<b>Figure 6.1</b>	Essais pour les angles d'intersection de 90, 60 et 30 degrés	57
<b>Figure 6.2.1</b>	Écart par rapport à la valeur 1 d'après les résultats du tableau 5.5	58

<b>Figure 6.2.2</b>	Écart entre les résultats des essais à 30 degrés et le calcul théorique	62
<b>Figure 6.2.3</b>	Écart entre les résultats des essais à 60 degrés et le calcul théorique	63
<b>Figure 6.3</b>	Force de 74N (Contact à 90 degrés)	64
<b>Figure 6.4</b>	Force de 1616N (Contact à 90 degrés)	64

## *Liste des tableaux*

<b><i>Tableau 4.1</i></b>	Composition des fils d'aluminium	34
<b><i>Tableau 4.2</i></b>	Caractéristiques mécaniques des fils d'aluminium	34
<b><i>Tableau 4.3</i></b>	Caractéristiques mécaniques des aluminiums EC-H19 et 1350H19	34
<b><i>Tableau 5.1</i></b>	Essais à 90 degrés à l'aide du montage FA	36
<b><i>Tableau 5.2</i></b>	Essais à 90 degrés à l'aide du montage AE	39
<b><i>Tableau 5.3</i></b>	Essais à 60 degrés à l'aide du montage FA	44
<b><i>Tableau 5.4</i></b>	Essais à 30 degrés à l'aide du montage AE	47
<b><i>Tableau 5.5</i></b>	Rapport b/a pour les essais à 30 degrés (montage AE)	50
<b><i>Tableau 5.6</i></b>	Rapport b/a pour les essais à 60 degrés (montage FA)	51
<b><i>Tableau 5.7</i></b>	Rapport b/a pour les essais à 90 degrés (montage FA)	51
<b><i>Tableau 5.7</i></b>	Rapport b/a pour les essais à 90 degrés (montage AE)	52

## *Liste des symboles*

$p_o$ :	Pression maximale
$\delta$ :	Écrasement
$a$ :	Rayon de la trace plastique
$A$ :	Séparation maximale entre surfaces
$AE$ :	Amplitudes Élevées
$Al$ :	Aluminium
$b/a$ :	Rapport des demi-axes de l'empreinte plastique
$CC-100$ :	Cellule de charge dont la charge maximale est 100 lbs
$CC-1000$ :	Cellule de charge dont la charge maximale est 1000 lbs
$E$ :	Module de Young
$E^*$ :	Module de Young équivalent
$E_m$ :	Tension imposée au pont de Wheatstone de jauges
$F$ :	Fixe
$FA$ :	Faibles Amplitudes
$Fe$ :	Fer
$h$ :	Séparation entre surfaces
$HP$ :	Hewlett Packard
$I$ :	Intensité
$kg$ :	Kilogramme

lbs :	livres
m :	mètre
M :	Mobile
MEB :	Microscope à balayage électronique
N :	Newton
P :	Force normale
Pl :	Force linéaire
$Q_c$ :	Charge
$R$ :	Rayon du cylindre
Si :	Silicium
$tg$ :	Tangente
$\alpha, \beta, \theta$ :	Angles
$\nu$ :	Module de Poisson
$p, p^*$ :	<i>Pression</i>
$\bar{u}_z$ :	Déplacement élastique normal
$\lambda$ :	Longueur d'onde
$\bar{p}$ :	Pression moyenne

## *Liste des annexes*

<i>Annexe 1.a</i>	Caractéristiques de la machine de traction SATEC
<i>Annexe 1.b</i>	Caractéristiques de l'amplificateur de jauges
<i>Annexe 2</i>	Dessins de fabrication des montages FA et AE
<i>Annexe 3</i>	Résultats de l'étalonnage de la cellule de charge CC-100
<i>Annexe 4</i>	Résultats de l'étalonnage de la cellule de charge CC-1000
<i>Annexe 5</i>	Résultats de l'étalonnage du montage FA avec la cellule de charge CC-100
<i>Annexe 6</i>	Résultats de l'étalonnage du montage AE avec la cellule de charge CC-1000
<i>Annexe 7</i>	Résultats de l'étalonnage du montage AE avec la cellule de charge CC-100
<i>Annexe 8</i>	Essais de traction effectués sur les fils d'aluminium
<i>Annexe 9</i>	Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 60 degrés
<i>Annexe 10</i>	Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 30 degrés
<i>Annexe 11</i>	Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 90 degrés

# Chapitre 1

## *Introduction :*

Le groupe de recherche **G**roupe de **RE**cherche sur la **M**écanique des **C**onducteurs **A**ériens (GREMCA) fait l'étude des conducteurs aériens à haute tension. Il en étudie les propriétés mécaniques et géométriques et analyse les phénomènes entraînant la fatigue des conducteurs.

Les conducteurs électriques aériens étudiés sont des solides composés de fils enroulés de façon hélicoïdale et sont attachés aux pylônes d'une ligne de transmission par des pinces de suspension.

Les débattements des conducteurs électriques aériens par rapport aux pinces de suspension entraînent des problèmes de fatigue. Les bris des fils sont concentrés aux abords des pinces de support et se situent invariablement aux contacts entre fils des couches adjacentes ou au contact entre la couche externe d'un conducteur et son support.

Le but de notre étude est d'établir la relation expérimentale entre la force normale entre deux fils d'aluminium et la trace plastique résultant du contact des fils d'aluminium. L'angle d'intersection des fils en contact sera considéré.

Le travail présenté dans ce mémoire porte principalement sur l'étude des traces plastiques résultant du contact entre les fils qui composent le conducteur aérien. Ces traces sont le résultat d'une force de contact entre fils suffisamment importante pour entraîner une déformation plastique de la surface cylindrique des fils d'aluminium.



Le travail se divise en quatre parties :

- Courte présentation théorique :
  - Contact entre deux surfaces lisses.
  - Contact entre deux surfaces rugueuses.
- Bancs d'essais :
  - Développement.
  - Étalonnage.
- Réalisation des essais :
  - Essais selon trois angles d'intersection.
  - Mesure des aires des empreintes plastiques.
- Analyse des résultats expérimentaux :
  - Établissement des relations "Aire des empreintes plastiques " versus "Force normale".
  - Étude des dimensions transversales des empreintes plastiques.
  - Étude de l'effet de l'angle d'intersection.

## Chapitre 2

### *Aperçu théorique :*

#### **2.1 Introduction :**

Dans les sections qui suivent, nous présentons les équations analytiques permettant de modéliser le contact élastique entre des corps dont les surfaces peuvent être lisses ou rugueuses.

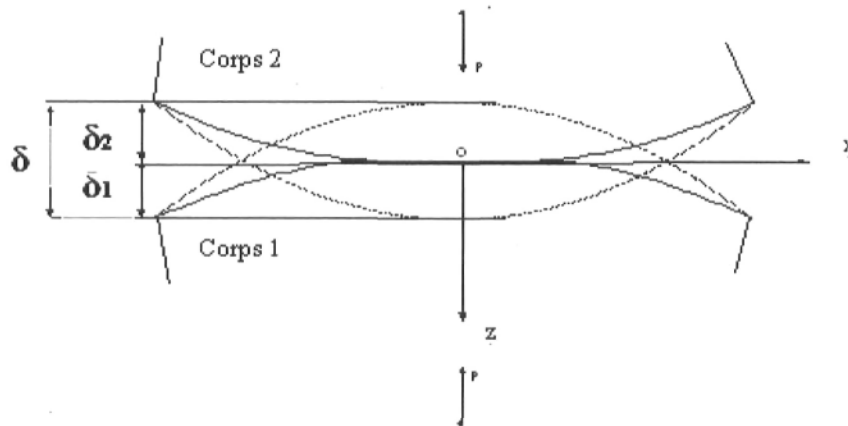
La rugosité de surface cause une augmentation de la pression de contact et diminue significativement l'aire de contact réelle comparativement à celle des surfaces lisses.

#### **2.2 Contact entre deux surfaces lisses :**

Hertz a développé les équations modélisant le comportement élastique du contact de deux cylindres aux surfaces lisses. Ce contact est du type non-conforme, ce qui implique que la séparation initiale des corps en contact est une fonction parabolique ; ainsi, la courbure locale des corps au point de contact initial définit la géométrie ayant une influence sur le comportement mécanique des corps.

Pour le cas de deux cylindres de même diamètre qui se croisent selon un angle de  $90^\circ$ , l'aire de contact est circulaire. Si les deux cylindres sont parallèles (angle d'intersection de  $0^\circ$ ), l'aire de contact est rectangulaire. Pour un angle d'intersection quelconque, l'aire de contact devient elliptique.

La figure 2.1 montre une vue agrandie du contact de 2 cylindres élastiques parallèles où sont définis les écrasements des cylindres en contact. La charge normale appliquée aux deux cylindres parallèles est une charge linéique  $P_l$  [N/m].



**Figure 2.1 : Contact Hertzien (contact de type non-conforme) de deux corps élastiques non-conformes**

Lorsque les cylindres sont croisés selon un angle quelconque, la charge normale devient une force ponctuelle  $P$ .

Lorsque l'angle d'intersection des deux cylindres de même diamètre est de  $90^\circ$ , l'aire de contact est circulaire de rayon  $a$ .

D'après la théorie de Hertz, Johnson [5], on a :

$$a = (3PR/4E^*)^{1/3}. \quad (2.1)$$

où :  $P$  : la charge normale.

$$\frac{1}{E^*} = \left( \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2} \right) \quad (2.2)$$

$$\frac{1}{R} = \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (2.3)$$

$E_1$  : Module de Young du cylindre 1  
 $E_2$  : Module de Young du cylindre 2  
 $\nu_1$  : Module de Poisson du cylindre 1  
 $\nu_2$  : Module de Poisson du cylindre 2  
 $R_1$  : Rayon du cylindre 1  
 $R_2$  : Rayon du cylindre 2

L'écrasement des deux cylindres de même diamètre en contact, est :

$$\delta = a^2 / R = (9 P^2 / 16 RE^*)^{2/3} . \quad (2.4)$$

La pression maximale à l'interface de contact des deux cylindres identiques en contact, est :

$$p_0 = (6PE^*^2 / \pi^3 R^2)^{1/3} \quad (2.5.a)$$

et la distribution de la pression est :

$$p(r) = p_0 \sqrt{1 - (r^2 / a^2)} \quad (2.5.b)$$

où r correspond à une position radiale de l'interface de contact par rapport à l'origine du systèmes d'axes x et y.

### **2.3 Contact entre deux surfaces rugueuses :**

À la section 2.2, l'étude du contact élastique de deux cylindres identiques à  $90^\circ$  avec surfaces lisses a montré que l'aire de contact (éq. 2.1) et que la distribution de la pression (éq.2.5.b) sont des fonctions non linéaires de la force normale et de la constante géométrique  $1/R$  (éq.2.3).

En réalité, les surfaces ne sont jamais parfaitement lisses et présentent toujours des aspérités. Par conséquent, le contact entre ces deux surfaces est discontinu, et l'aire de contact réelle est une fraction de l'aire de contact nominale.

On a déjà mentionné que dans le contact entre deux solides élastiques, l'aire de contact dépendait du profil relatif des deux surfaces et ce, avant l'application de la charge.

Dans ce qui suit, on montre l'influence de l'état de surface (ou les caractéristiques géométriques définissant la surface) lors d'un contact élastique avec un plan lisse élastique.

### 2.3.1 Caractéristiques des surfaces rugueuses :

Si une surface plane élastique est soumise à une pression de type sinusoïdal définie par :

$$p = p^* \cos(2\pi x/\lambda) \quad (2.6.a)$$

Il en résulte des déplacements normaux sinusoïdaux. Cette pression pousse la surface vers le bas puis la tire vers le haut cycliquement.

D'après [5], les déplacements élastiques normaux de la surface soumise à cette pression peuvent être définis par :

$$\bar{u}_z = \frac{(1-\nu^2)\lambda}{\pi E} p^* \cos(2\pi x / \lambda) + const \quad (2.6.b)$$

La variation sinusoïdale de la pression provoque une surface sinusoïdale de même longueur d'onde  $\lambda$ .

Pour faire une analyse simple, la surface inférieure de la figure 2.2 est de forme sinusoïdale  $z=f(x)$  en contact avec un plan lisse déformable.

La surface inférieure, montrée à la figure 2.2, peut correspondre à la section transversale d'un fil d'aluminium. La surface cylindrique des fils d'aluminium possède une rugosité dont les stries sont parallèles à l'axe longitudinal des fils d'aluminium. On pose que les stries ont une forme sinusoïdale

La séparation entre les deux surfaces de la figure 2.2, est :

$$h(x) = A [1 - \cos(2\pi x / \lambda)] \quad (2.7)$$

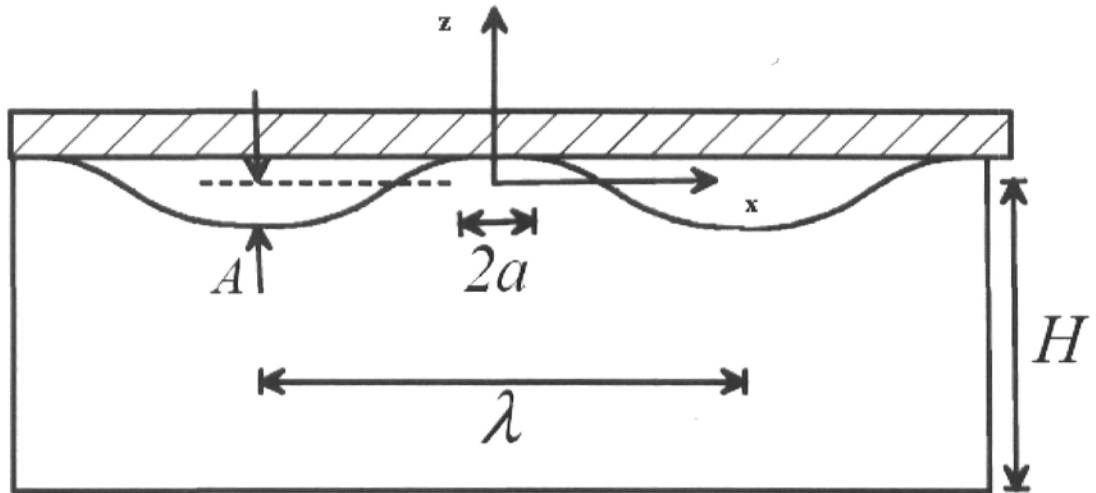


Figure 2.2 : État de surface d'un fil électrique

La distribution de la pression est décrite par :

$$p(x) = \bar{p} + p^* \cos(2\pi x / \lambda) \quad (2.8)$$

avec :

$$p^* = \pi E^* A / \lambda \quad (2.9)$$

$\bar{p}$  est la pression uniforme qui produit des déplacements uniformes. Pour que la pression reste positive sur toute la longueur d'onde " $\lambda$ ", il faut que  $\bar{p} \geq p^*$ .

D'après Westergaard (1939), Johnson [5] :

$$\text{Si } \bar{p} = (\pi E^* A / \lambda) \sin^2(\pi a / \lambda) \quad (2.10)$$

on obtient que :

$$2a / \lambda = (2 / \pi) \sin^{-1}(\bar{p} / p^*)^{1/2} \quad (2.11)$$

Ainsi, la largeur de contact (représentée par “ $2a$ ” dans l’équation (2.11)) dépend de la pression  $\bar{p}$  exercée ainsi que des caractéristiques de la surface ( $\lambda$  et  $A$ ).

Cette analyse élastique simple permet de dire que l’aire de contact plastifiée pourrait avoir des contours irréguliers plus ou moins bien définis.



## Chapitre 3

### ***Description du Matériel Expérimental :***

#### **3.1 Matériel Expérimental :**

Le matériel expérimental utilisé lors des essais se compose de : deux cellules de charge (Load Cell), d'un amplificateur de jauge, de deux multimètres, de masses étalon, d'un appareil de traction SATEC et d'un Microscope à Balayage Électronique (MEB).

Les principales caractéristiques techniques de ce matériel sont énumérées ci-dessous.

##### ***3.1.1 Cellule de charge (Load Cell) :***

Pour notre travail expérimental deux cellules de charge seront utilisées.

La première cellule de charge, identifiée CC-100, est utilisée pour étalonner le montage expérimental construit pour les faibles charges nominales, identifié FA. C'est une cellule qui peut supporter une charge maximale de 100 lbs ( $\sim 454 N$ ). Ces caractéristiques sont :

Marque : LEBOW

Model : 1/571-01

Range : 0-100 lbs

Exc. : 10.0

S/N : 462 875

La deuxième cellule de charge, identifiée CC-1000, est utilisée pour étalonner le montage expérimental construit pour les grandes charges nominales, identifié AE. C'est une cellule qui peut supporter une charge maximale de 1000 lbs ( $\sim 4536 N$ ). Ces caractéristiques sont :

Marque : LEBOW  
Model 3173-1K  
Range : 0-1000 lbs  
S/N : 1939

### ***3.1.2 Multimètres :***

Les multimètres, utilisés dans nos tests, sont des multimètres de type HP 34401A, qui fonctionnent en mode continu et qui sont réglés sur la fonction automatique.

La précision des multimètres, pour la mesure de la tension lue, est de :

$\pm 0.01\%$  de la lecture

### ***3.1.3 Masses étalon :***

Les masses étalon utilisées lors de l'étalonnage de la cellule CC-100 sont de forme semi-circulaire et de masse maximale de 5 kg. Celles-ci sont préalablement étalonnées à l'aide d'une balance électronique.

La précision des masses étalon utilisées est de :  $\pm 0.01 \%$

Pour l'expérience une masse totale de 50Kg est nécessaire.

### ***3.1.4 Machine de traction SATEC :***

Une machine de traction universelle SATEC, modèle APEX T-20000, a servi à étalonner la grande cellule de charge.

La précision de la machine est  $\pm 0.5 \%$  de la charge ou  $\pm 1.0 \%$  de la gamme.

Les caractéristiques de la machine de traction (SATEC) sont présentées à l'annexe : 1.a.

### ***3.1.5 Amplificateur de jauge :***

Les amplificateurs de ponts de jauge acceptent des ponts complets de jauges. La tension d'alimentation électrique du module d'amplificateurs de pont de jauges est ajustée initialement et est maintenue fixe pour toutes les manipulations expérimentales subséquentes (c'est-à-dire pour les divers étalonnages et lors des acquisitions de mesures expérimentales).

Les gains d'amplification de chacun des amplificateurs sont ajustés lors de l'étalonnage des différents équipements (cellules de charge CC-100 et CC-1000 et montages AE et FA). Ils sont, aussi, maintenus fixes par la suite.

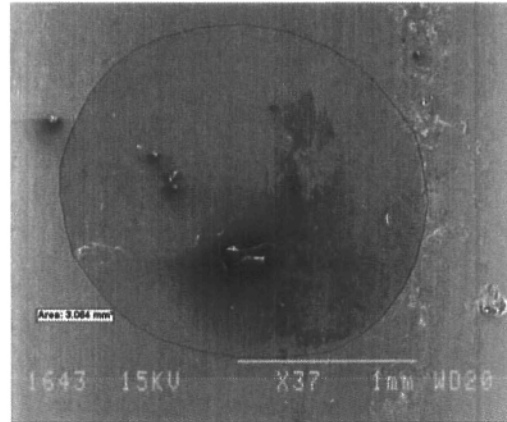
Les caractéristiques du module et des amplificateurs sont présentées à l'annexe 1.b.

### ***3.1.6 Microscope à balayage électronique :***

Les traces plastiques, laissées sur le fil d'aluminium, après contact avec un autre fil, sous charge normale, sont photographiées à l'aide d'un Microscope à balayage électronique.

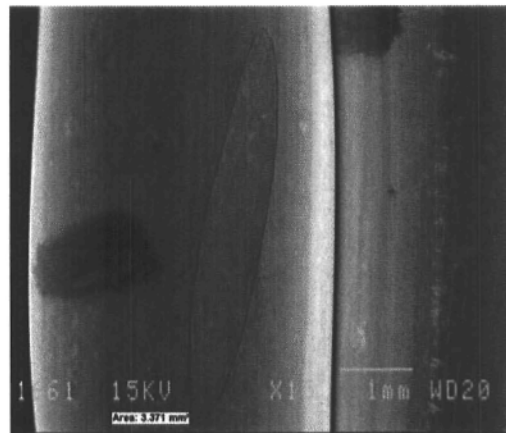
Ensuite, les images sont traitées à l'aide du Logiciel Clemex et l'aire des traces plastiques est mesurée.

*Exemples de photos :*



**Aire = 3.064 mm<sup>2</sup>**

*Photo 1 : Contact entre fils avec un angle d'intersection de 90 degrés*



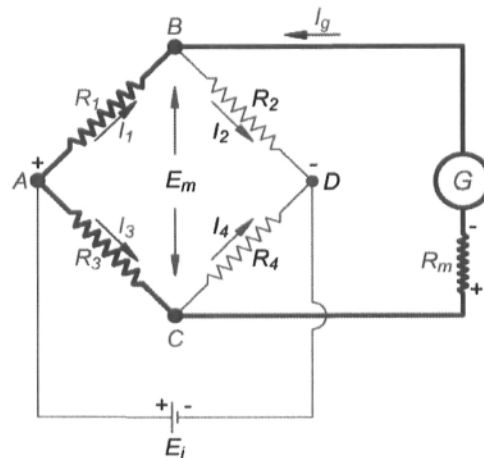
**Aire = 3.371 mm<sup>2</sup>**

*Photo 2 : Contact entre fils avec un angle d'intersection de 30 degrés*

### 3.2 Principe de fonctionnement d'une cellule de charge :

Les cellules de charge ainsi que les montages sont pourvus de jauges montées en pont complet de Wheatstone. Les jauges de déformation sont des résistances dont la valeur nominale varie en fonction des déformations qu'elles subissent (allongement ou contraction). Le principe de fonctionnement du pont de Wheatstone est démontré par le développement des équations 3.1 à 3.5 associées aux figures 3.1 à 3.5.

Les équations relatives à la sommation des tensions électriques dans différentes boucles du pont de Wheatstone sont données aux équations 3.1 à 3.3 et font référence respectivement aux figures 3.1 à 3.3.



**Figure 3.1 : Somme des tensions dans la boucle B-A-C-G-B**

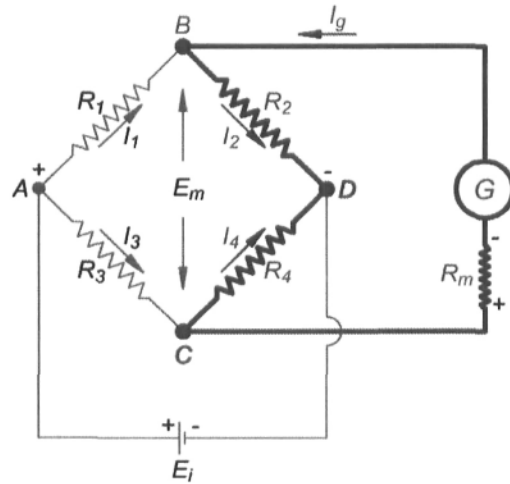


Figure 3.2 : Somme des tensions dans la boucle B-D-C-G-B

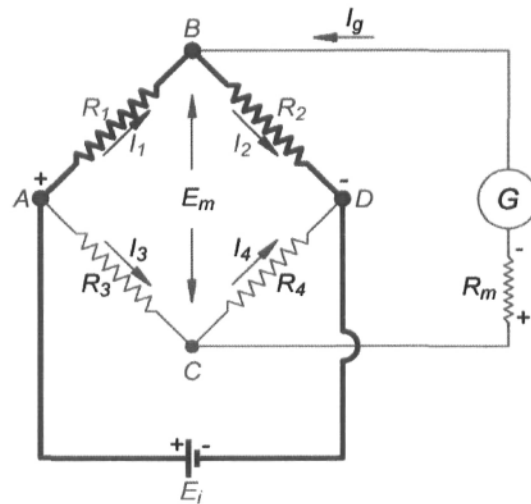


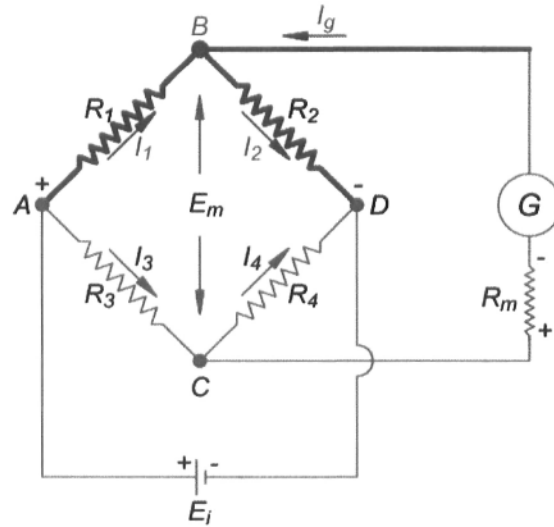
Figure 3.3 : Somme des tensions dans la boucle B-A-E<sub>i</sub>-D-B

$$\text{Figure 3.1} \Rightarrow -I_1 R_1 + I_3 R_3 + I_g R_m = 0 \quad (3.1)$$

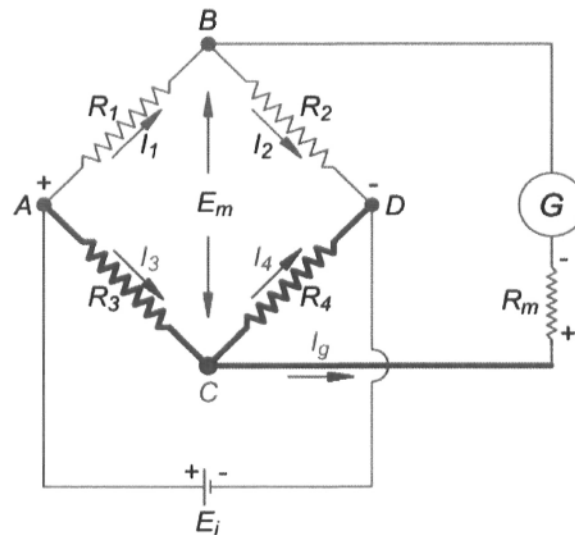
$$\text{Figure 3.2} \Rightarrow I_2 R_2 - I_4 R_4 + I_g R_m = 0 \quad (3.2)$$

$$\text{Figure 3.3} \Rightarrow -I_1 R_1 + E_i - I_2 R_2 = 0 \quad (3.3)$$

La somme des courants aux nœuds B et C (figures 3.4 et 3.5) est donnée respectivement aux équations 3.4 et 3.5.



**Figure 3.4 : Somme des courants au nœud B**



**Figure 3.5 : Somme des courants au nœud C**

$$\text{Figure 3.4} \Rightarrow I_2 = I_1 + I_g \quad (3.4)$$

$$\text{Figure 3.5} \Rightarrow I_4 = I_3 - I_g \quad (3.5)$$

On dispose de 5 équations (de 3.1 à 3.5) et  $R_m$ .

Ainsi :

$$E_m = R_m I_g = \frac{E_i (R_1 R_4 - R_2 R_3)}{\frac{R_1 R_2}{R_m} (R_3 + R_4) + \frac{R_3 R_4}{R_m} (R_1 + R_2) + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (3.6)$$

Lorsque :

$$\begin{aligned} (R_1 R_4 - R_2 R_3) &= 0 \\ \Rightarrow I_g &= 0 \Rightarrow E_m = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

Alors le pont est équilibré.

De plus dans le cas d'un voltmètre :

$$R_m \rightarrow \infty \quad (3.8)$$

$$\Rightarrow E_m = \frac{E_i (R_1 R_4 - R_2 R_3)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (3.9)$$

Les jauges de déformation d'un pont de Wheatstone ont une même valeur nominale  $R_0$  et elles subissent sous traction ou compression, une variation de  $\Delta R_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4$ . Après déformation des jauges,  $R_i = R_0 + \Delta R_i$ . Les résistances  $R_i$  sont donc égales à  $R_0(1 + \delta_i)$  où  $\delta_i = (\Delta R_i / R_0)$ .



La déformation des jauges est reliée à la valeur  $\delta$  par le facteur de jauge selon l'équation  $\delta = F_j \varepsilon$

En introduisant  $\delta_i = F_j \varepsilon_i$  où  $i = 1, 2, 3, 4$  dans l'équation 3.9 et négligeant les termes du deuxième ordre, on obtient l'équation suivante :

$$\Rightarrow E_m = \frac{E_i F_j ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + (\varepsilon_4 - \varepsilon_3))}{2(2 + F_j (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4))} \approx \frac{E_i F_j ((\varepsilon_1 - \varepsilon_2) + (\varepsilon_4 - \varepsilon_3))}{4}$$

Les courbes d'étalonnage des cellules de charge et des montages sont établies en fonction de la variable dépendante  $E_m$  et de la variable indépendante (par exemple, les masses étalon pour l'étalonnage de la cellule CC-100) qui génère les déformations des jauges du pont de Wheatstone.

## Chapitre 4

### *Préparation du travail expérimental :*

#### **4.1 Objectif du travail expérimental :**

L'objectif du travail expérimental est de mesurer la trace plastique laissée lors du contact de deux fils d'aluminium sous charge normale. Pour cela, deux montages sont construits pour pouvoir couvrir une plage suffisante de force normale. Ces deux montages sont similaires et permettent de mettre en contact deux fils d'aluminium de même diamètre, selon un angle d'intersection, tout en exerçant une force normale qui est mesurable en tout temps.

#### **4.2 Description du montage :**

Le premier montage construit peut imposer des forces normales variant jusqu'à 500 N (112 lbs). Il est identifié par **FA** (Faibles Amplitudes). Le second montage (identifié par **AE** pour Amplitudes Élevées) couvre un intervalle de force normale plus élevée [300 N, 1500 N] ([67 lbs, 337 lbs]).

Chaque montage est composé de deux poutrelles horizontales (A1 et A2, fig. 4.1) de même épaisseur montées en parallèle. Ces poutrelles sont montées à leur extrémité sur des pivots; les pivots à chaque extrémité sont deux vis de pression à bout conique mâle qui s'insèrent dans des cônes femelles pratiquées dans la tranche des poutrelles. À une des extrémités de chaque poutrelle, les cônes femelles usinés sont en fait des rainures de section conique qui assurent un degré de liberté dans le sens axial de la poutrelle. Le serrage des vis de pression doit être tel qu'il ne génère pas une friction importante au niveau des pivots. De plus, la sortie plus ou moins prononcée de la pointe des vis de pression permet l'ajustement des lignes médianes des poutrelles dans un même plan horizontal. Des colonnes (B1, B2, B3, B4) maintiennent les poutrelles en place; une plaque F sert de base et rend le tout solidaire.

Les supports C1 et C2 permettent de positionner les fils en contact.

Une rainure cylindrique usinée dans chaque support maintient en place un fil; cette rainure est ajustée « juste » au diamètre du fil. Au centre du support, un chambrage dont la profondeur est tangente au fond de la rainure permet d'éliminer toute restriction latérale au fil. Un tel support est monté à la mi-longueur de chacune des poutrelles.

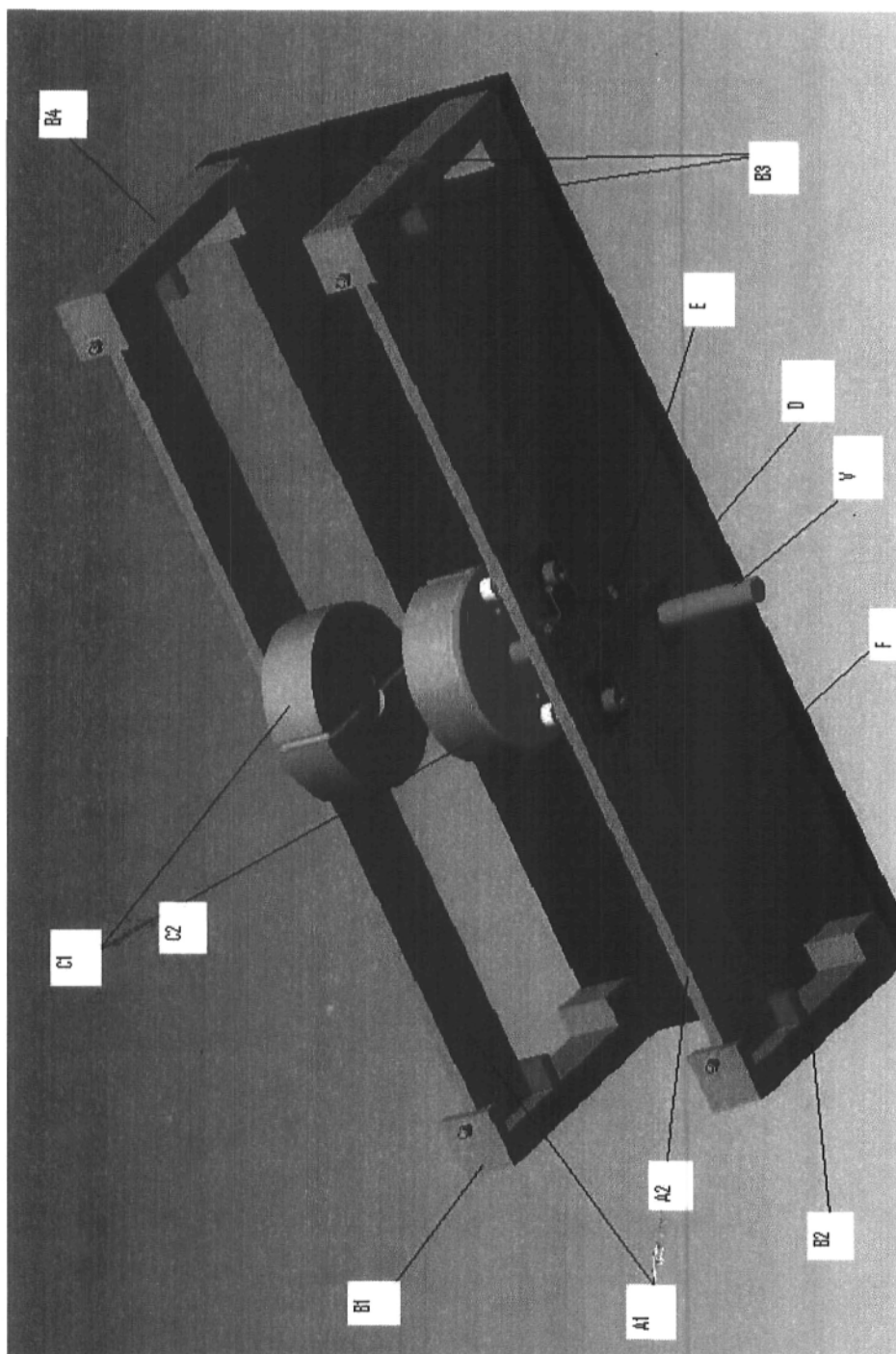
Les supports peuvent être positionnés de telle sorte que les deux fils se croisent à un angle de  $90^\circ$  ou de  $30^\circ$ . Le support C1 est vissé à la poutrelle A1. Une vis V est fixée au support C2; cette vis est guidée axialement dans un alésage usiné dans la pièce D. La pièce D est vissée à la poutrelle A2.

Une rainure axiale est usinée dans la vis. Un ergot E est positionné transversalement à l'alésage de la pièce D et s'insère dans la rainure de la vis. Cet ergot empêche toute rotation axiale du support C2 et maintient l'orientation angulaire fixe des deux fils. Le diamètre de cet ergot est 0.0915 pouces alors que la largeur de la rainure est 0.0930 pouces. Ceci entraîne un jeu pouvant occasionner une variation de l'angle d'intersection des fils d'aluminium de  $\pm 5^\circ$ .

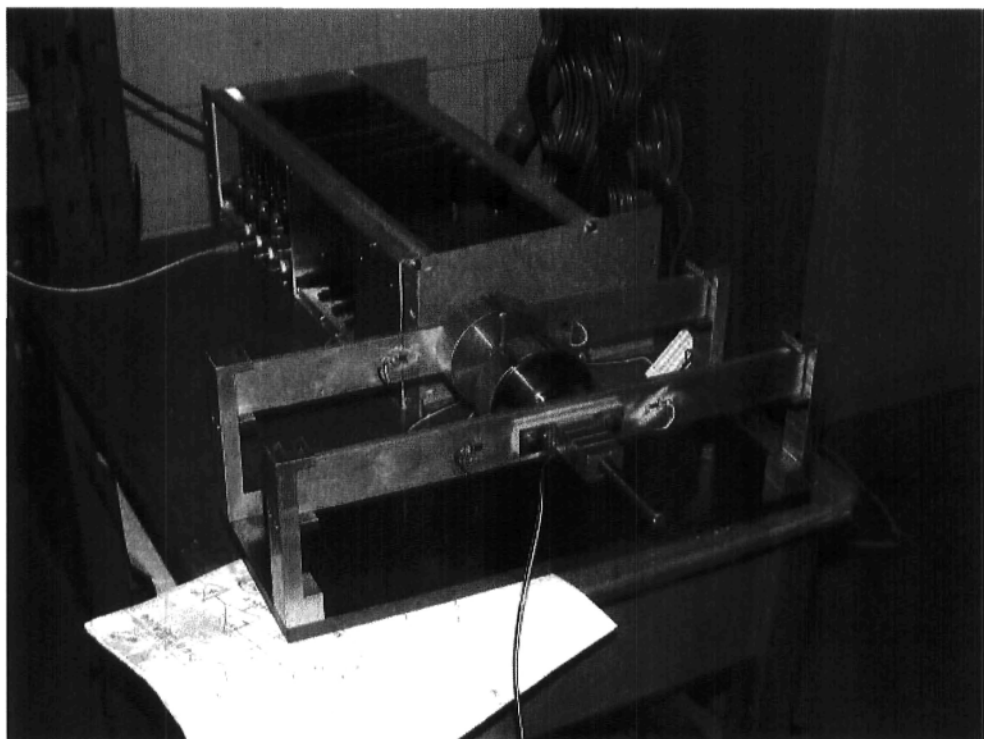
Un écrou, assemblé à la vis entre le support C2 et la poutrelle A2, permet en tournant celui-ci d'éloigner le support C2 de la poutrelle.

Initialement, le support C2 est positionné à la poutrelle A2 de telle sorte que les deux fils d'aluminium soient en contact sans force normale induite. Par la suite, en éloignant le support C2 de la poutrelle A2 par la rotation de l'écrou, un déplacement transversal à chacune des poutrelles est imposé. Une force normale est générée en fonction de la rigidité des poutrelles et des déplacements imposés.

Les dessins de fabrication du montage sont disponibles à l'annexe 2.



*Figure 4.1 : Aperçu du montage expérimental*



*Figure 4.2 : Photo du montage*

## **4.3 Étalonnage des cellules de charge :**

### ***4.3.1 Procédure d'étalonnage des montages***

Des jauges de déformation sont collées sur la poutrelle A1 et sont branchées en pont complet.

Initialement, le montage doit être étalonné; il s'agit donc de faire l'étalonnage de la réponse des jauges du pont de Wheatstone de la poutrelle A1 en fonction de la force normale. Le support C2 est alors remplacé par une cellule de charge dont l'étalonnage a été établi préalablement.

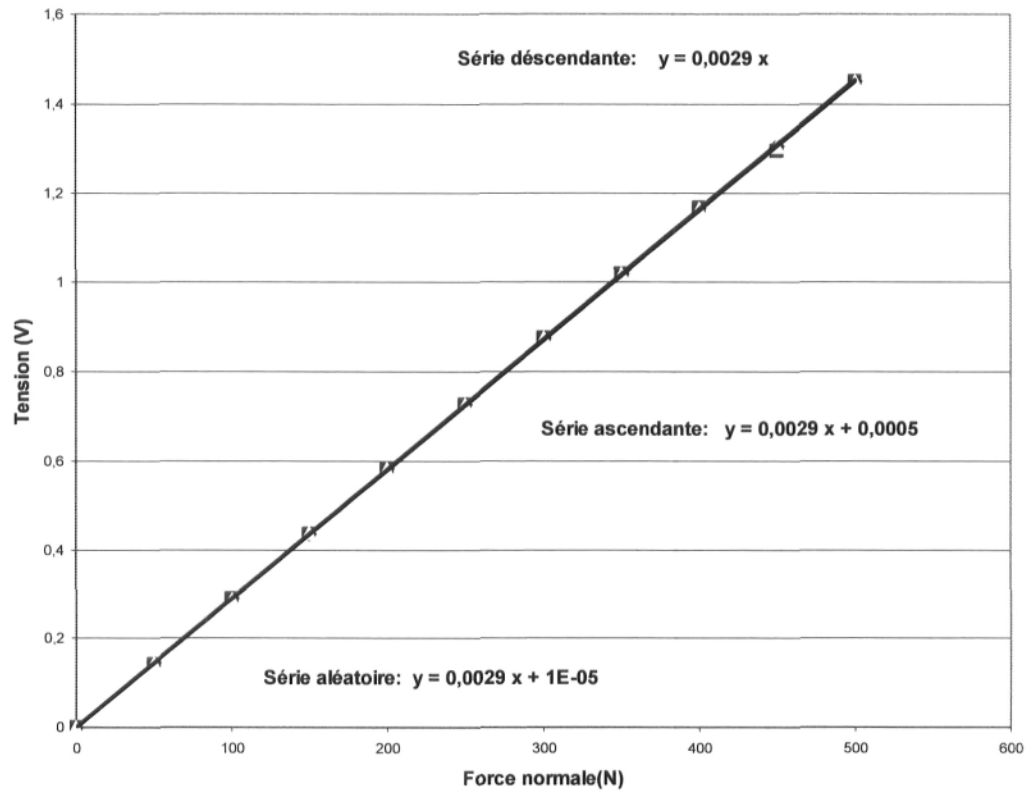
Les vis constituant les pivots de la poutrelle A1 ne seront pas manipulées ultérieurement à l'étalonnage afin de ne pas introduire de variations dans l'étalonnage établi initialement.

### ***4.3.2 Étalonnage de la cellule de charge CC-100 :***

La cellule CC-100 est étalonnée à l'aide des masses étalon. La capacité d'opération de cette cellule de charge est limitée à 100 lbs (un facteur de surcharge égal à 2 est inclus). L'étalonnage est réalisé jusqu'à une force maximale de 500 N (112 lbs).

Trois séries de mesures sont faites, soit une ascendante, une descendante et une aléatoire. La série ascendante consiste à faire des mesures à partir de zéro et à ajouter au fur et à mesure des masses étalons après chaque mesure prise. La série descendante consiste, quant à elle, à débiter la prise de mesures à la charge maximale et à diminuer progressivement jusqu'à zéro. La série aléatoire est une série de mesures prises en augmentant et en diminuant de façon aléatoire la masse présente sur la cellule de charge.

La figure 4.3.1 présente le graphique de l'étalonnage de la série ascendante. Les équations des trois séries de mesure sont inscrites sur le graphique. Les autres droites sont présentées en annexe 3.



*Figure 4.3.1 : Courbe d'étalonnage de la cellule de charge CC-100*

L'équation retenue pour l'étalonnage est :

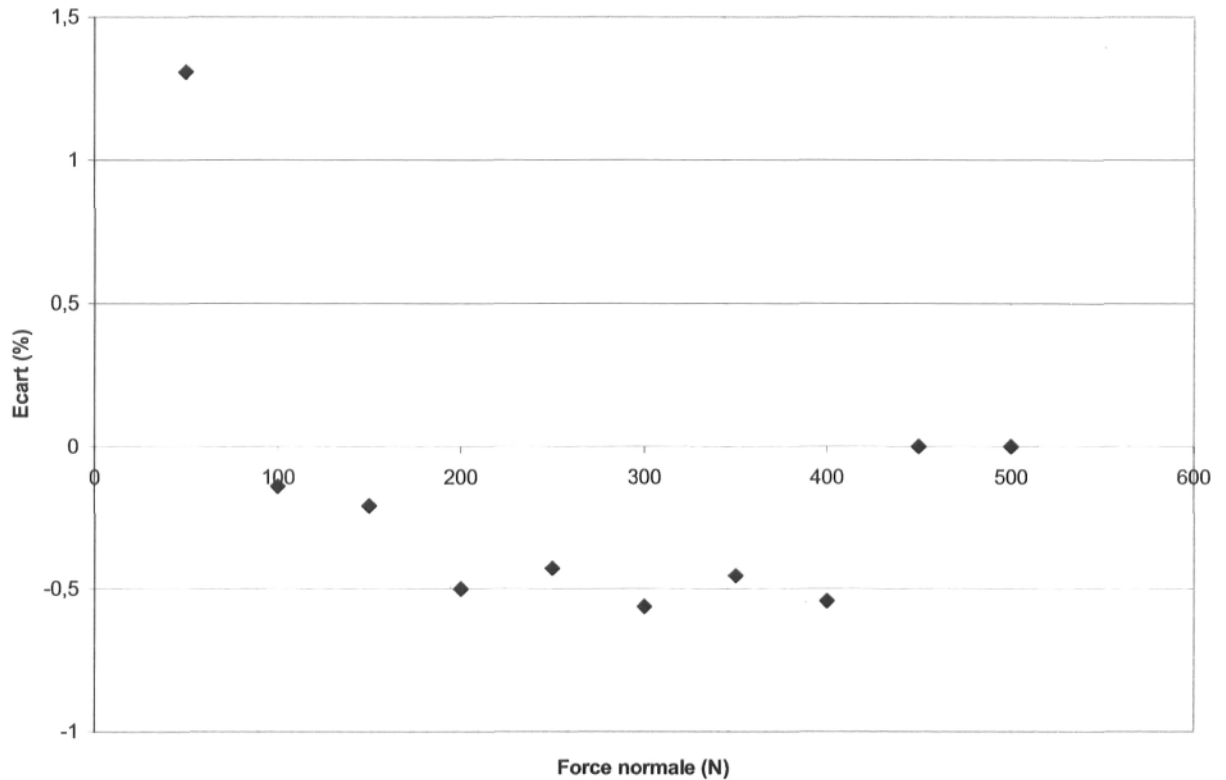
$$\text{Tension (V)} = 0.0029 x F (N) \quad (4.1)$$

Où F est la force normale

L'erreur maximale introduite en considérant l'équation retenue et la charge de 50 N est : +1.3%. Pour les charges supérieures à 100 N, l'erreur devient inférieure à 0.6%.

Les erreurs ont été calculées de la façon suivante :

C'est l'écart en pourcentage entre les résultats des tests et la courbe d'étalonnage retenue. Ces erreurs sont présentées à la figure 4.3.2.



*Figure 4.3.2 : Écart entre les résultats de l'étalonnage de la cellule CC-100 (série ascendante) et l'équation d'étalonnage retenue.*

**Remarque :**

Étant donné que l'ordonnée à l'origine des équations obtenues par régression linéaire a été éliminée dans l'équation 4.1, l'écart dans la figure 4.3.2 est souvent négatif.



### 4.3.3 Étalonnage de la cellule de charge CC-1000 :

Une procédure similaire à celle décrite à la section 4.3.2, est suivie pour étalonner la cellule de charge CC-1000. La capacité d'opération de cette cellule de charge est limitée à 1000 lbs. L'étalonnage est limité à l'intervalle [300 N, 1500 N] ([67 lbs, 337 lbs]). La force de compression utilisée pour la procédure d'étalonnage est générée par la machine de traction – compression Satec selon l'échelle de 100 lbs.

La figure 4.4 présente les droites des séries ascendante, descendante et aléatoire.

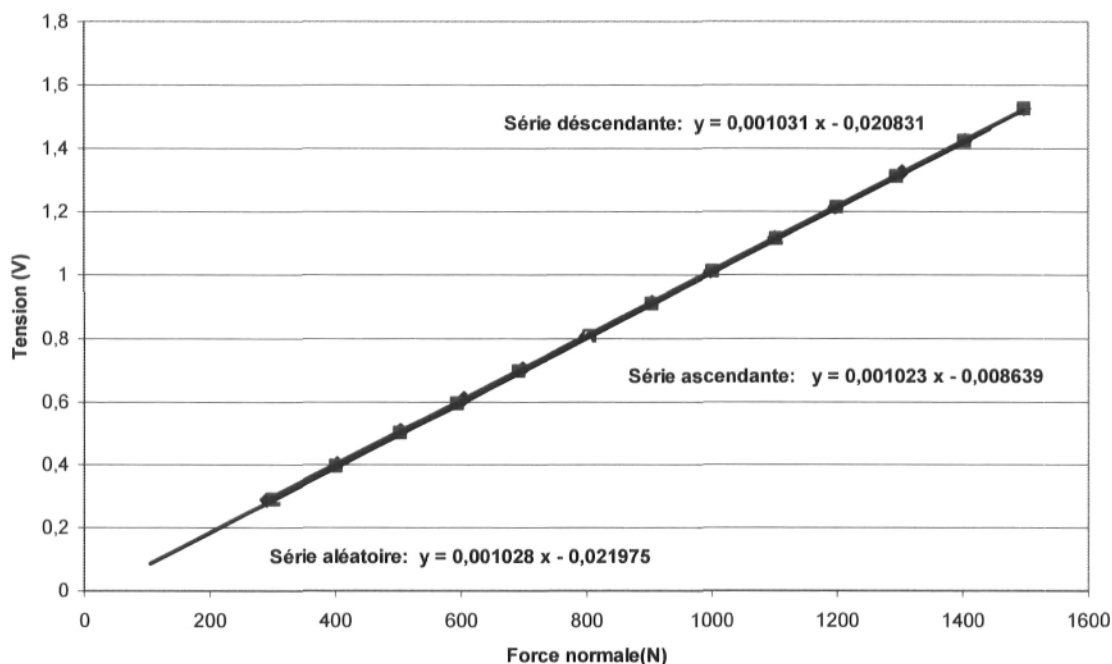
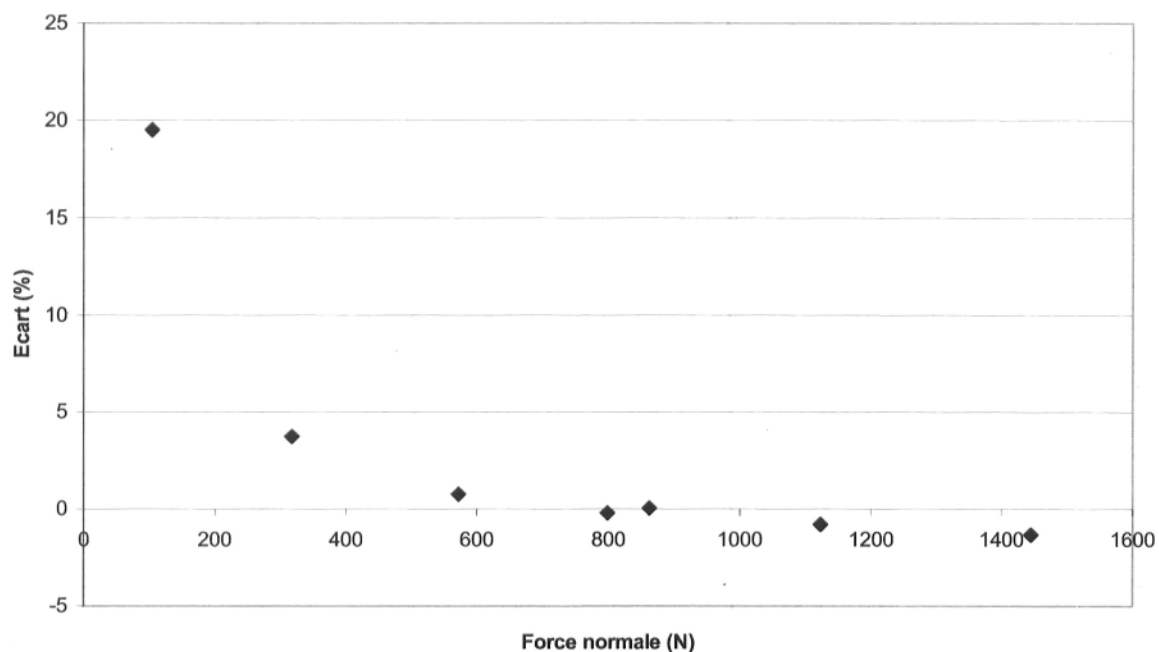


Figure 4.4.1 : Courbe d'étalonnage de la cellule de charge CC-1000

L'équation retenue pour l'étalonnage est :

$$Tension (V) = 0.001 x F (N) \quad (4.2)$$

Le calcul d'erreur s'obtient de la même façon que celle décrite précédemment. Ces erreurs sont montrées à la figure 4.4.2.



*Figure 4.4.2 : Écart entre les résultats de l'étalonnage de la cellule CC-1000 (série aléatoire) et l'équation d'étalonnage retenue.*

L'erreur maximale est obtenue à la charge 105 N et elle est de l'ordre de 19%.

Néanmoins, la cellule CC-1000 est utilisée pour les charges supérieures à 500 N et l'erreur maximale dans ce cas est de l'ordre de 1%.

## **4.4 Étalonnage du montage :**

### ***4.4.1 Procédure d'étalonnage des montages FA et AE :***

Avant de commencer les essais, les deux montages FA et AE doivent être étalonnés.

À l'aide des cellules de charges CC-100 et CC-1000, précédemment étalonnées, on réalise l'étalonnage de la réponse des jauges du pont de Wheatstone de la poutrelle A1 en fonction de la force normale. Le support C2 est alors remplacé par une cellule de charge.

Pour l'étalonnage des deux montages, une série ascendante, descendante et aléatoire sont réalisées.

#### 4.4.2 Étalonnage du montage FA :

L'étalonnage du montage FA est réalisé à l'aide de la cellule CC-100. Les trois séries de mesures sont montrées à la figure 4.5.1.

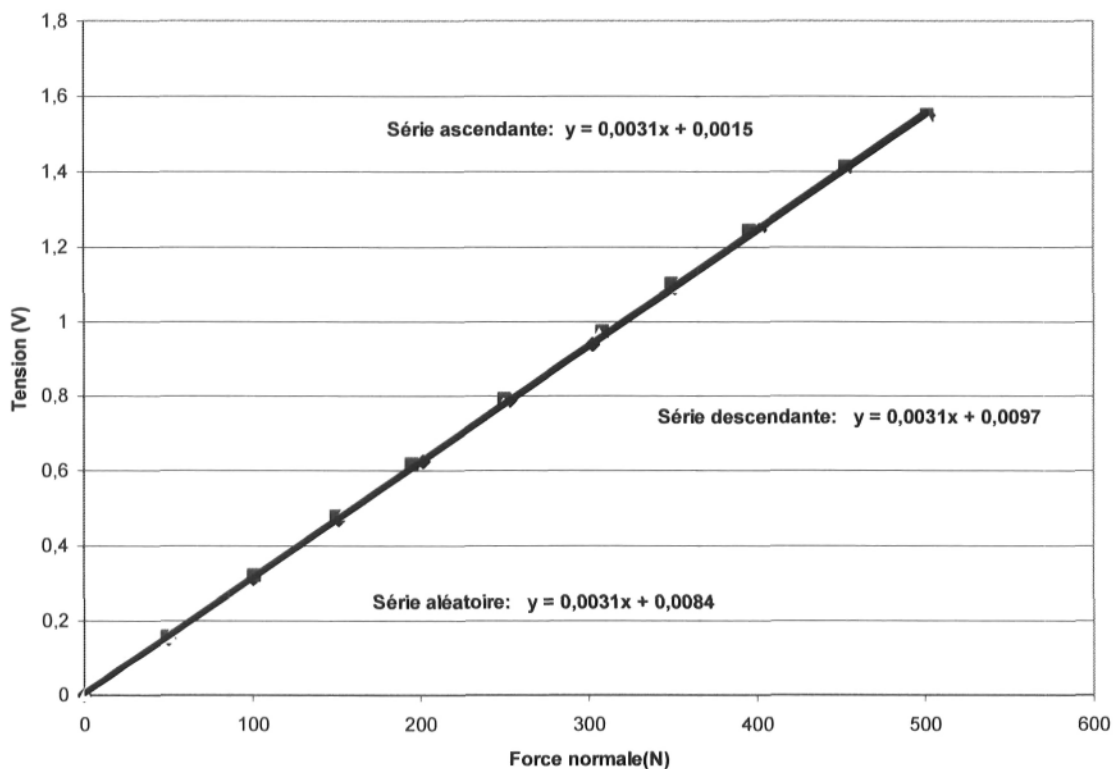


Figure 4.5.1 : Courbe d'étalonnage du Montage FA

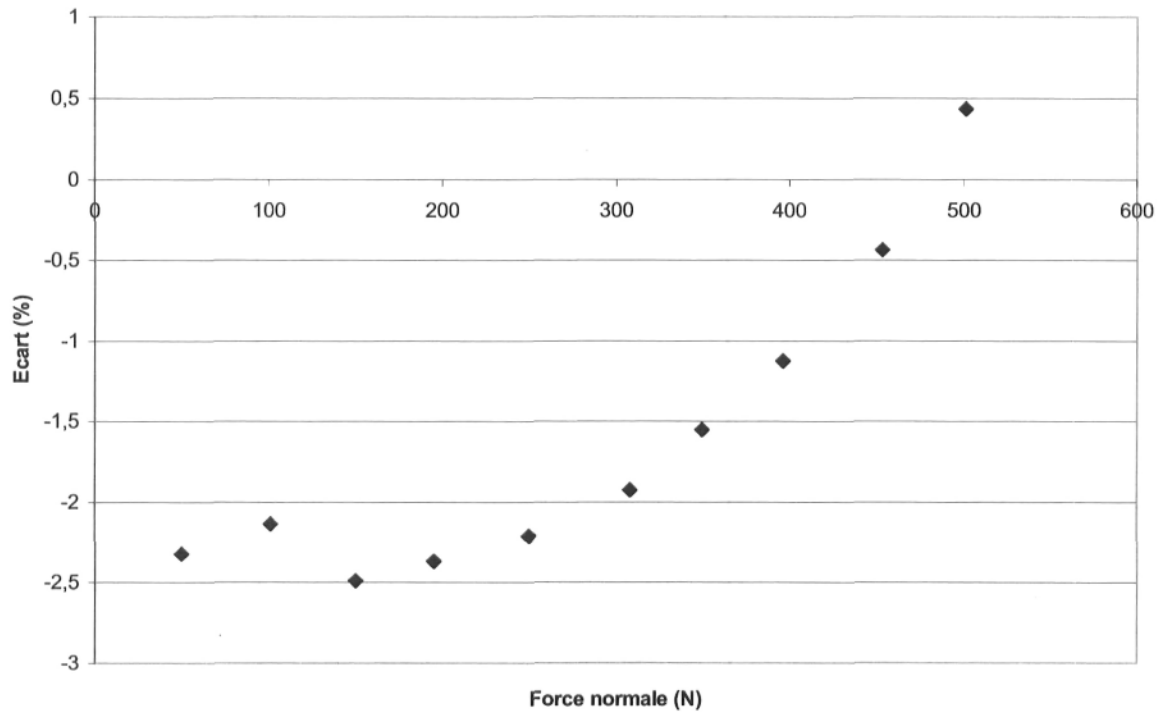
L'équation retenue pour l'étalonnage est celle de la série ascendante puisqu'elle correspond à la manipulation qui est effectuée lors de l'imposition d'une force pour générer une empreinte plastique sur un fil.

$$Tension (V) = 0.0031 \times F (N) \quad (4.3)$$

L'erreur maximale introduite en considérant l'équation retenue et la charge de 150 N est : -2.48%.

Les erreurs ont été calculées de la façon suivante :

C'est l'écart en pourcentage entre les résultats des mesures et la courbe d'étalonnage retenue. Ces erreurs sont présentées à la figure 4.5.2.



*Figure 4.5.2 : Écart entre les résultats de l'étalonnage du montage FA (série descendante) et l'équation d'étalonnage retenue.*

**Remarque :**

L'écart dans la figure 4.5.2 est souvent négatif. Ceci est dû au fait que l'ordonnée à l'origine des équations obtenues par régression linéaire a été éliminée dans l'équation 4.3.

### 4.4.3 Étalonnage du montage AE :

L'étalonnage du montage AE est réalisé à l'aide de la cellule CC-1000.

La figure 4.6.1 représente les résultats des trois séries de mesures pour l'étalonnage du montage AE.

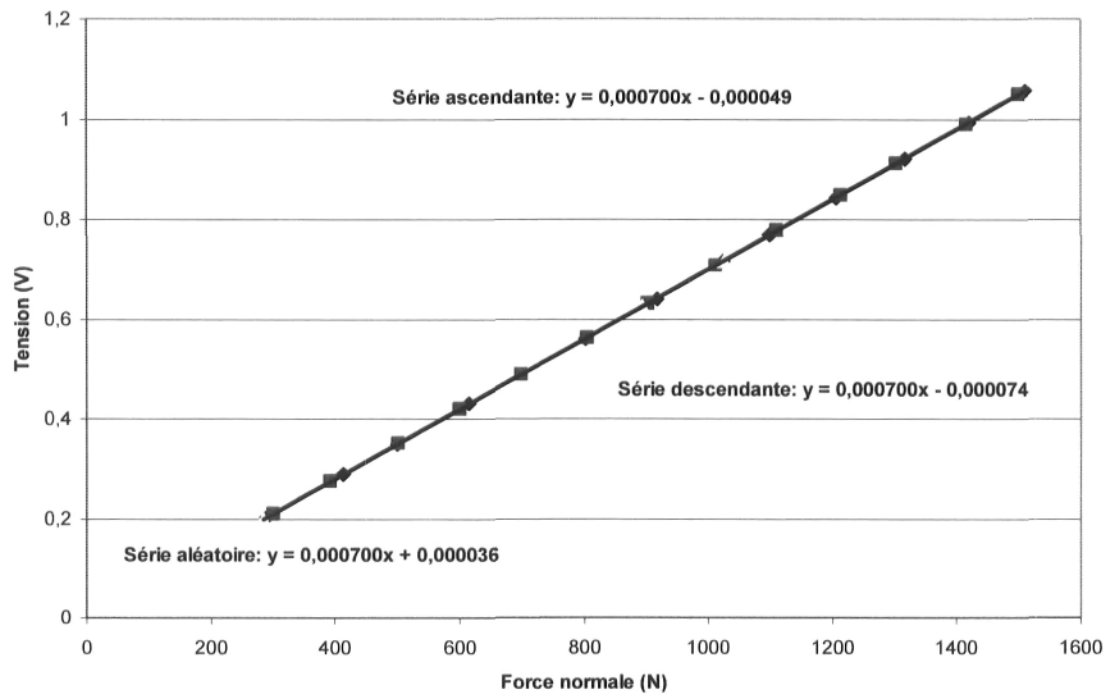
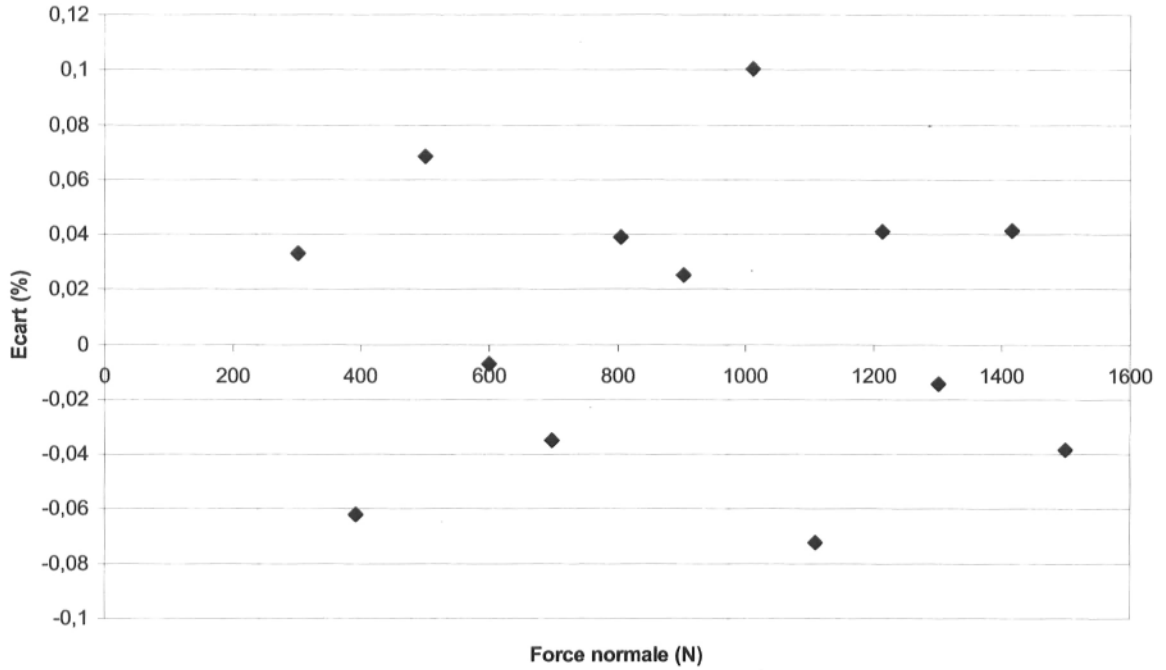


Figure 4.6.1 : Courbe d'étalonnage du montage AE

L'équation retenue pour l'étalonnage est celle de la série ascendante:

$$\text{Tension (V)} = 0,0007 \times F \text{ (N)} \quad (4.4)$$

Le calcul d'erreur s'obtient de la même façon que celle décrite précédemment. Ces erreurs sont montrées à la figure 4.6.2.

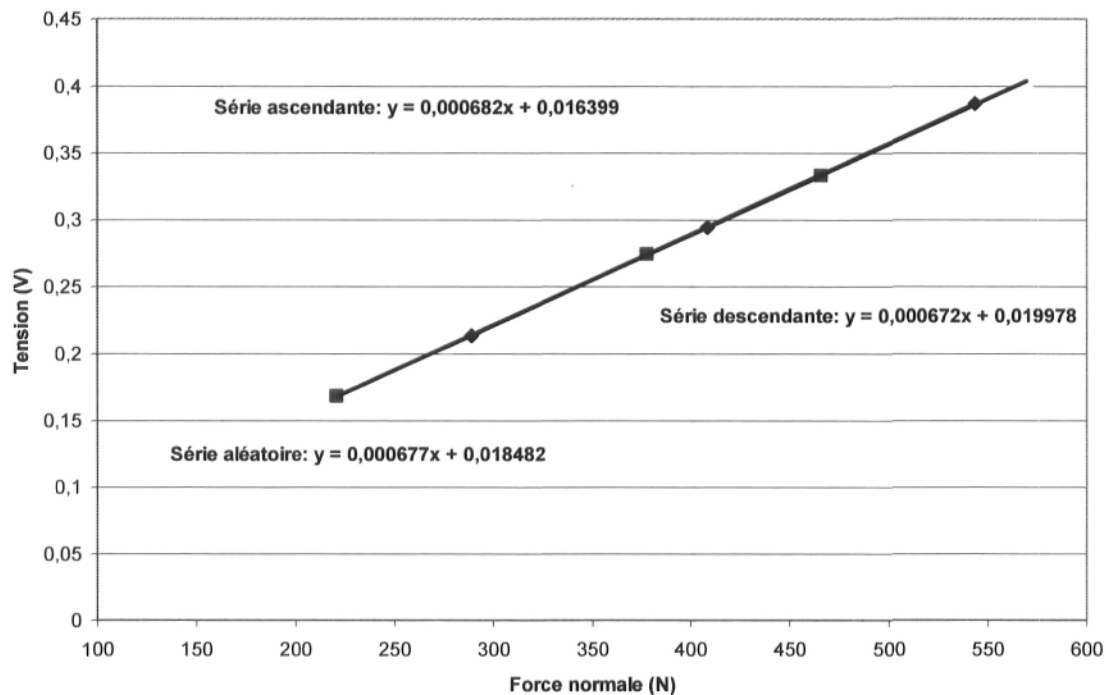


*Figure 4.6.2 : Écart entre les résultats de l'étalonnage du montage AE (série descendante) et l'équation d'étalonnage retenue.*

L'erreur maximale est obtenue à la charge 1011N et elle est de l'ordre de 0.1%.

#### 4.4.4 Vérification du Montage AE :

L'étalonnage du montage AE a été refait avec la cellule de charge CC-100 pour la portion 225 N – 575 N; la cellule CC-100 a une sensibilité plus grande pour ces niveaux de forces que la cellule CC-1000.



**Figure 4.7 : Courbe d'étalonnage du montage AE à l'aide de CC-100**

La figure 4.7 montre l'étalonnage obtenu; la pente est pratiquement identique à celle de l'étalonnage de la figure 4.6.1 ; on note une différence de l'ordre de 2.6% entre les séries ascendantes.



## 4.5 Matériau :

Le travail expérimental porte sur la mesure d'empreintes plastiques apparaissant sur des fils d'aluminium après que ceux-ci aient été mis en contact par une force normale. Ces fils d'aluminium ont un diamètre nominal de 4.27 mm. Le matériau constituant ces fils est un aluminium 1350-H19, dont la composition et les caractéristiques mécaniques nominales sont données aux tableaux 4.1, 4.2 et 4.3.

<b>Élément</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Fe</b>
<b>% Poids</b>	99,5	0,25	0,25

**Tableau 4.1 : Composition des fils d'aluminium**

$S_{ut}$	$S_y$
186 MPa	165 MPa

**Tableau 4.2 : Caractéristiques mécaniques de l'aluminium**

Deux essais de traction sur des fils prélevés d'un conducteur ACSR Bersfort (voir annexe 8) ont été réalisés et la valeur déduite de la contrainte ultime est de  $S_{ut} \approx 181$  MPa. Cette valeur de  $S_{ut}$  corrobore la valeur de  $S_{ut}$  du Tableau 4.2 dont les propriétés mécaniques ont été mesurées sur des éprouvettes usinées à partir des fils d'aluminium. Ces essais ont été réalisés précédemment par le laboratoire GREMCA.

<b>Aluminium</b>	$S_{ut}$	$S_y$	$E$	$\nu$	<b>Se</b> Limite d'endurance (essai de Moore)	Allongement à la rupture sur 250mm	<b>Référence</b>
EC-H19	186 MPa (27000 lb/po <sup>2</sup> )	165 MPa (24000 lb/ po <sup>2</sup> )	69 GPa	0.33	48 MPa (7000 lb/po <sup>2</sup> )	1.5 %	19
1350 H19	165 MPa (minimum)					1.9%	20

**Tableau 4.3 : Caractéristiques mécaniques des aluminiums EC-H19 et 1350 H19**

## Chapitre 5

### *Travail expérimental :*

#### 5.1 Programme d'essais :

Dans le cadre du travail expérimental, les deux montages FA (Faibles Amplitudes) et AE (Amplitudes Élevées), sont utilisés pour effectuer plusieurs séries de mesures.

Les essais selon un angle d'intersection égal à 90 degrés, sont réalisés de la façon suivante :

- Deux fils d'aluminium vierges sont mis en contact en maintenant une orientation de telle sorte que l'angle d'intersection soit de 90 degrés.
- Une force normale est graduellement appliquée jusqu'à une force de consigne. La force de consigne atteinte, la force normale est, par la suite, graduellement diminuée jusqu'à zéro.
- Une photo de l'empreinte de contact de chacun des fils est prise à l'aide d'un microscope à balayage électronique (MEB).
- Le logiciel de traitement d'image CLEMEX est utilisé pour mesurer les empreintes visibles des aires de contact provoquées par la déformation plastique de l'aluminium.

La plage de force normale appliquée à l'aide du montage FA est de 0 à 500 N tandis que le montage AE permet des forces normales de 400 à 1200 N.

Des essais similaires sont aussi réalisés selon un angle d'intersection des fils égal à 30 degrés.

L'analyse ultérieure des résultats a montré qu'une erreur s'est produite lors des essais à 30 degrés. Ainsi, lors des essais à l'aide du montage FA, les fils avaient plutôt un angle d'intersection de 60 degrés et ces essais ont été identifiés de cette façon dans ce qui suit..

## 5.2 Résultats :

### 5.2.1 Essais pour un angle d'intersection de 90 degrés :

#### 5.2.1.1 Montage FA:

##### Résultats :

Le tableau qui suit résume les résultats obtenus pour les essais selon un angle d'intersection de 90 degrés et pour des forces normales de 0 à 500N.

Les photos des empreintes dans les fils d'aluminium ont été identifiées selon le numéro d'essai et le fait que le fil a été fixé sur le coté mobile M (support C2) ou fixe F (support C1) du montage.

Les photos d'une paire de fils en contact sont identifiées par 1M et 1F, 2M et 2F... De plus, la comparaison des aires de contact des fils fixes et mobiles montre une différence maximale de 8% (8F et 8M).

**Tableau 5.1 : Essais à 90 degrés à l'aide du montage FA**

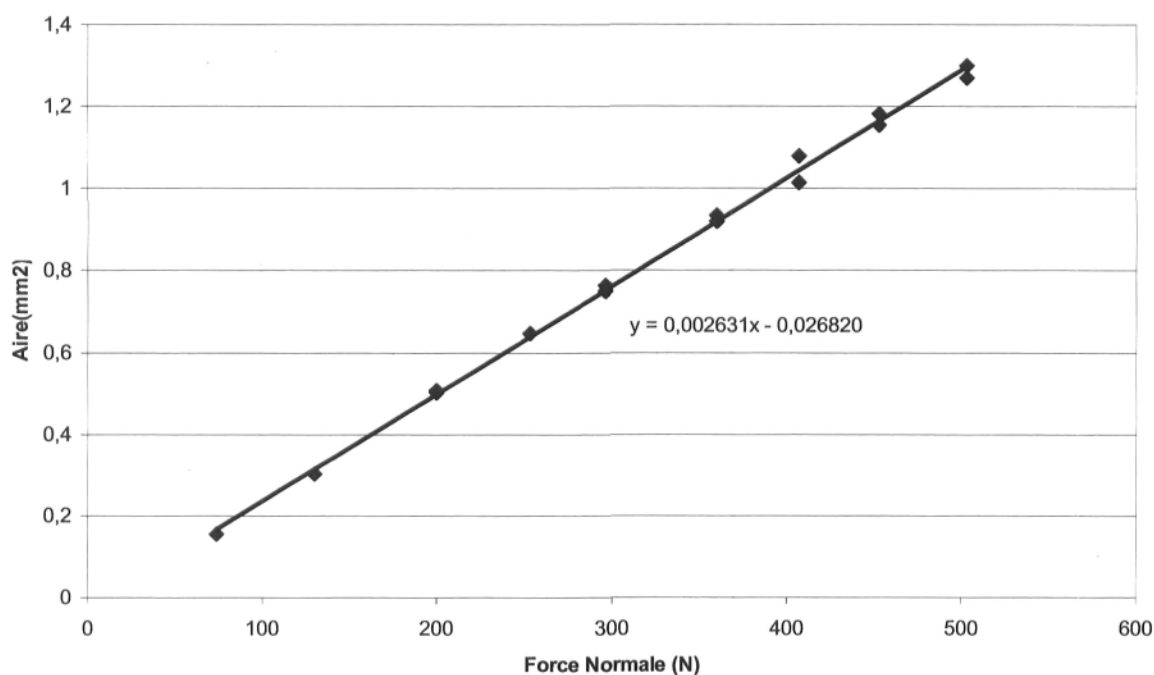
<i>Photo N :</i>	<i>Force normale (N)</i>	<i>Aire (mm<sup>2</sup>)</i>
1M	74,1	0,1559
3M	129,9	0,3023 (*0.3119)
4F	199,7	0,5016
4M	199,7	0,5072
5M	253,2	0,6476
6F	296,3	0,7635
6M	296,3	0,7506
7F	359,8	0,9205
7M	359,8	0,9330
8F	407,5	1,0150
8M	407,5	1,0790 (*1.098)
9F	452,8	1,1540
9M	452,8	1,1810
10F	503,3	1,2690 (*1.442)
10M	503,3	1,2990 (*1.46)

Les photos dont les résultats ne se trouvent pas sur le tableau 5.1 (ex : 1F, 2M, 2F.....) sont des photos dont la qualité ne permettait pas de mesurer l'aire de contact résiduelle.

Quand il existait deux contours possibles de la surface plastique sur la photo (cela est identifié par \* dans le tableau 5.1), la valeur choisie est celle qui correspond au contour le plus proche d'un cercle pour les essais avec un angle d'intersection de 90 degrés.

Les deux figures qui suivent permettent de mieux analyser les données du Tableau.5.1.

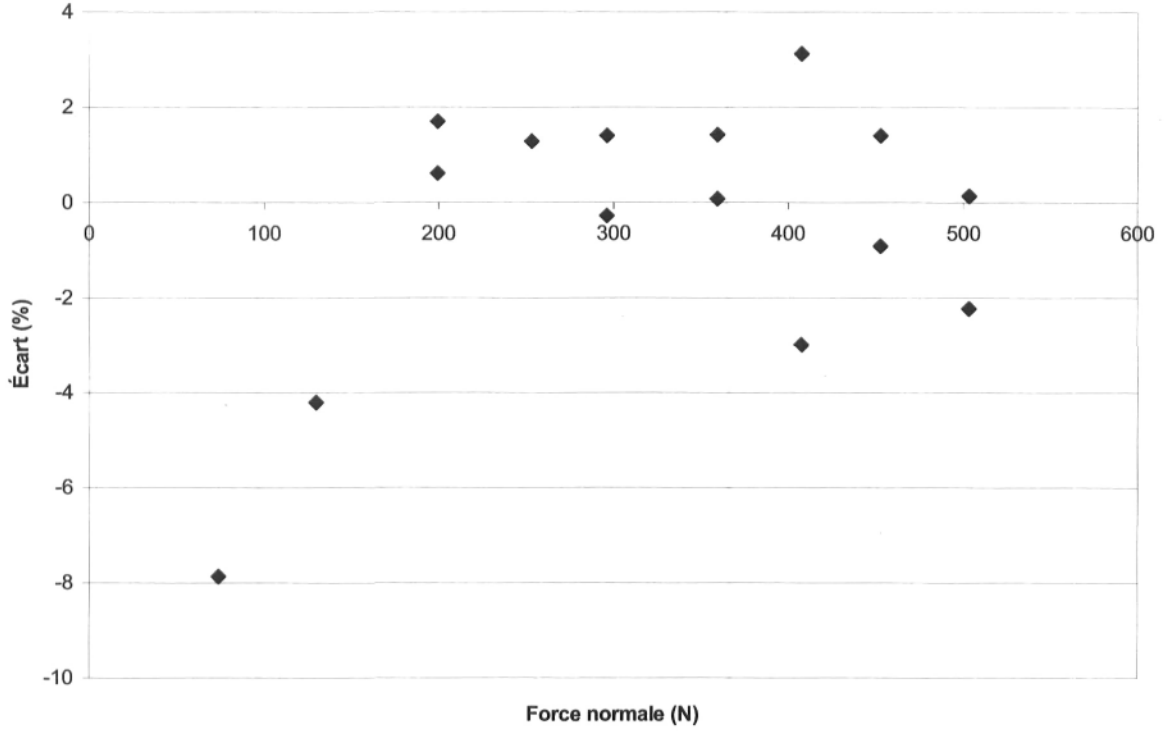
La première figure représente la courbe reliant la force normale imposée au fil d'aluminium et l'aire de l'empreinte du contact. La seconde figure donne la courbe de l'erreur par rapport à une droite obtenue par régression linéaire.



*Figure 5.1 : Essais à 90 degrés avec un montage FA*

**Remarque :**

L'ordonnée à l'origine n'est pas nulle (négative) du fait qu'il faut dépasser un minimum de force normale pour avoir une trace plastique.



**Figure 5.2 : Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.1)**

### 5.2.1.1 Montage AE:

#### Résultats :

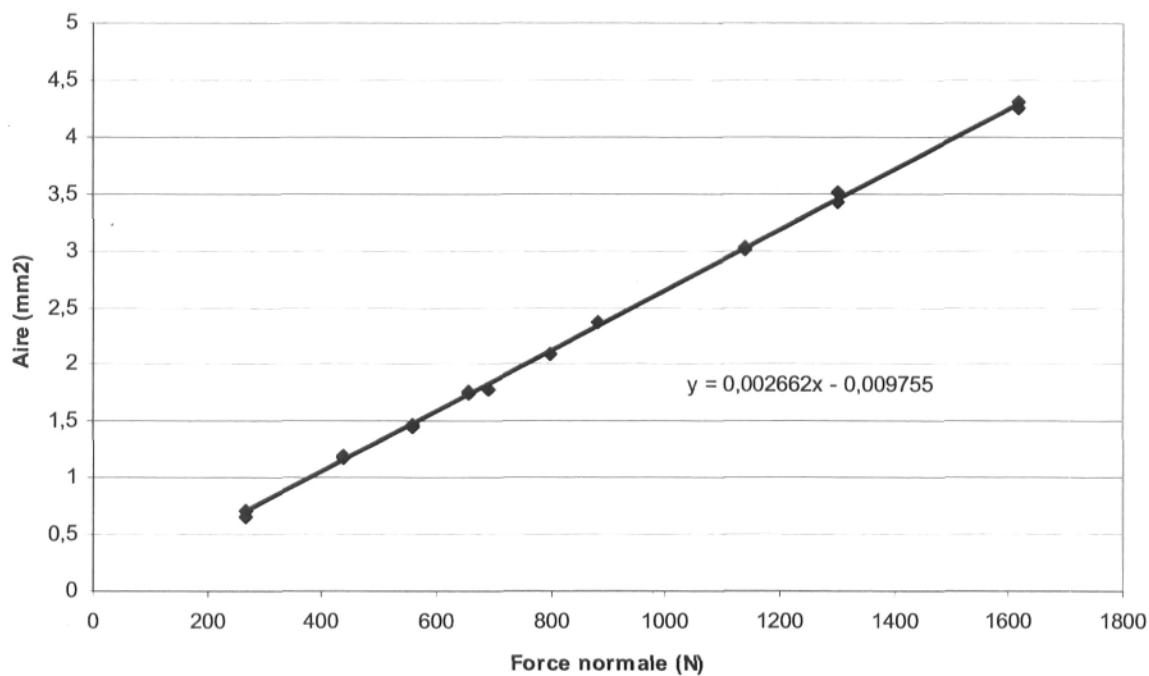
Le tableau qui suit présente les résultats obtenus pour les essais pour des forces normales de 250 à 1650N et selon un angle d'intersection de 90 degrés. La nomenclature utilisée à la section 5.2.1.1 est conservée pour identifier chaque essai.

**Tableau5.2 : Essais à 90 degrés à l'aide du montage AE**

<i>Photo N :</i>	<i>Force normale (N)</i>	<i>Aire (mm<sup>2</sup>)</i>
11F	<b>267,4</b>	0,6594
11M	<b>267,4</b>	0,7119 (*0.7568)
12F	<b>438,0</b>	1,1940
12M	<b>438,0</b>	1,1740
13F	<b>559,8</b>	1,4520 (*1.641)
13M	<b>559,8</b>	1,4720 (*1.655)
14F	<b>656,4</b>	1,7600
14M	<b>656,4</b>	1,7510
15M	<b>689,8</b>	1,7850 (*1.829)
16F	<b>798,5</b>	2,0980 (*2.088)
17M	<b>882,3</b>	2,3780 (*2.380)
18F	<b>1138,0</b>	3,0220
18M	<b>1138,0</b>	3,0170
19F	<b>1300,5</b>	3,5190
19M	<b>1300,5</b>	3,4200
20F	<b>1616,6</b>	4,2550 (*4.213)
20M	<b>1616,6</b>	4,3020 (*4.388)

Comme pour les photos précédentes, la valeur du contour de la trace plastique, le plus proche d'un cercle, est choisie.

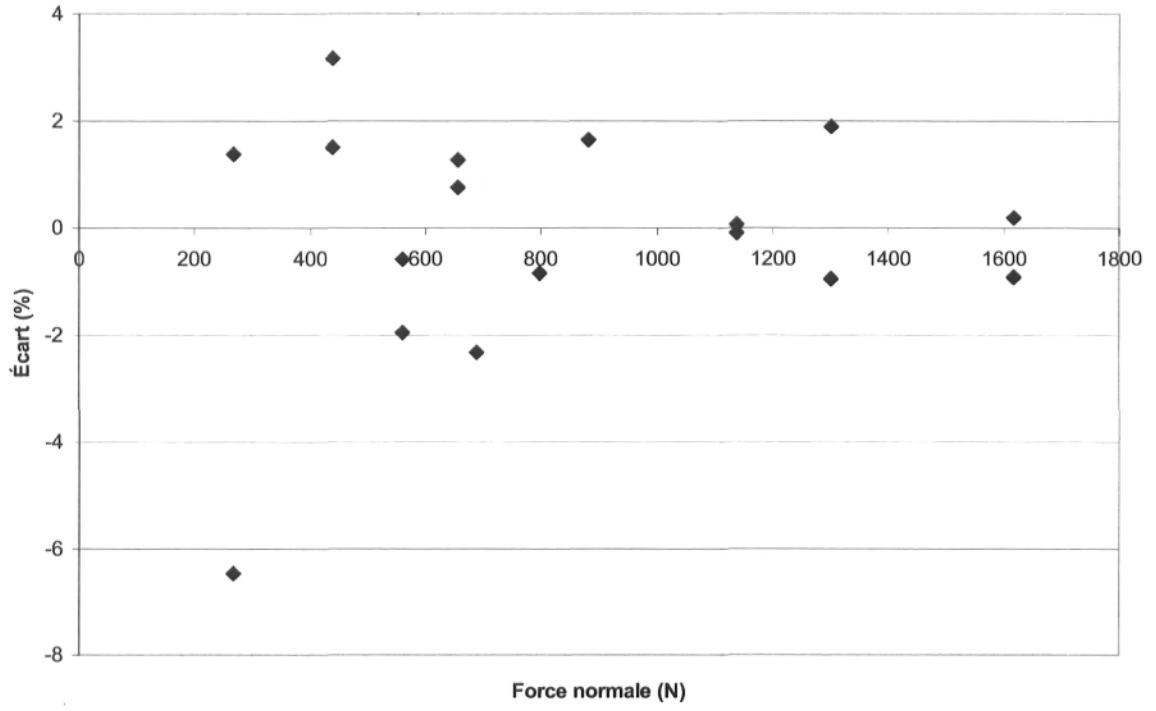
Les deux figures qui suivent permettent de mieux analyser les données du Tableau.5.2.



*Figure 5.3 : Essais à 90 degrés avec un montage AE*

**Remarque :**

Comme pour la figure 5.1, l'ordonnée à l'origine n'est pas nulle (négative).  
Il faut dépasser un minimum de force normale pour avoir une trace plastique.

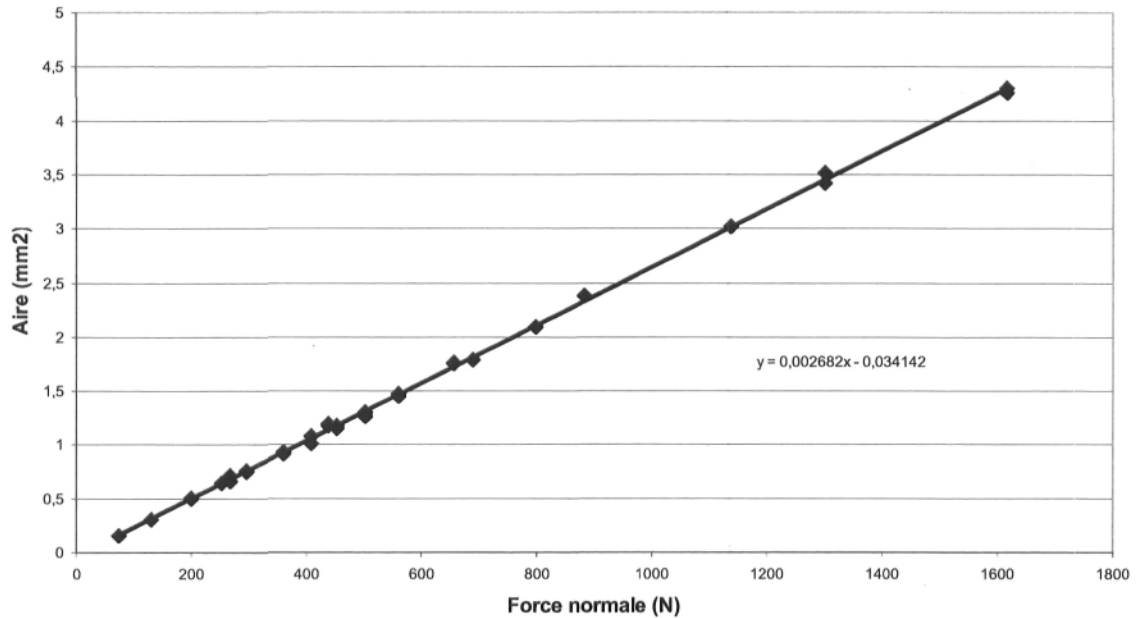


*Figure 5.4 : Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.3)*



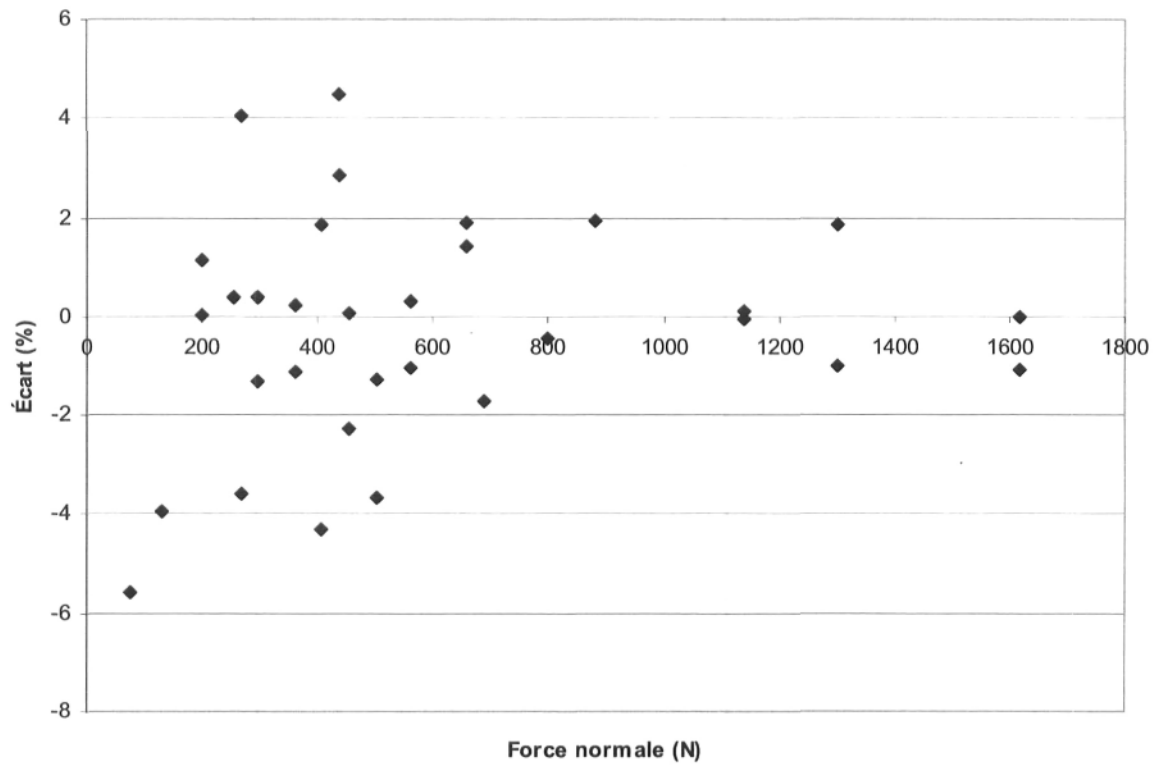
### 5.2.1.3 Montages FA et AE :

Les figures qui suivent sont obtenues en regroupant les résultats des essais, à 90 degrés, effectués à l'aide des montages FA et AE.



*Figure 5.5 : Essais à 90 degrés avec les montages AE et FA*

Les résultats pour l'intervalle de la force normale commun aux deux montages est [250N, 500N]. Cet intervalle commun permet de vérifier qu'il n'existe pas d'erreur de biais significative dans l'étalonnage des deux montages.



**Figure 5.6 : Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.5)**

## 5.2.2 Essais pour un angle d'intersection de 30 et de 60 degrés :

### 5.2.2.1 Montage FA :

#### Résultats :

Le tableau qui suit résume les résultats obtenus pour les essais selon un angle d'intersection de 60 degrés et pour des forces normales de 90 à 250N.

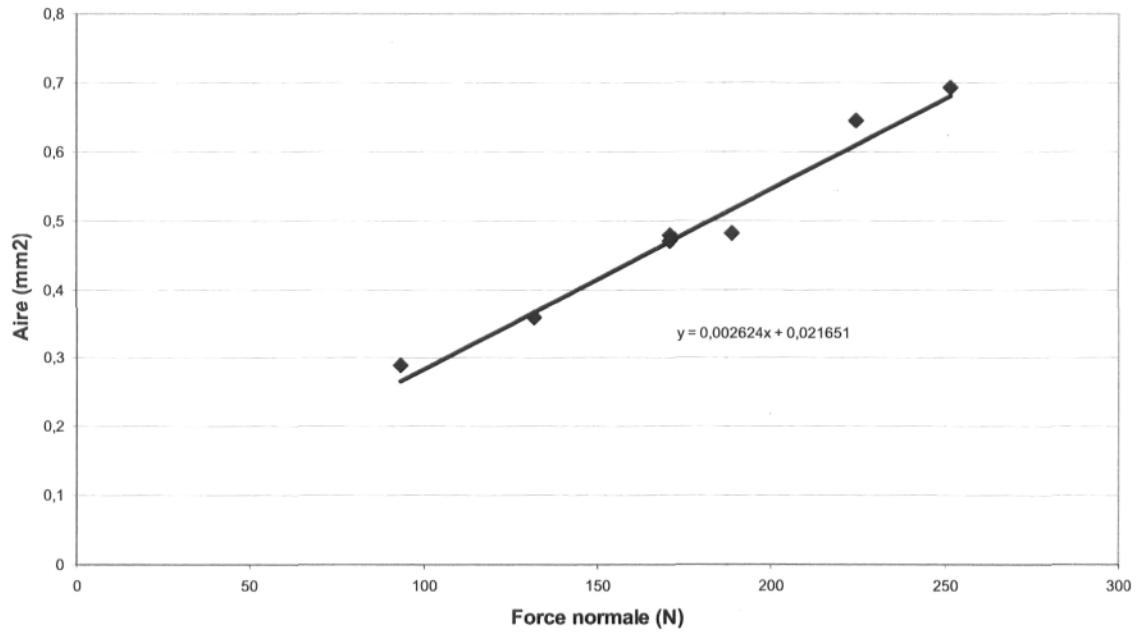
Cette fois-ci, les photos des empreintes sur les fils d'aluminium ont été identifiés par un nombre impair quand le fil est positionné sur le support mobile (support C2) et par un nombre pair quand celui-ci est sur le support fixe du montage (support C1).

**Tableau 5.3 : Essais à 60 degrés à l'aide du montage FA**

<i>Photo N :</i>	<i>Force normale (N)</i>	<i>Aire (mm<sup>2</sup>)</i>
b3	<b>93,3</b>	0,2892
b5	<b>131,6</b>	0,3602
b7	<b>170,9</b>	0,4706
b8	<b>170,9</b>	0,4786
b9	<b>188,8</b>	0,4811
b10	<b>188,8</b>	0,4818
b11	<b>224,4</b>	0,6451
b14	<b>251,4</b>	0,6927

Les données du tableau 5.3 seront mieux analysées grâce aux deux figures qui suivent.

La figure 5.7 représente la courbe reliant la force normale imposée au fil d'aluminium et l'aire de l'empreinte du contact. La figure 5.8 donne la courbe de l'erreur par rapport à une droite obtenue par régression linéaire.

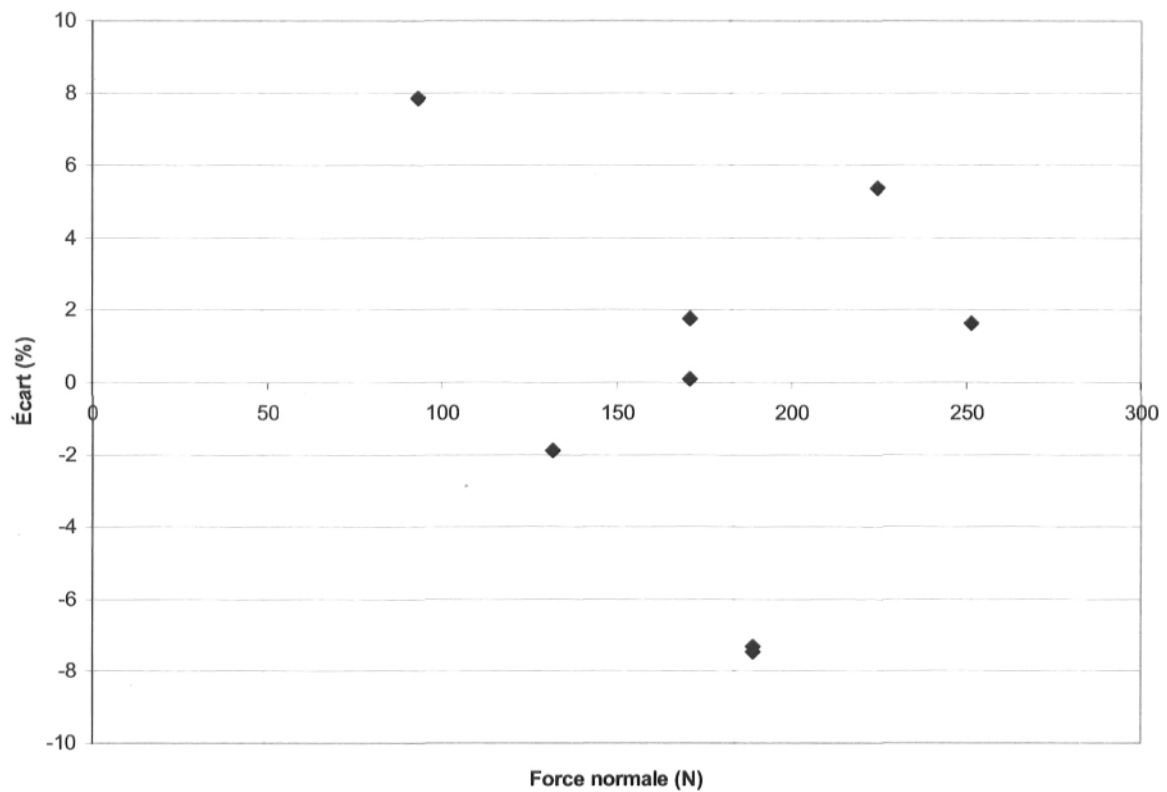


*Figure 5.7 : Essais à 60 degrés avec le montage FA*

**Remarque :**

L'ordonnée à l'origine n'est pas nulle, mais elle est positive.

On doit cependant noter que la courbe de régression linéaire est calculée à l'aide de seulement 8 points comparativement à 15 points et plus pour les autres courbes.



*Figure 5.8 : Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.7)*

### 5.2.2.2 Montage AE :

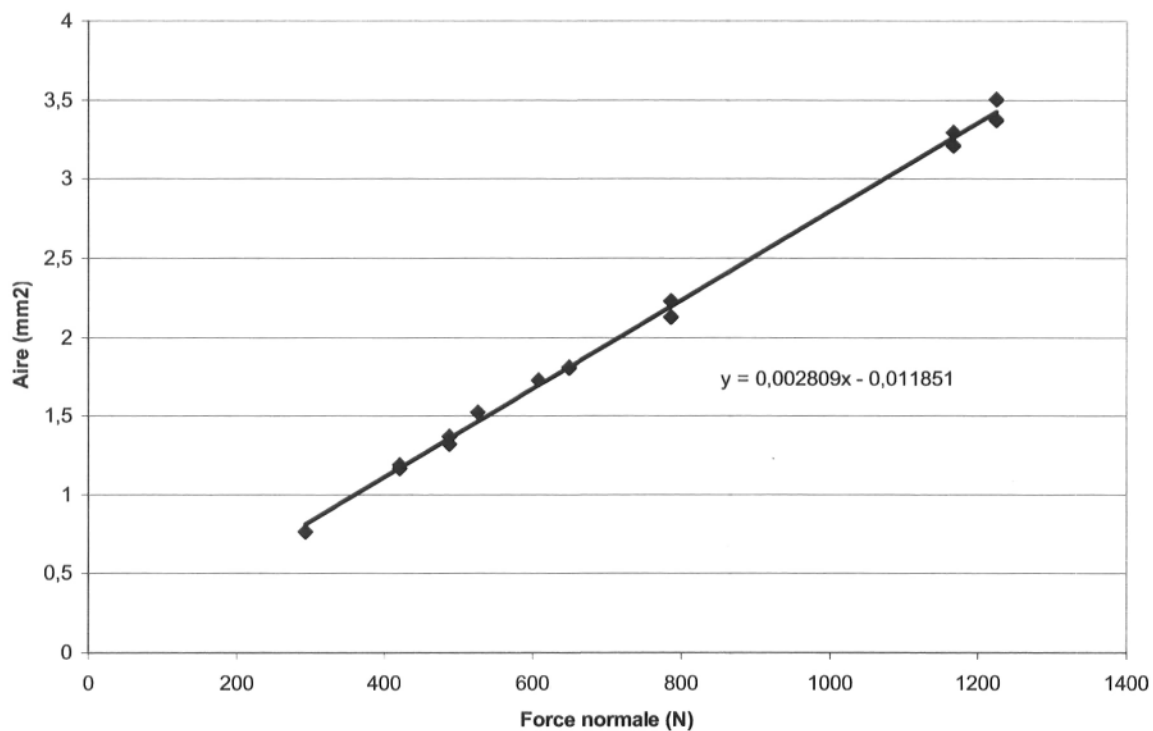
#### **Résultats :**

Le tableau qui suit résume les résultats obtenus pour les essais selon un angle d'intersection de 30 degrés et pour des forces normales de 290 à 1250N.

**Tableau 5.4 : Essais à 30 degrés à l'aide du montage AE**

<i>Photo N:</i>	<i>Force normale (N)</i>	<i>Aire (mm<sup>2</sup>)</i>
b21	<b>292,8</b>	0,7635
b23	<b>419,7</b>	1,1640
b24	<b>419,7</b>	1,1890
b25	<b>486,9</b>	1,3200
b26	<b>486,9</b>	1,3690
b27	<b>525,4</b>	1,5270
b29	<b>607,5</b>	1,7290
b31	<b>648,8</b>	1,8060
b32	<b>648,8</b>	1,8110
b33	<b>786,4</b>	2,1300
b34	<b>786,4</b>	2,2300
b39	<b>1166,1</b>	3,2090
b40	<b>1166,1</b>	3,2930
b41	<b>1223,9</b>	3,3710
b42	<b>1223,9</b>	3,5010

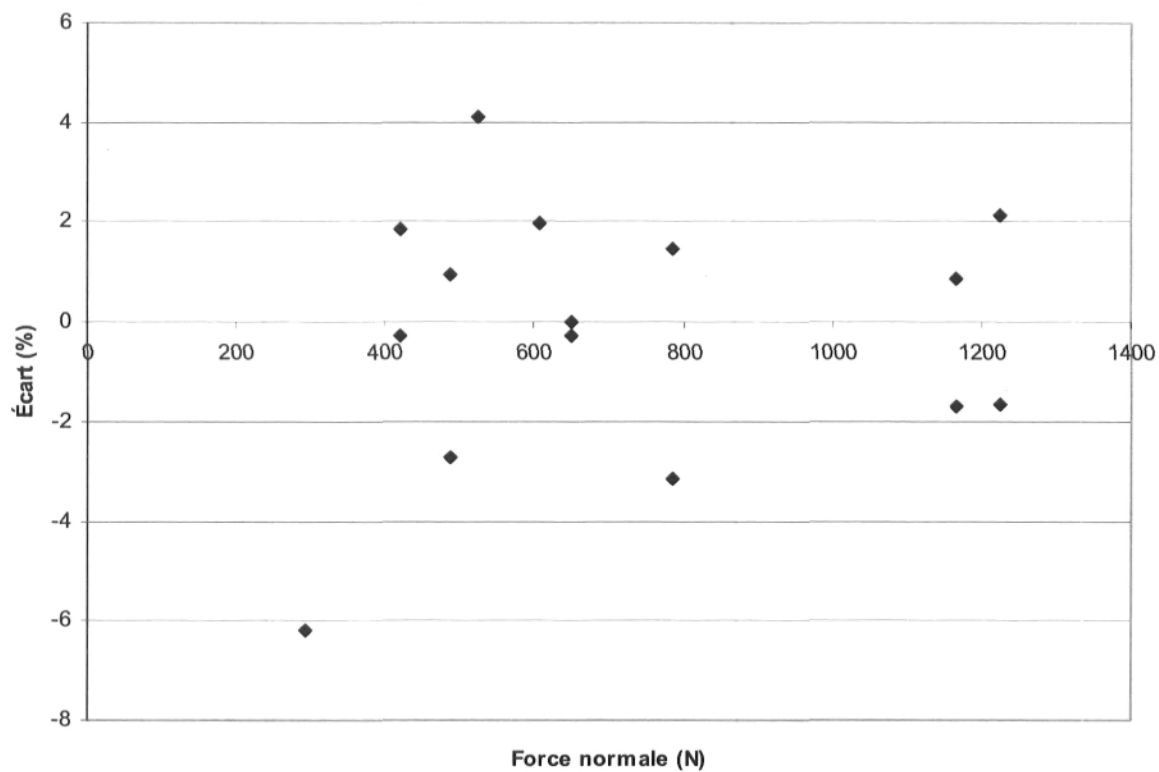
La nomenclature utilisée à la section 5.2.2.1 est conservée pour identifier chaque essai. Les deux figures qui suivent permettent de mieux analyser les données du tableau.5.4.



*Figure 5.9 : Essais à 30 degrés avec le montage AE*

**Remarque :**

L'ordonnée à l'origine n'est pas nulle. Elle est négative. L'explication donnée à la page 37 s'applique à ces résultats expérimentaux.



*Figure 5.10 : Erreur par rapport à la droite obtenue par régression linéaire (courbe de tendance de la figure 5.9)*



### 5.2.3 Rapport $b/a$ :

Les tableaux 5.5, 5.6, 5.7 et 5.8, donnent le rapport des dimensions transversales des empreintes de contact.

Dans le cas de deux fils de même diamètre et avec un angle d'intersection de 90 degrés, le rapport des dimensions transversales devrait être 1.

Les dimensions transversales de chaque empreinte ont été mesurées à 90 degrés l'une de l'autre et selon l'orientation où le rapport donnait la valeur la plus éloignée de 1.

Pour le cas d'une empreinte de contact parfaitement elliptique, le rapport des dimensions transversales correspond au rapport des demi-axes  $b/a$ .

**Tableau 5.5 : Rapport  $b/a$  pour les essais à 30 degrés  
(montage AE)**

<i>Photo N:</i>	<i>Force normale (N)</i>	<i><math>b/a</math></i>
b21	<b>292,8</b>	0,152
b23	<b>419,7</b>	0,172
b24	<b>419,7</b>	0,194
b25	<b>486,9</b>	0,194
b26	<b>486,9</b>	0,165
b27	<b>525,4</b>	0,390
b29	<b>607,5</b>	0,189
b31	<b>648,8</b>	0,159
b32	<b>648,8</b>	0,186
b33	<b>786,4</b>	0,202
b34	<b>786,4</b>	0,168
b39	<b>1166,1</b>	0,196
b40	<b>1166,1</b>	0,158
b41	<b>1223,9</b>	0,157
b42	<b>1223,9</b>	0,193

**Tableau 5.6 : Rapport  $b/a$  pour les essais à 60 degrés  
(montage FA)**

<i>Photo N:</i>	<i>Force normale (N)</i>	<i>b/a</i>
b3	<b>93,3</b>	0,543
b5	<b>131,6</b>	0,468
b7	<b>170,9</b>	0,371
b8	<b>170,9</b>	0,383
b9	<b>188,8</b>	0,338
b10	<b>188,8</b>	0,380
b11	<b>224,4</b>	0,358
b14	<b>251,4</b>	0,507

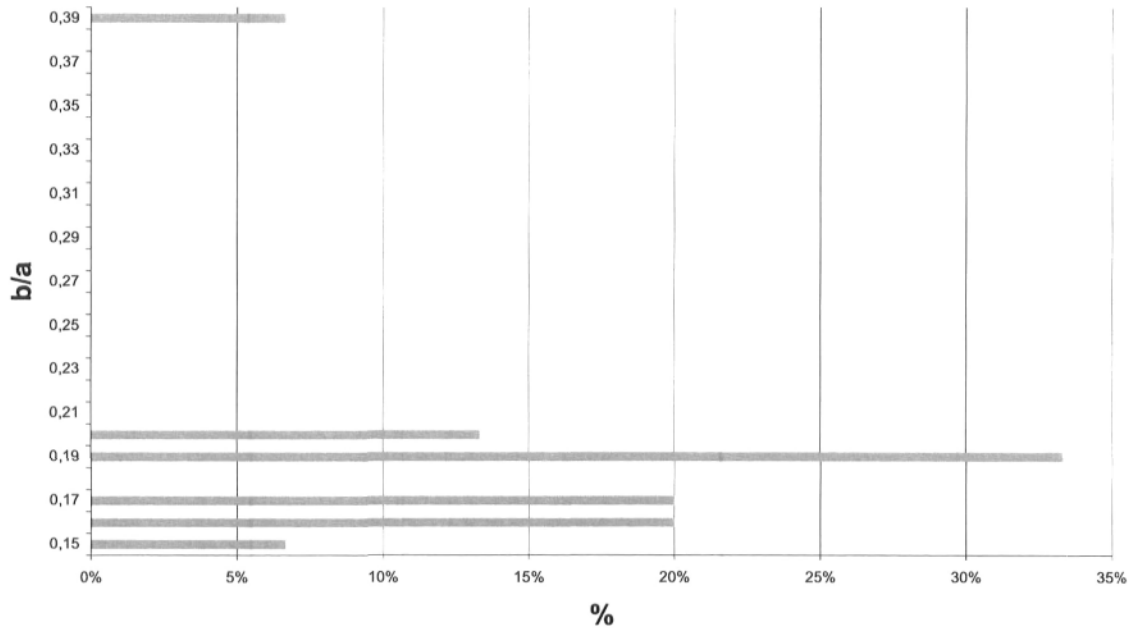
**Tableau 5.7 : Rapport  $b/a$  pour les essais à 90 degrés  
(montage FA)**

<i>Photo N:</i>	<i>Force normale (N)</i>	<i>b / a</i>
1M	<b>74,1</b>	0,885
3M	<b>129,9</b>	0,913
4F	<b>199,7</b>	0,947
4M	<b>199,7</b>	0,979
5M	<b>253,2</b>	0,991
6F	<b>296,3</b>	0,908
6M	<b>296,3</b>	0,924
7F	<b>359,8</b>	0,902
7M	<b>359,8</b>	0,977
8F	<b>407,5</b>	0,956
8M	<b>407,5</b>	0,949
9F	<b>452,8</b>	0,986
9M	<b>452,8</b>	0,899
10F	<b>503,3</b>	0,986
10M	<b>503,3</b>	0,987

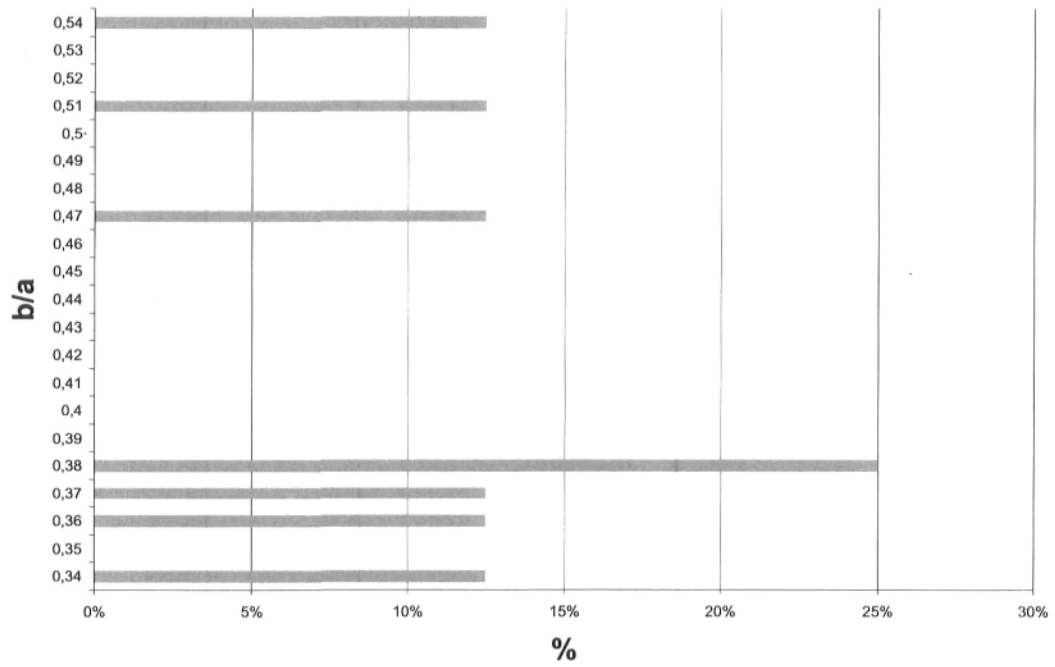
**Tableau 5.8 : Rapport  $b/a$  pour les essais à 90 degrés  
(montage AE)**

<i>Photo N:</i>	<i>Force normale (N)</i>	<i>b / a</i>
11F	<b>267,4</b>	0,796
11M	<b>267,4</b>	0,991
12F	<b>438,0</b>	0,957
12M	<b>438,0</b>	0,908
13F	<b>559,8</b>	0,975
13M	<b>559,8</b>	0,975
14F	<b>656,4</b>	0,941
14M	<b>656,4</b>	0,964
15M	<b>689,8</b>	0,954
16F	<b>798,5</b>	0,944
17M	<b>882,3</b>	0,941
18F	<b>1138,0</b>	0,922
18M	<b>1138,0</b>	0,939
19F	<b>1300,5</b>	0,916
19M	<b>1300,5</b>	0,941
20F	<b>1616,6</b>	0,912
20M	<b>1616,6</b>	0,976

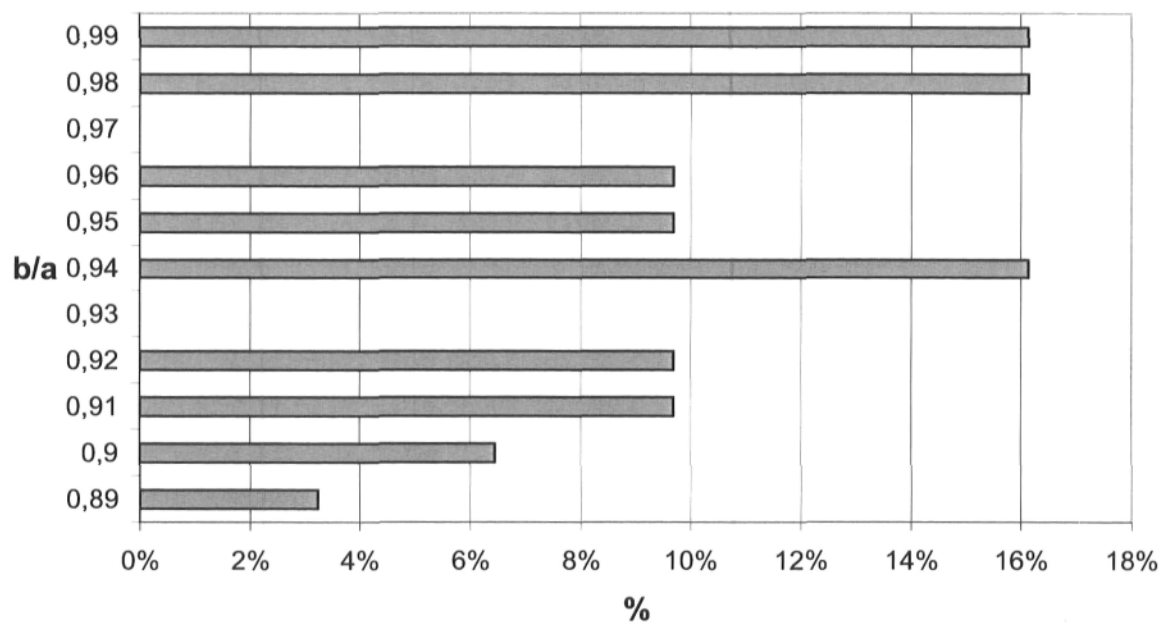
Les graphiques suivants montrent la distribution en pourcentage des rapports  $b/a$  à partir des tableaux ci-dessus.



*Figure 5.11.A : Distribution de b/a à partir des résultats du tableau 5.5*



*Figure 5.11.B : Distribution de b/a à partir des résultats du tableau 5.6*



*Figure 5.12 : Distribution de  $b/a$  à partir des résultats des tableaux 5.7 et 5.8*

## Chapitre 6

### *Analyse des résultats.*

#### 6.1 Relation entre l'aire de contact et la charge appliquée :

##### 6.1.1 Essais à 90 degrés :

Une droite est obtenue à partir des résultats des essais à 90 degrés, cette droite identifie la relation entre l'aire de l'empreinte plastique sur le fil d'aluminium et la force normale appliquée sur le fil. Cette droite est montrée sur la figure 5.5.

La relation entre l'aire de l'empreinte et la force normale est:

$$\text{Aire (mm}^2\text{)} = 0,0027 \times \text{Force (N)} - 0,0342 \quad (6.1)$$

Pour avoir une empreinte plastique visible et mesurable, une force minimale de 74N fut nécessaire (photo 1M).

Ceci peut être expliqué par le fait que ce qui est mesuré n'est pas la déformation totale de la surface du fil, due à la force appliquée, mais l'empreinte laissée, une fois le déchargement complété.

L'écart des mesures, par rapport à l'équation 6.1, est tracé sur la figure 5.6.

On constate que l'écart diminue au fur à mesure que l'aire mesurée de la trace plastique augmente et que le contour de la trace devient de plus en plus bien délimité.

Par symétrie, des cylindres parfaits identiques dont les axes sont à 90°, devraient donner une empreinte circulaire.

Ainsi, le rapport b/a des deux demi-axes de la trace plastique est mesuré et comparé, dans la suite de ce mémoire, par rapport aux forces appliquées.

### 6.1.2 Essais à 60 degrés :

L'aire de l'empreinte plastique est obtenue (à partir de la figure 5.7) en fonction de la force normale :

$$\text{Aire (mm}^2\text{)} = 0,0026 \times \text{Force (N)} + 0.0217 \quad (6.2)$$

Cette fois, pour avoir une empreinte plastique visible et mesurable, une force minimale appliquée au montage de 93N fut nécessaire (photo b3).

L'écart des mesures par rapport à l'équation (6.2) est tracé sur la figure 5.8.

### 6.1.3 Essais à 30 degrés :

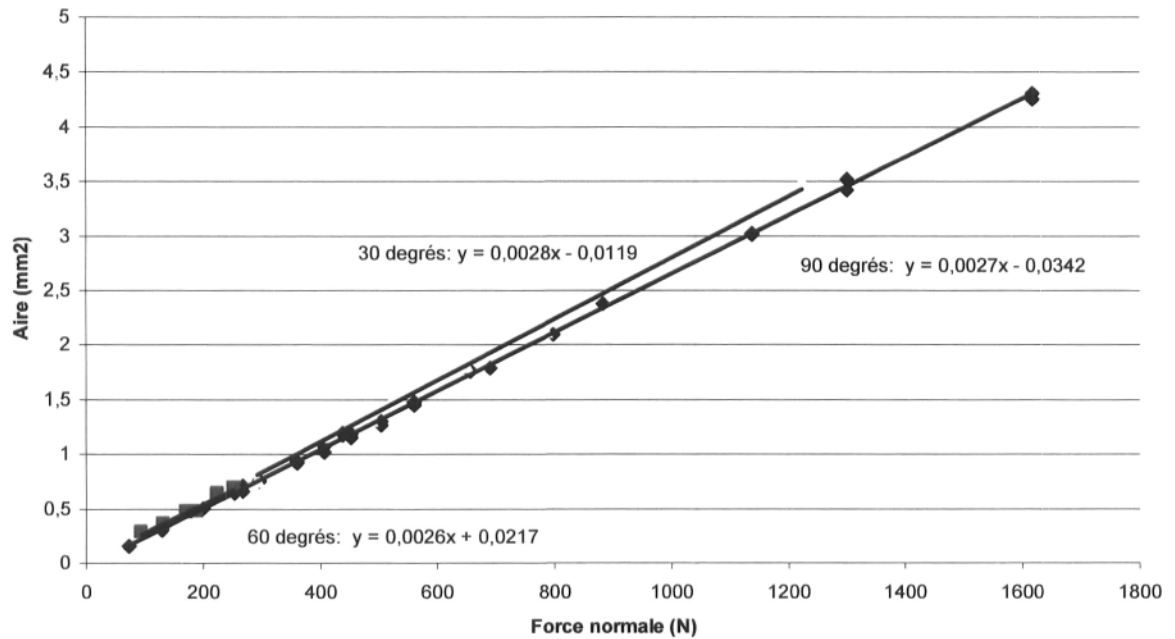
Pour les essais à 30 degrés avec le montage AE (figure 5.9), la fonction qui donne l'aire de l'empreinte plastique en fonction de la force normale est la suivante :

$$\text{Aire (mm}^2\text{)} = 0,0028 \times \text{Force (N)} - 0.0119 \quad (6.3)$$

L'écart des mesures par rapport à l'équation (6.3) est tracé sur la figure 5.10. L'écart diminue au fur à mesure que la force appliquée augmente

### 6.1.4 Comparaison des essais à 90, 60 et 30 degrés :

Afin de faciliter leur comparaison, les résultats obtenus des essais pour le contact à un angle d'intersection de 90 degrés et ceux obtenus des essais pour le contact à 30 et 60 degrés sont ont été reportés sur une même figure (figure 6.1).



*Figure 6.1 : Essais pour les angles d'intersection de 90, 60 et 30 degrés*

La figure 6.1 montre que la pente des trois droites est pratiquement la même et que la différence d'angle d'intersection des deux fils ne semble pas avoir un effet très significatif.



## 6.2 Rapport b/a

### 6.2.1 Essais à 90 degrés:

#### 6.2.1.1 Analyse des résultats :

D'après le tableau 5.7 et la figure 5.12, le rapport des dimensions transversales de l'empreinte plastique sur le fil est compris entre 0.79 et 0.99 avec la moitié (16/32) ayant un rapport supérieur à 0.95. Dix cas ont un rapport supérieur à 0.975

Par ailleurs, si la force appliquée sur les deux fils augmente, le rapport semble se rapprocher de 1 sans toutefois que la valeur limite soit égale exactement à 1.

La figure 6.2.1 montre l'écart du rapport avec 1 en fonction de la force normale.

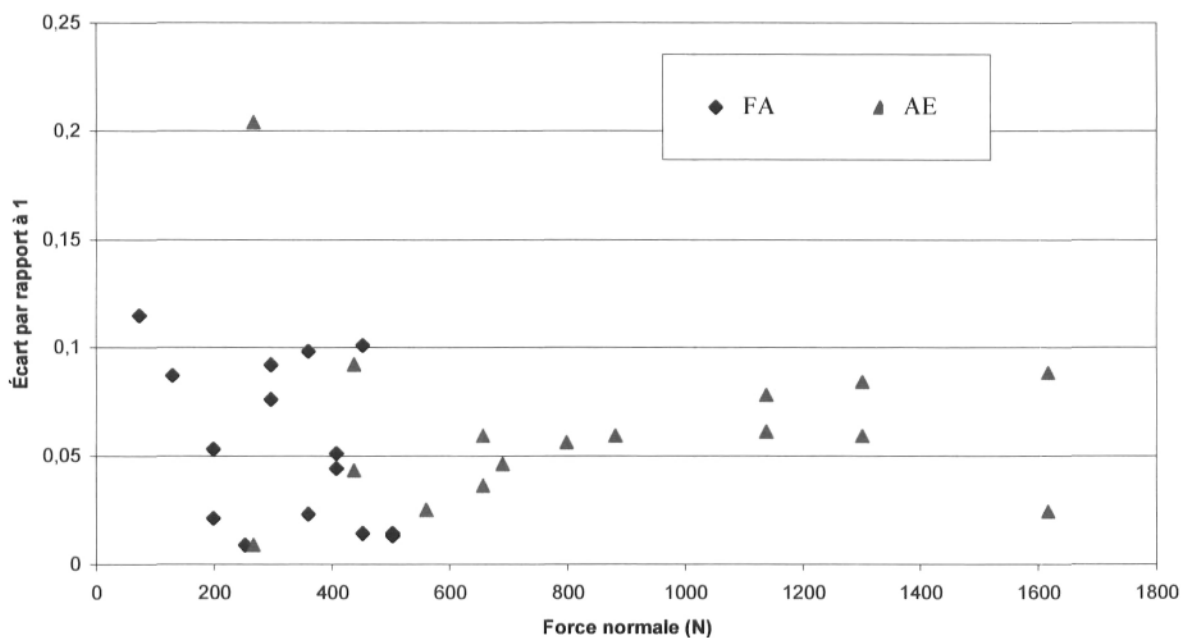


Figure 6.2.1 : Écart par rapport à 1 d'après les résultats du tableau 5.5

Le rapport théorique de 1 (théorie de Hertz) s'obtient pour des cylindres identiques aux surfaces lisses ayant des propriétés mécaniques élastiques isotropiques. Il s'agit d'un contact de type non-conforme, c'est-à-dire d'un contact où la séparation des corps suit une forme parabolique ce qui est le cas lorsque l'aire de contact demeure petite par rapport aux dimensions finies des cylindres.

### 6.2.1.2 Pourquoi, pour les essais à 90 degrés, le rapport b/a est-il différent de 1?

Le rapport différent de 1 provient probablement de divers facteurs :

- Le système de guidage (ergot E dans la rainure de la vis (V) à la figure 4.1) dans le montage présente un jeu d'où découle une variation de l'angle de contact des fils de  $\pm 5^\circ$ . Aussi, le montage FA comporte une excentricité entre l'axe de l'ergot et l'axe de la vis qui entraîne une erreur de  $-2^\circ$  pour l'angle d'intersection des fils d'aluminium (l'angle réel est :  $88^\circ$ ). Dans le cas du contact à  $90^\circ$ , une variation d'angle de  $5^\circ$  entraîne une variation du rapport b/a de 10%. Les résultats expérimentaux respectent cette variation de 10%.
- Les cylindres n'ont pas une surface lisse ; une rugosité de surface longitudinale est présente à cause du tréfilage des fils d'aluminium. Cette rugosité entraîne probablement des contours irréguliers de l'empreinte plastique.
- Par ailleurs, le procédé de tréfilage entraîne des modifications de limite élastique dans la direction longitudinale par rapport à la direction circonférentielle pouvant favoriser un écoulement plastique dans une direction donnée.
- Les dimensions transversales des empreintes ne peuvent être considérées petites comparativement au diamètre des fils pour tous les chargements.  
Pour la plus faible force normale imposée (74N), la dimension transversale des empreintes correspond à 10% du diamètre du fil tandis que pour la force normale de 500N, celle-ci est égale à 30% du diamètre du fil.

## 6.2.2 Essais à 30 et 60 degrés :

Pour les essais à un angle d'intersection de 30 et 60 degrés, l'empreinte plastique du fil prend la forme d'une ellipse. Le rapport  $b/a$  des demi-axes de l'ellipse de contact mesuré est-il proche de la valeur théorique d'un contact élastique ?

### 6.2.2.1 Calcul théorique du rapport $b/a$ pour l'angle d'intersection de 30 degrés :

L'empreinte plastique sur le fil sera définie par l'ellipse dont les demi-axes sont  $a$  et  $b$ .

Le livre de Johnson, 'Contact Mechanics' [5], donne la formule 4.33 [5]:

$$b/a = (B/A)^{-2/3} \quad (6.3)$$

où la séparation initiale des corps en contact est donnée par :

$$h = Ax^2 + By^2 \quad (6.4)$$

Et d'après l'appendice 1 de [5]:

$$A - B = 1/2[(1/R_1') - (1/R_1'')] \cos(2\alpha) + 1/2[(1/R_2') - (1/R_2'')] \cos(2\beta) \quad (6.5)$$

$$\text{avec :} \quad 2\alpha = 2\beta \quad (6.6)$$

$$2\alpha + 2\beta = 2\theta \quad (6.7)$$

et où  $\theta$  est l'angle d'intersection entre les deux fils.

Dans le cas étudié lors des essais :  $\theta = 30$  degrés

$$R_1' = R_2' = R = (4.27\text{mm}) / 2$$

$$1/R_1'' = 1/R_2'' = 0$$

$$\text{Donc :} \quad A - B = (1/2R)(\cos(2\alpha) + \cos(2\beta)) \quad (6.8)$$

$$\text{et} \quad A + B = 1/R \quad (6.9)$$

on déduit que :

$$A = (1/2R)(1 + \cos(\theta)) = \sin^2(\theta/2)/R \quad (6.10)$$

et

$$B = (1/2R)(1 - \cos(\theta)) = \cos^2(\theta/2)/R \quad (6.11)$$

$$\text{donc : } B/A = \text{tg}^{-2}(\theta/2) \quad (6.12)$$

$$\text{et : } b/a = (\text{tg}(\theta/2))^{4/3} \quad (6.13)$$

Dans le cas d'un contact entre deux fils d'aluminium de diamètre égal à 4.27 mm, avec un angle d'intersection de 30 degrés, et en considérant que dans le montage AE, il n'y a pas d'excentricité, l'angle réel est de 30 degrés. Le rapport théorique entre les demi-axes de l'ellipse de contact est :

$$\mathbf{b/a \approx 0.174}$$

#### *6.2.2.2 Calcul théorique du rapport b/a pour l'angle d'intersection de 60 degrés :*

Dans le montage FA, l'excentricité entre l'ergot et la vis pour les essais avec un angle d'intersection de 60 degrés est de  $-2^\circ$ . L'angle réel d'intersection est donc égal à  $58^\circ$ .

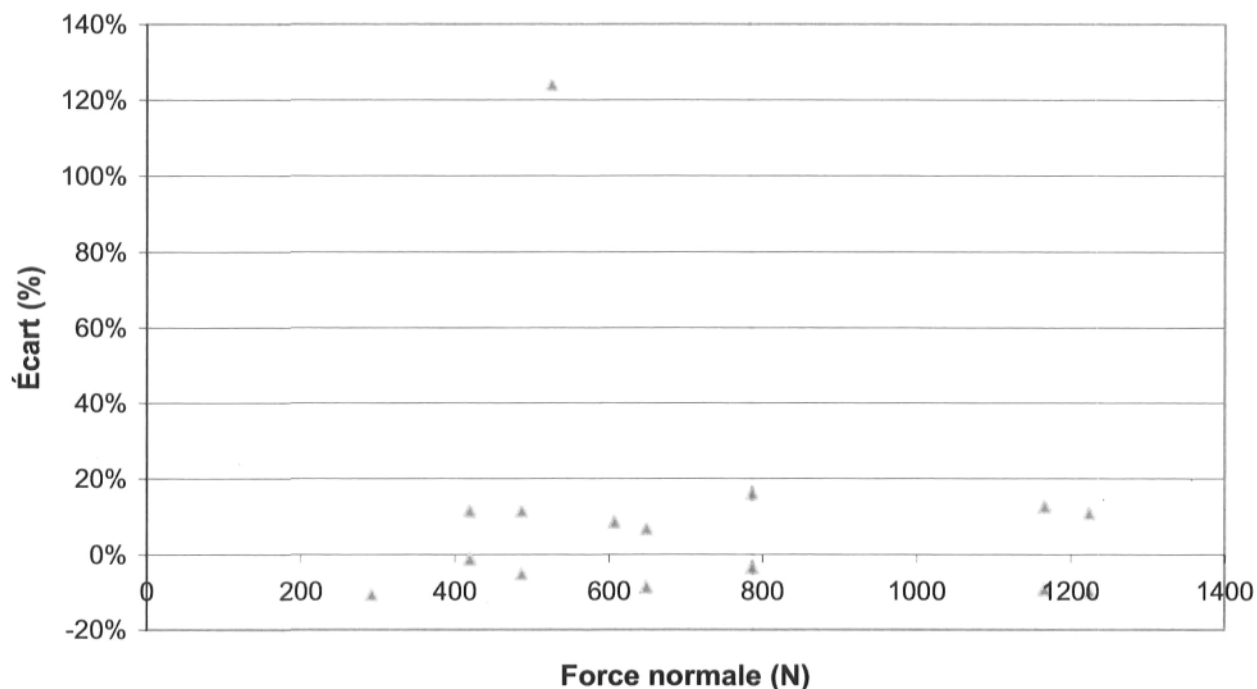
Dans le cas d'un contact entre deux fils d'aluminium de diamètre égal à 4.27, avec un angle d'intersection de 58 degrés, le rapport théorique entre les demi-axes de l'ellipse de contact est :

$$\mathbf{b/a \approx 0.455}$$

### 6.2.2.3 Analyse des résultats pour un angle d'intersection de 30°:

Selon le tableau 5.5 et la figure 5.11.A, pour les forces normales élevées, les valeurs du rapport des dimensions transversales ( $b/a$ ) sont comparables au calcul théorique.

En faisant le calcul de l'écart du rapport des dimensions transversales des empreintes obtenues lors des essais à 30 degrés (angle réel 30°) par rapport à celui obtenu théoriquement, la graphique suivant est tracé :



**Figure 6.2.2 : Écart entre les résultats des essais à 30 degrés et le calcul théorique**

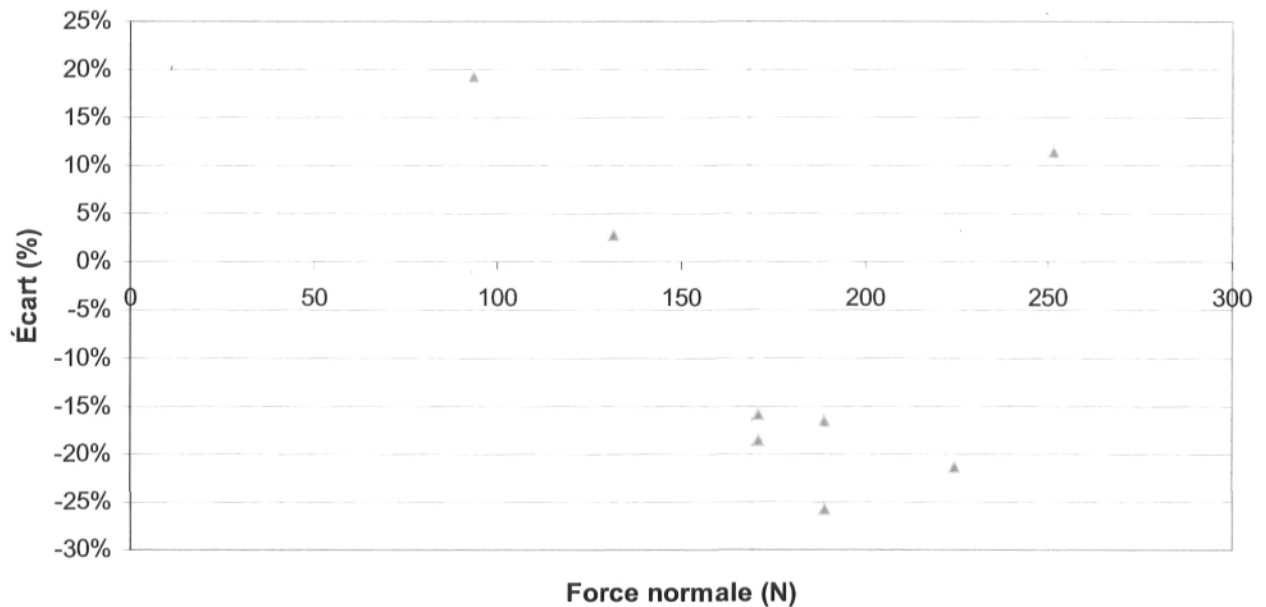
Le rapport  $b/a$  est de l'ordre de grandeur de la valeur théorique.

La variation de  $\pm 5^\circ$  due au système de guidage entraîne une variation de  $\pm 20\%$  du rapport théorique  $b/a$ .

Les résultats obtenus respectent globalement cette variation.

#### 6.2.2.4 Analyse des résultats pour un angle d'intersection de 60°:

À partir des valeurs du tableau 5.6, on compare le rapport  $b/a$  pour les traces plastiques obtenues à l'aide du montage FA et avec un angle d'intersection de 60 degrés (angle réel 58°) avec la valeur théorique pour un angle d'intersection de 58 degrés.



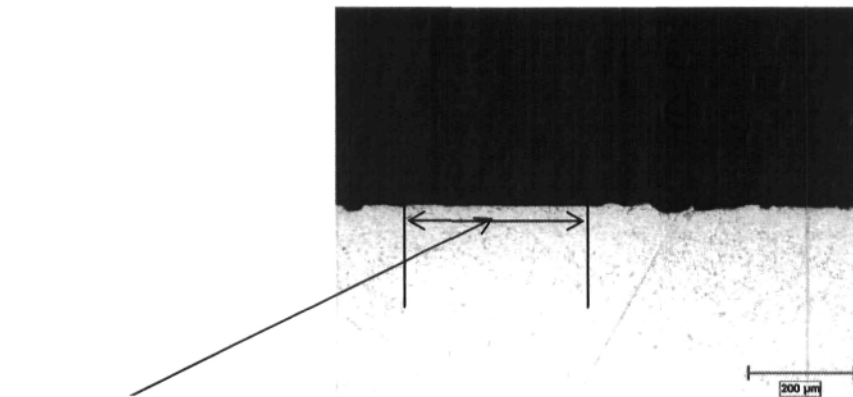
*Figure 6.2.3 : Écart entre les résultats des essais à 60 degrés et le calcul théorique*

Le rapport  $b/a$  se trouve en majorité dans un intervalle de  $\pm 20\%$ . Ceci peut s'expliquer par le fait que la variation de  $\pm 5^\circ$  de l'angle d'intersection, due au système de guidage, génère une variation de  $\pm 20\%$  du rapport  $b/a$  théorique.

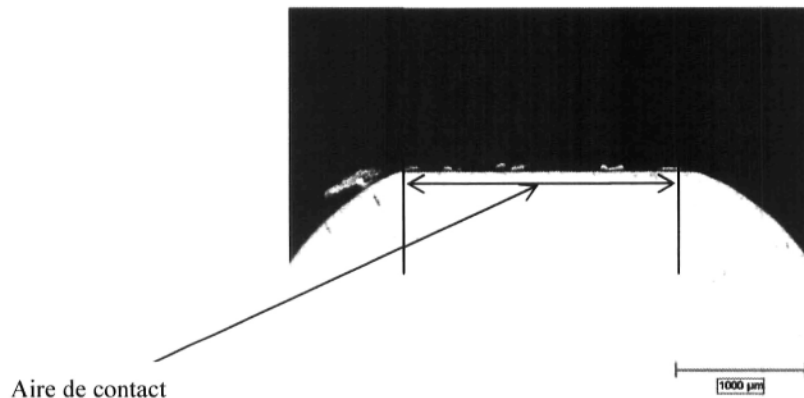
D'autre part, la différence marquée entre les résultats obtenus et la valeur théorique, pour les petites forces normales, peut s'expliquer aussi par le fait que, pour les faibles forces, il n'y a pas des empreintes plastiques bien visibles mais souvent seulement un changement de fini de surface

### 6.3 Influence de l'état de surface :

Une coupe transversale des fils d'aluminium, utilisés lors de deux essais, est montrée aux figures 6.3 et 6.4. Cette coupe passe au milieu de la trace plastique sur les fils.



**Figure 6.3 : Force de 74N (Contact à 90 degrés)**



**Figure 6.4 : Force de 1616N (Contact à 90 degrés)**

Les deux figures montrent la surface déformée au niveau de l'aire de contact.

À la figure 6.3, on distingue deux types de profil de surface :

- Une zone «Aire de contact» délimitée par les deux barres verticales; cette zone montre une surface ayant un profil rectiligne
- deux autres zones adjacentes à la zone «Aire de contact» où la surface a un profil ondulé représentatif de l'état de surface avant qu'il n'existe un contact entre fils.

Les limites entre ces différentes zones sont difficiles à déceler même à un tel grossissement de la figure, cela permet d'apprécier la difficulté d'établir le contour de l'aire de contact aux faibles charges transversales. Il en va tout autrement pour les fortes charges transversales où le profil global du fil est fortement modifié (figure 6.4).

## Chapitre 7

### *Conclusion*

Le travail expérimental, décrit dans ce mémoire, montre qu'il existe une correspondance entre les dimensions et la forme de l'aire des traces plastiques sur la surface des fils d'aluminium et la force normale appliquée au point de contact des fils croisés. L'aire de la trace plastique varie linéairement en fonction de la force normale appliquée pour les trois angles d'intersection testés, soient 30°, 60° et 90°.

Ces relations linéaires sont :

Pour des angles d'intersection de 30° .

$$\text{Aire (mm}^2\text{)} = 0.0028 F \text{ (N)} - 0.0119 \quad \text{avec } 292\text{N} < F < 1224\text{N}$$

Pour des angles d'intersection de 60°

$$\text{Aire (mm}^2\text{)} = 0.0026 F \text{ (N)} + 0.0217 \quad \text{avec } 74\text{N} < F < 252\text{N}$$

Pour un angle d'intersection de 90°

$$\text{Aire (mm}^2\text{)} = 0.0027 F \text{ (N)} - 0.0342 \quad \text{avec } 74\text{N} < F < 1617\text{N}$$

La pente de ces droites expérimentales est pratiquement la même et l'influence de l'angle d'intersection ne semble pas avoir un effet significatif

La dispersion des résultats expérimentaux par rapport aux droites expérimentales déduites par régression linéaire est très réduite.

Toutefois, notre travail reste incomplet du fait qu'il faudrait aussi vérifier :

- 1) l'effet d'une traction appliquée aux fils en contact.
- 2) L'effet du redressement des fils testés qui ont été prélevés sur un conducteur aérien. Les fils prélevés avaient alors la forme d'une hélice.

Un modèle numérique pourrait être développé afin d'étudier la progression de l'aire de la trace plastique en fonction de la force normale appliquée au contact de deux fils croisés sans chargement de traction. Une fois cette étape validée par les résultats expérimentaux ci-dessus, l'influence d'une traction appliquée aux fils en contact pourrait par la suite être vérifiée par une analyse numérique et éventuellement validée expérimentalement.



## *Bibliographie*

- [1] **Björklund, S.** The influence of surface roughness in elliptical contacts, Tribology International 34, (2001) 841-845.
- [2] **Hermann, K. P. et Loboda, V. V.** On interface crack models with contact zones situated in an anisotropic bimaterial, Archive of Applied Mechanics 69, (1999) 317-335.
- [3] **Jäger, J.** Axi-symmetric bodies of equal materials in contact under torsion or shift, Archive of Applied Mechanics 65, (1995) 478-487.
- [4] **Jäger, J.** Half-planes without coupling under contact loading, Archive of Applied Mechanics 67, (1997) 247-259.
- [5] **Johnson, K. L.** Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1987.
- [6] **Knothe, K. et Bucher, F. et Lünenscholß.** The normal contact of rough surfaces with fine discretization, Archive of Applied Mechanics 73, (2004) 561-567.
- [7] **Lee, S. C. et Ren, N.** Behaviour of elastic-plastic rough surfaces contacts as affected by surface topography, load and material hardness, Tribology Transactions 39, (1996) 67-74.
- [8] **Lee, S. C. et Ren, N.** Contact simulation of three-dimensional rough surfaces using movind grid method, Journal of Tribology 115, (1993) 597-601.
- [9] **Mindlin, R. D.** Compliance of elastic bodies in contact, Transactions ASME 16, (1949) 259.

- [10] **Nowell, D. et Hills, D. A.** Hertzian contact of ground surfaces. Journal of Tribology, Vol.111/175, Janvier 1989.
- [11] **Pfeiffer, F.** Unilateral problems of dynamics, Archive of Applied Mechanics 69, (1999) 503-527.
- [12] **Seemann, W.** Deformation of an elastic helix in contact with a rigid cylinder, Archive of Applied Mechanics 67, (1996) 117-139.
- [13] **Stout K. J.** Three dimensional surface topography, measurement, interpretation and applications, London :Penton, 1994.
- [14] **Stravoulakis, G. E.** Optimal prestress of structures with frictional unilateral contact interfaces, Archive of Applied Mechanics 66, (1995) 71-81.
- [15] **Yan, W. et Fischer, F. D.** Application of the Hertz contact theory to rail-wheel contact problems, Archive of Applied Mechanics 70, (2000) 255-268.
- [16] **Chouinard, G.** Analyse des caractéristiques de dissipation d'énergie aux points de contact entre les couches 1 et 2 d'un toron 1 x n1 x n2, Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Université Laval, 1994
- [17] **Faraji, A.** Analysis of edge effects on some contact problems, Mémoire de maîtrise en génie mécanique, Université Laval, 1995.
- [18] **Ouaki, B.** Analyse expérimentale et théorique de l'endommagement par fatigue à petits débattements des fils de conducteurs électriques au voisinage d'une pince de suspension, Thèse de doctorat en génie mécanique, Université Laval, 1998.
- [19] American society for Metals, Handbook 8<sup>th</sup> Vol.1 p.935
- [20] Aluminium Round Wires for use in Overhead Electrical Conductors,  
Canadian Standard Association CAN3-C49.7-M85

## *Liste des annexes*

- Annexe 1.a*      Caractéristiques de la machine de traction SATEC
- Annexe 1.b*      Caractéristiques de l'amplificateur de jauges
- Annexe 2*        Dessins de fabrication des montages FA et AE
- Annexe 3*        Résultats de l'étalonnage de la cellule de charge CC-100
- Annexe 4*        Résultats de l'étalonnage de la cellule de charge CC-1000
- Annexe 5*        Résultats de l'étalonnage du montage FA avec la cellule de charge CC-100
- Annexe 6*        Résultats de l'étalonnage du montage AE avec la cellule de charge CC-1000
- Annexe 7*        Résultats de l'étalonnage du montage AE avec la cellule de charge CC-100
- Annexe 8*        Essais de traction effectués sur les fils d'aluminium
- Annexe 9*        Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 60 degrés
- Annexe 10*      Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 30 degrés
- Annexe 11*      Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 90 degrés

*Annexe 1.a*

Caractéristiques de la machine SATEC

**SATEC****APEX T-Series  
Universal Testing Machine****T-Series Specification Table with Apex Controller**

FRAME MODEL	T10000	T20000	T30000	UNITS
Capacity	11,000	22,000	33,000	lbs
	5,000	10,000	15,000	kg
	50,000	100,000	150,000	N
Standard Max Speed	20	20	20	in./min.
	508	508	508	mm/min.
Standard Min Speed	0.002	0.002	0.002	in./min.
	0.0508	0.0508	0.0508	mm/min.
Load Capacity at Full Speed	10,000	20,000	30,000	lbs
	4,536	9,072	13,608	kg
Crosshead Travel	48	48	48	in.
	1,219	1,219	1,219	mm
Horizontal Clearance (Between Uprights)	22	22	22	in.
	559	559	559	mm
Standard Crosshead Position Resolution	0.00001			in.
	0.000254			mm
Speed Accuracy	± 0.3%			
Load Accuracy	Meets or Exceeds ASTM E4** (± 0.5% of Load or ± 1.0% of Range, whichever is greater)			
Crosshead Position Accuracy	0.001 in or 0.125% of displacement, whichever is greater			
Frame Stiffness	400,000	420,000	450,000	lbs/in.
Power Requirements	230V, 3 Phase, 50/60 Hz			
Weight	1,200	1,300	1,350	lbs
	544	590	612	kg
Height	91	91	91	in.
	2,311	2,311	2,311	mm
Width	38.25	38.25	38.25	in.
	972	972	972	mm
Depth	29	29	29	in.
	737	737	737	mm
Additional Height	Available in 12 in (305mm) Increments up to Maximum			
Maximum Additional Height	24	24	24	in.
	610	610	610	mm

### *Annexe 1.b*

Caractéristiques de l'amplificateur de jauges

## *Amplificateur de jauges :*

### ***Caractéristiques :***

L'amplificateur accepte le branchement de :

- ponts complets
- ½ pont (350 ohms)
- ¼ pont (120 et 350 ohms)

(Dans notre cas, on a un pont complet.)

Alimentation du pont :                    0-10 VDC

Gain (S1 x R1)                            1 à 11000

Alimentation de l'amplificateur : 10-30V

Balancement de l'amplificateur par potentiomètre sur le panneau avant

Balancement du pont par potentiomètre sur le panneau avant

Calibration précise du gain par potentiomètre sur le panneau arrière

Calibration +2000 µm/m par interrupteur avant

Filtre ON/Off (bande passante selon les besoins)

Entrée signal par connecteur arrière

Sortie signal avant et arrière (BNC)

Bande passante

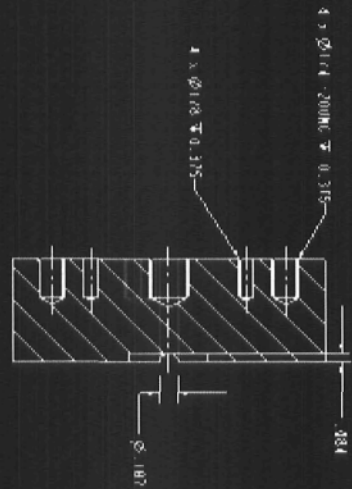
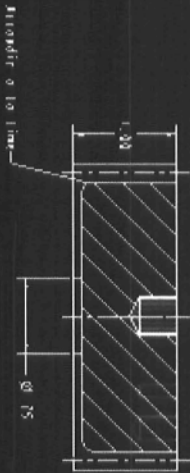
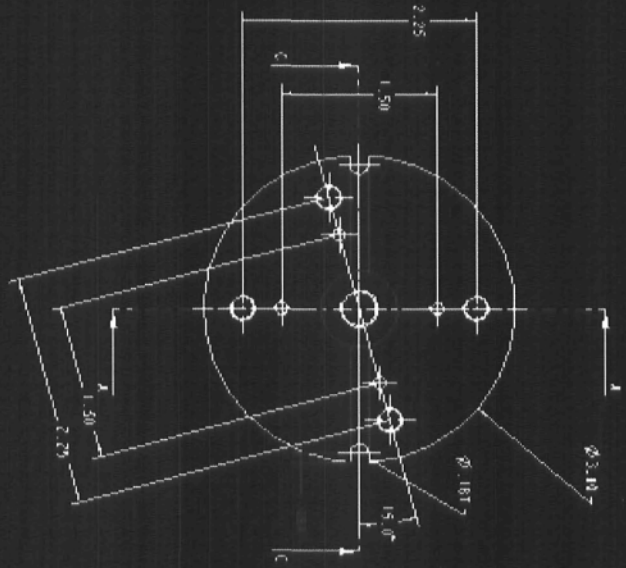
G=1	1 Mhz
G=10	400 KHz
G=100	150 KHz
G=1000	25 KHz

## *Annexe 2*

Dessins de fabrication des montages FA et AE



MATERIEL : ALUMINIUM 6061T6  
 QTE : 1

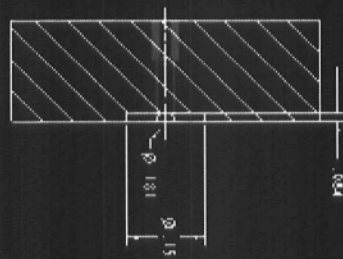
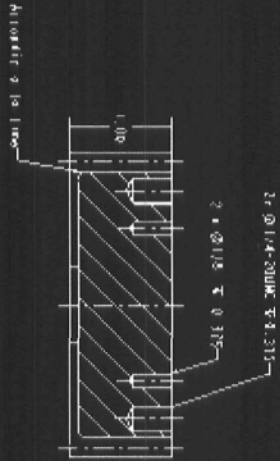
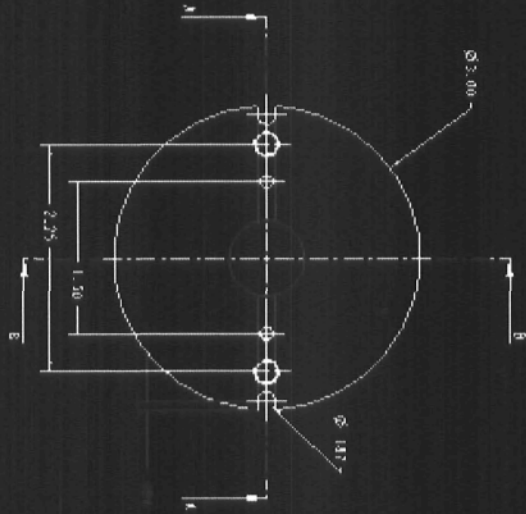


NOMENCLATURE		
ITEM	QTE	DESCRIPTION

UNIVERSITE LAVAL		Faculté des sciences et de génie	
Département de génie mécanique		Département de génie mécanique	
Dessiné par Y. Soudji		SUPPORT2	
Vérifié par		Échelle	1/1
Tolérance		Unités	PO
Titre		DCSSM NO.	3

099. P3. H. 05. 04

MATERIEL : ALUMINIUM 6061-T6  
 QTE : 1



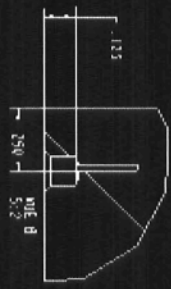
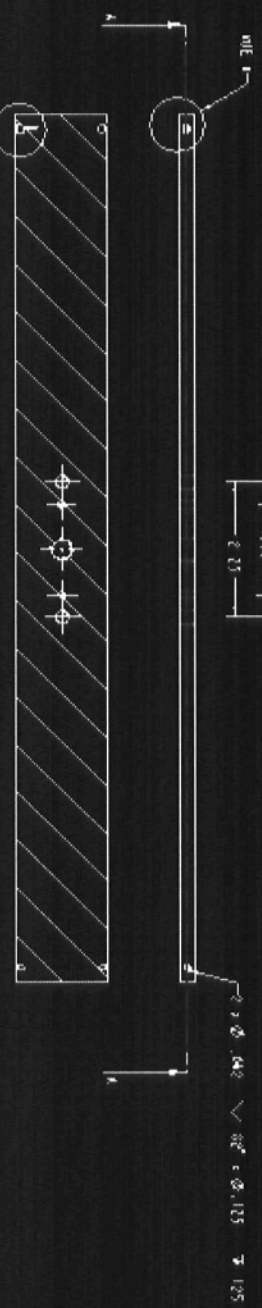
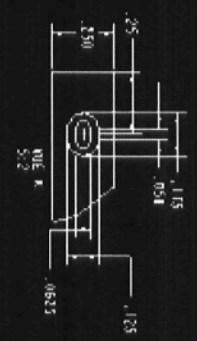
NOMENCLATURE		
ITEM	QTE	DESCRIPTION
		RCU

UNIVERSITE LAVAL		FACULTE DES SCIENCES ET DE GENIE	
Division par		Y. SODHI	
Profilés par		SUPPORT 1	
Intégration		échelle 1/1	
Tit. angle		n°des 1	
		Po 2	
		DESSIN NO. 2	

1000  
 100  
 10  
 1

MATERIEL: ALUMINIUM 6061-T6  
 QTE: 2

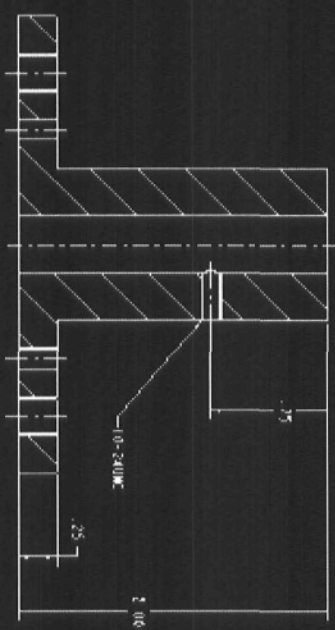
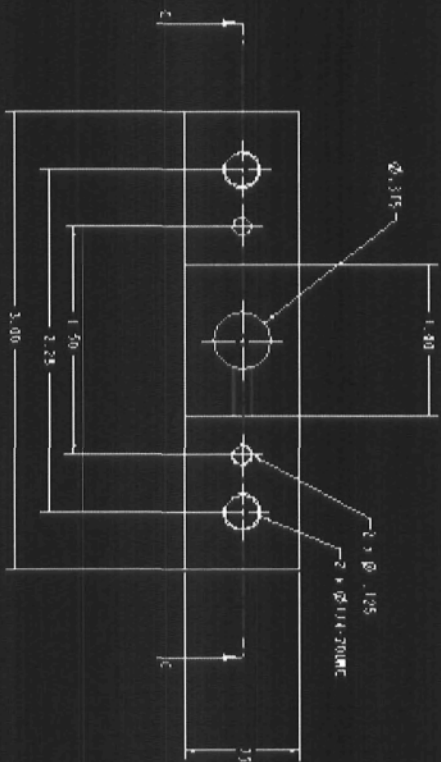
NOMENCLATURE		
REF	QTE	DESCRIPTION
		RCU



UNIVERSITE LAVAL		COSEIL DE SCIENCE ET DE TECH	
DESIGNEUR: M. SODHI		MATERIEL: BARRE FLEXIBLE	
TITRE: M. SODHI		DATE: 3/75	
TEL: 522		PROJ: 4	

5 2 2

MATERIEL : ALUMINIUM 6061T6  
 OTE : 1

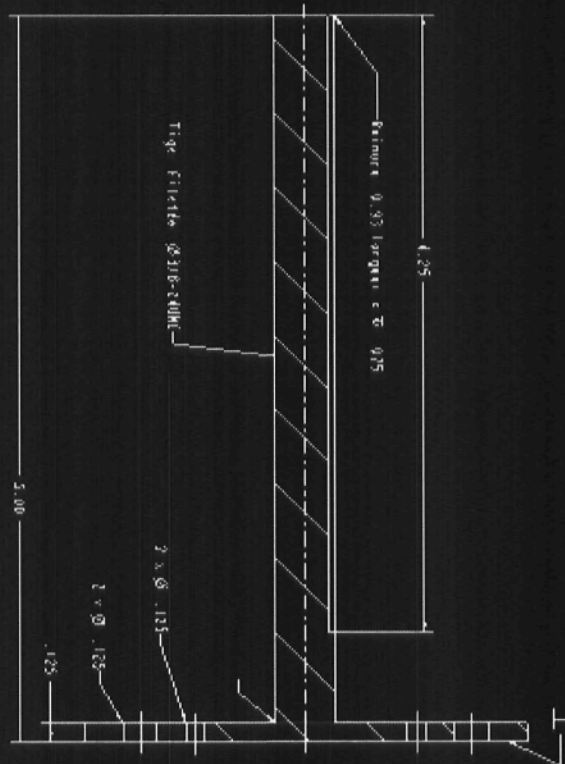
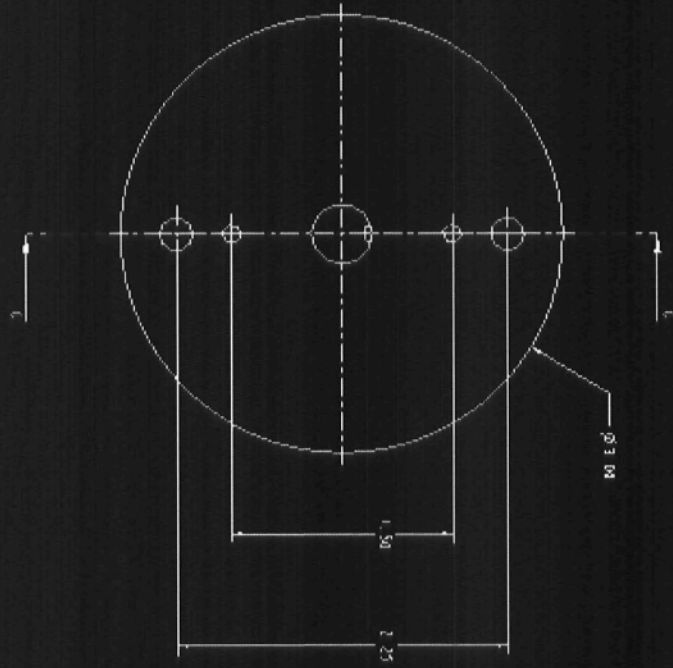


NOMENCLATURE		
ITEM	QTE	REMARQUES
1	1	SYSTEME DE GUIDAGE

UNIVERSITE LYOAL		
Faculté des sciences et de génie <i>Spécialité en génie mécanique</i>		
Revisé par	Y. Sodik	SYSTEME
Dessiné par		DE GUIDAGE
Validé par		échelle 3/2
		unites Po
Tot. onglet		DESSIN NO. 5

FORM. P2. 01.000.01

MATERIEL : ALUMINIUM 6061T6  
 OTE : 1



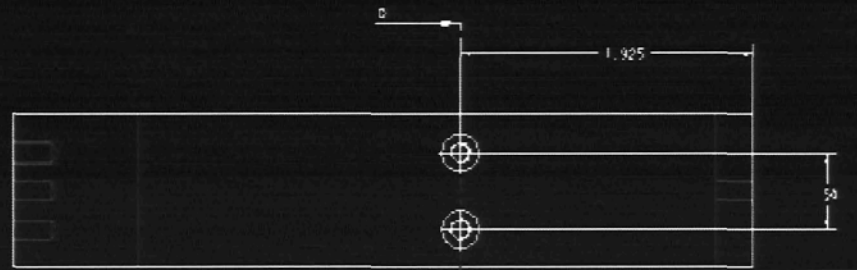
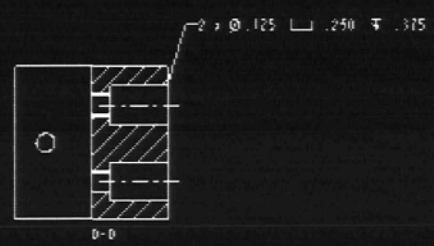
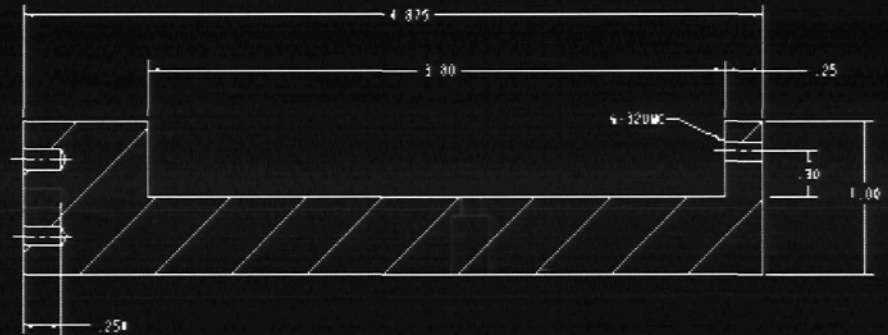
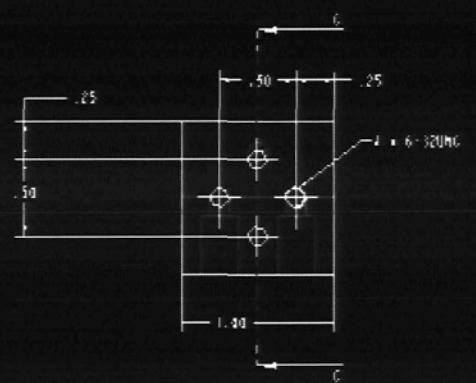
NOMENCLATURE		
NUM	QNT	DESCRIPTION
		RM

UNIVERSITE LAVAL		Faculté des sciences et de génie	
Division de génie mécanique		Matière de génie mécanique	
Designé par	Y. Sadeh	SYSTEME DE PRESSION	
Vérifié par		kayle 715 mtds Po	
Téléphone		DCSSIM 401 6	
Tel. ext.			

1000 11 11 11 11 11

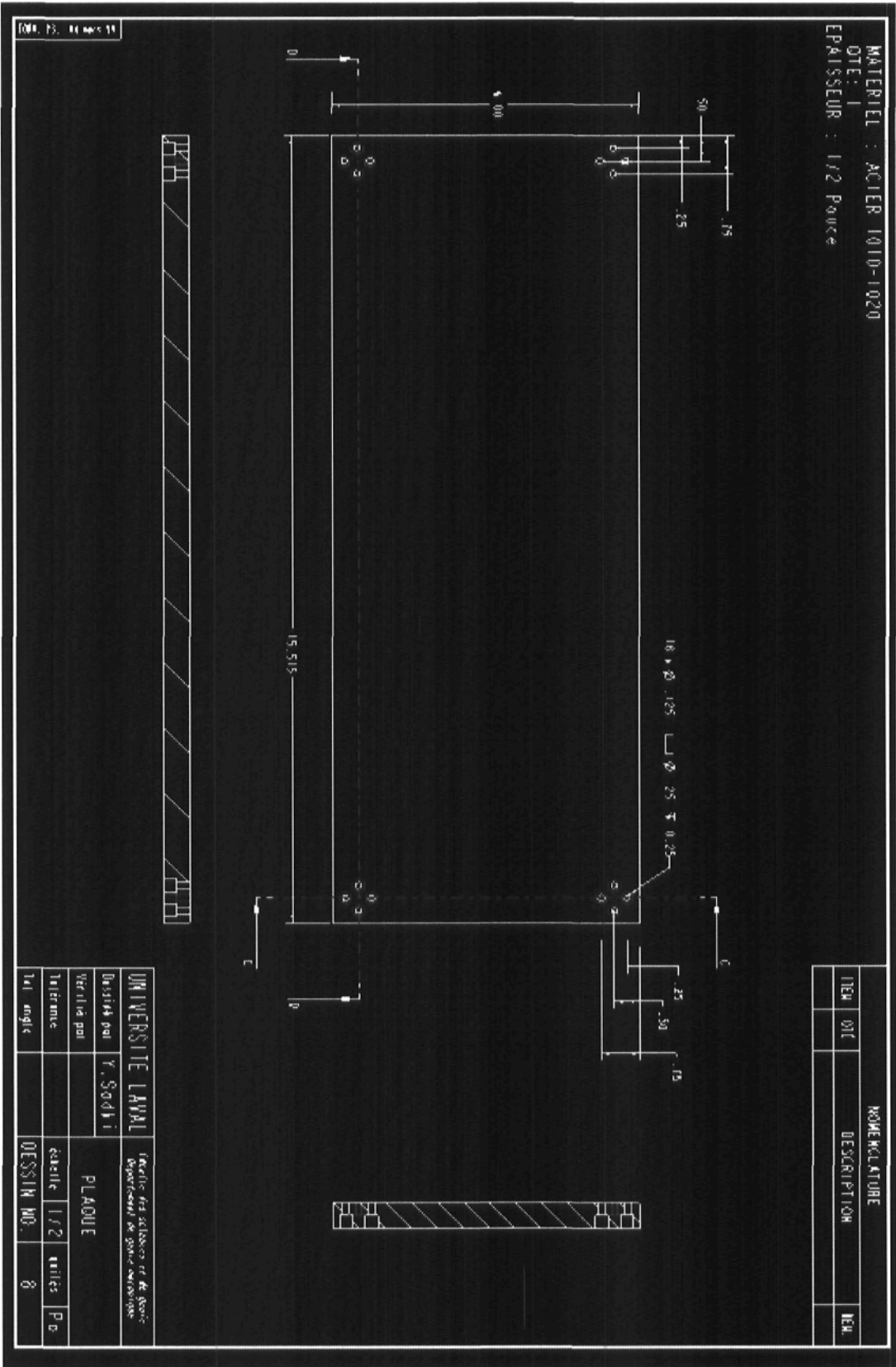
MATERIEL : ALUMINIUM 6061T6  
 QTE : 4

NOMENCLATURE			
ITEM	QTE	DESCRIPTION	RCM



UNIVERSITE L'AVAL

UNIVERSITE L'AVAL		Faculté des sciences et de génie Département de génie mécanique			
Dessiné par	V. Sadki	MONTANT			
Vérifié par					
Tolérance		échelle	3/2	milli	Po
Tel. école		DESSIN NO.	7		



### *Annexe 3*

Résultats de l'étalonnage de la cellule de charge CC-100



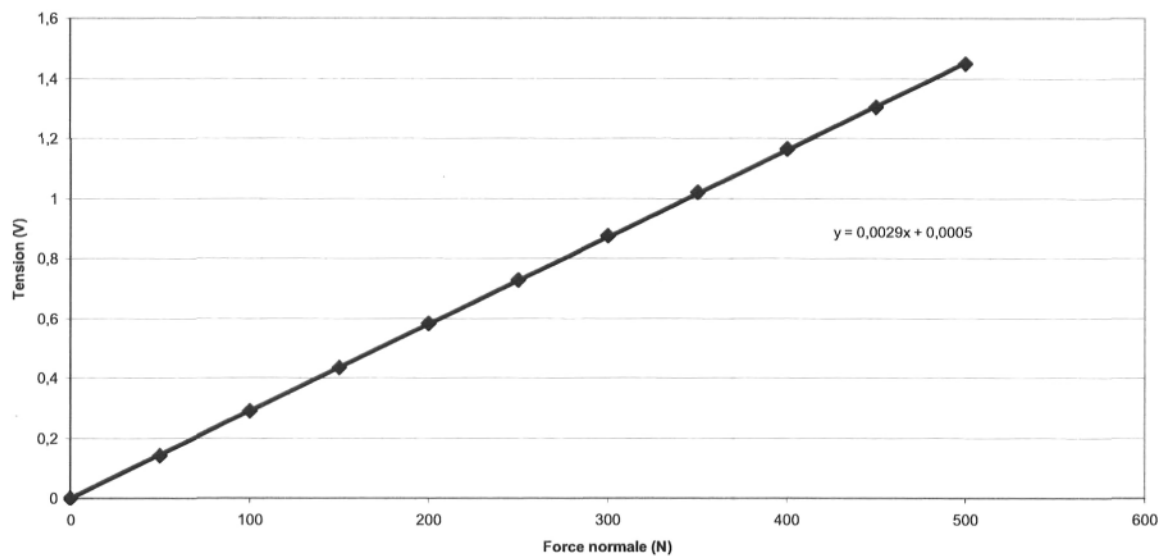
## Calibration de la cellule de charge CC-100

<i>Force (N)</i>	<i>Tension (V)</i>
0	0,00005
50	0,1431
100	0,2904
150	0,4359
200	0,5829
250	0,7281
300	0,8749
350	1,0196
400	1,1663
450	1,305
500	1,45

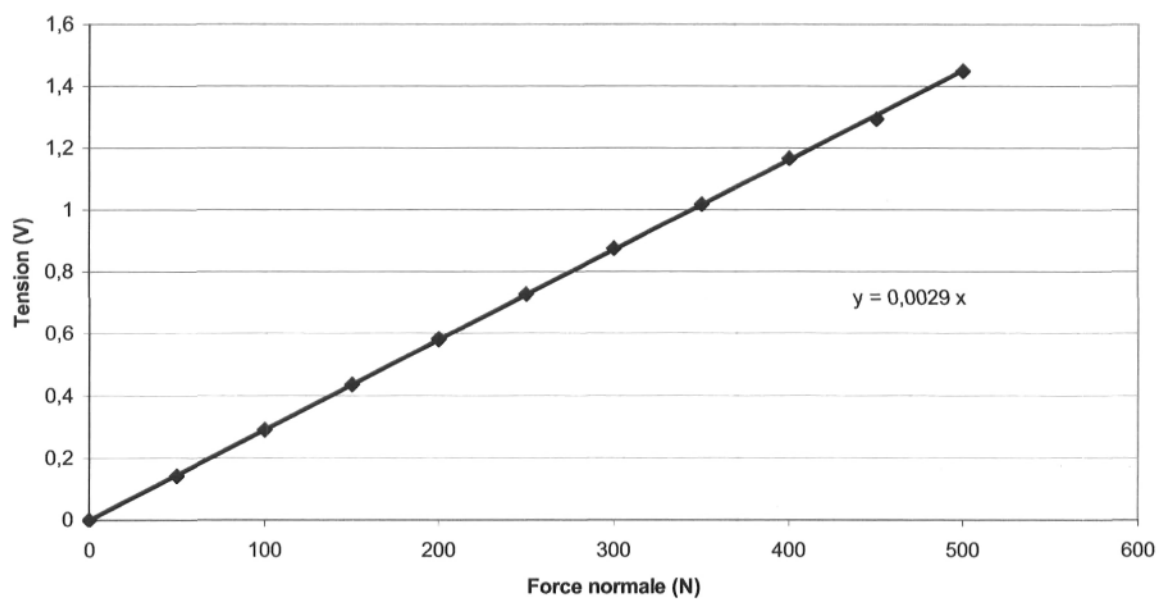
<i>Force (N)</i>	<i>Tension (V)</i>
500	1,45
450	1,295
400	1,1658
350	1,0193
300	0,8745
250	0,7276
200	0,5824
150	0,4354
100	0,29
50	0,1427
0	0

<i>Force (N)</i>	<i>Tension (V)</i>
100	0,2883
250	0,728
50	0,1432
300	0,8741
450	1,305
150	0,4367
350	1,018
200	0,582
500	1,45
400	1,1654
0	0,0003

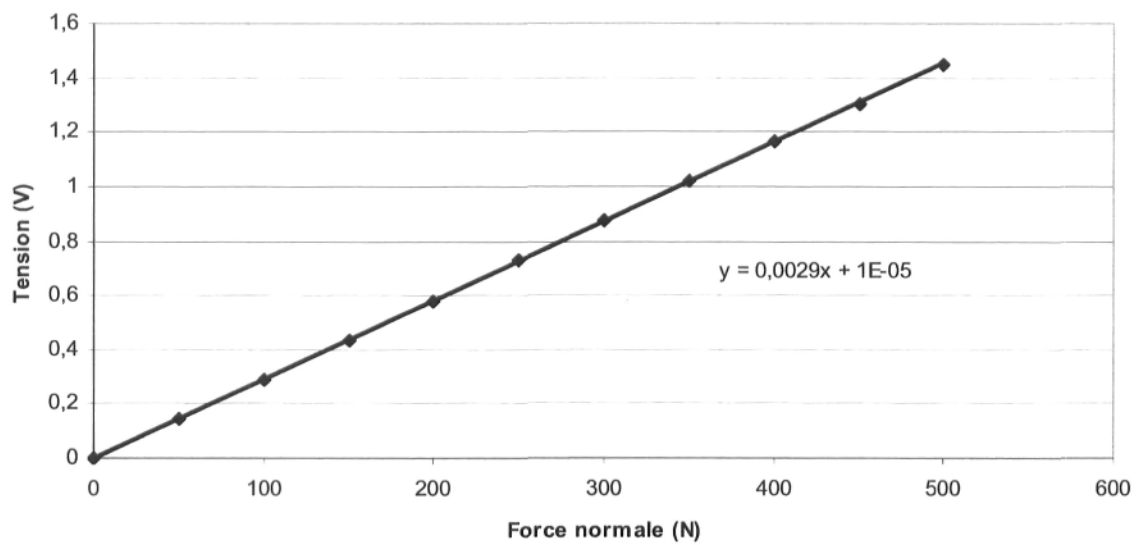
Calibration de la cellule de charge CC-100  
Série ascendante

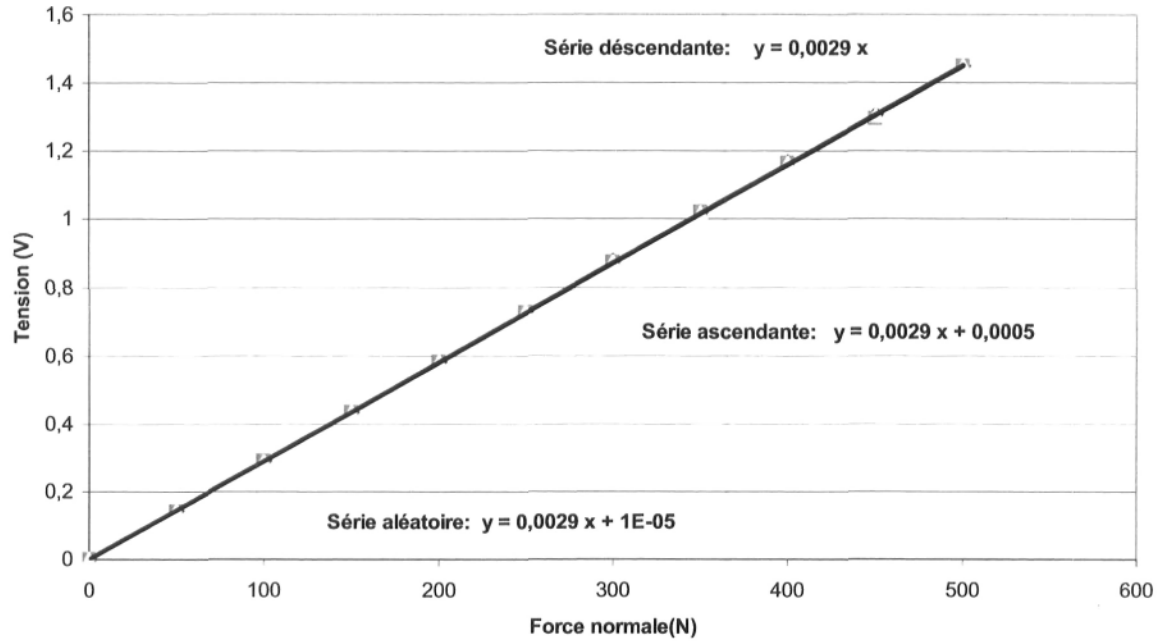


Calibration de la cellule de charge CC-100  
Série descendante

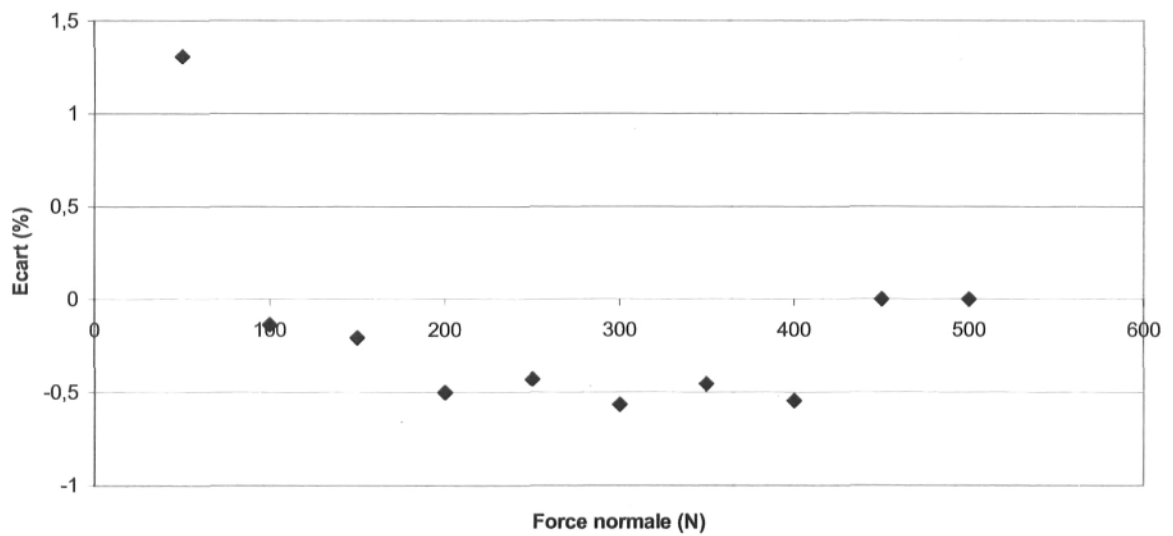


Calibration de la cellule de charge CC-100  
Série aléatoire





Écart par rapport à la courbe de tendance de la série ascendante tronquée de l'ordonnée à l'origine



#### *Annexe 4*

Résultats de l'étalonnage de la cellule de charge CC-1000

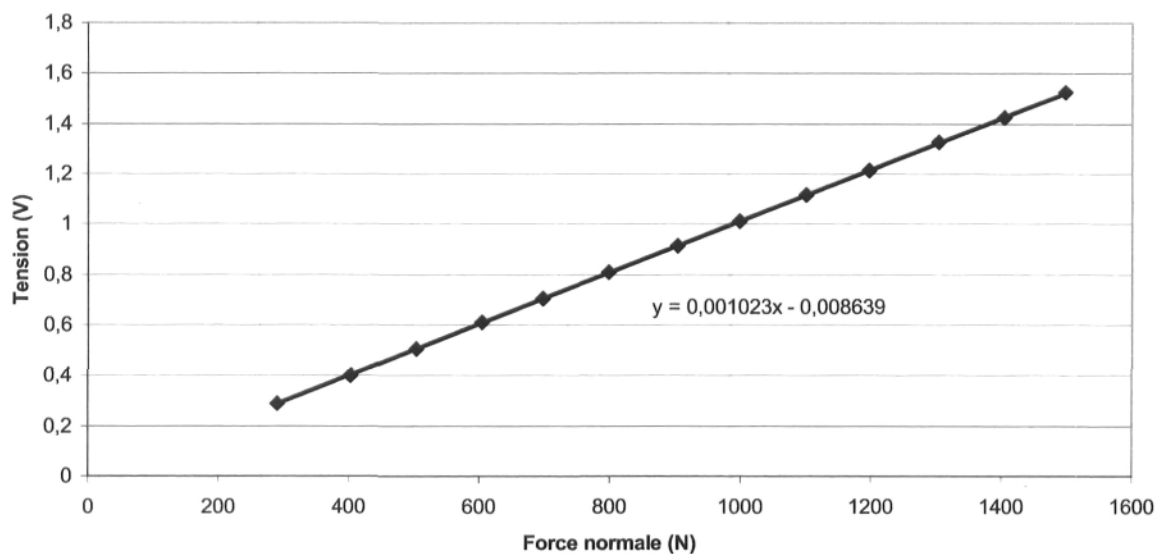
## Calibration de la cellule de charge CC-1000

<i>Force (N)</i>	<i>Tension (V)</i>
291	0,2892
403	0,4027
503	0,5067
605	0,6103
698	0,7059
798	0,8087
904	0,9166
999	1,0131
1100	1,1178
1197	1,2159
1304	1,3263
1404	1,4268
1498	1,5248

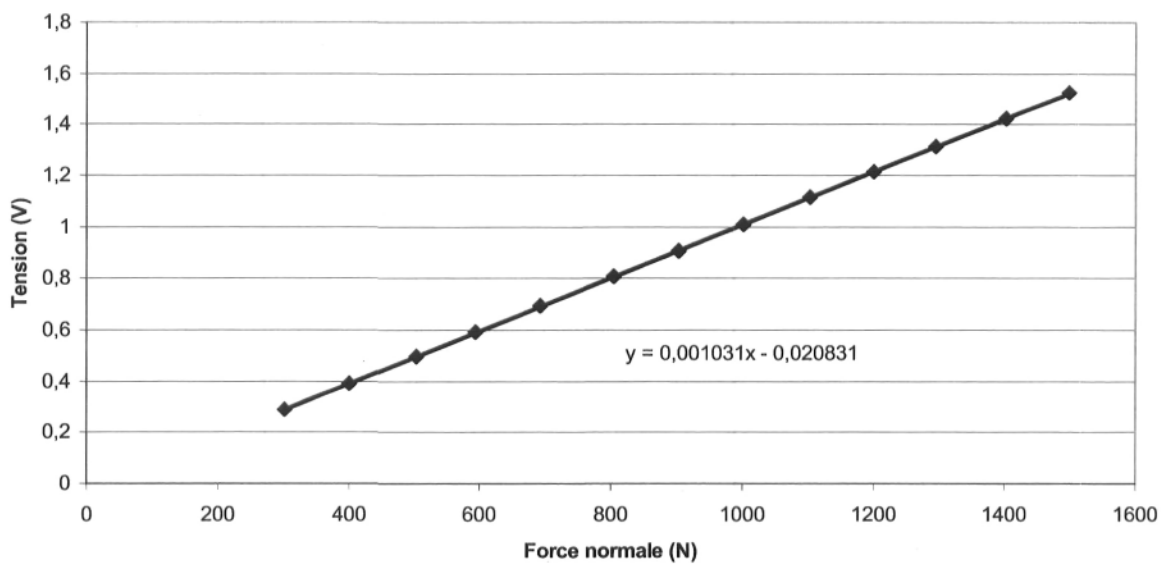
<i>Force (N)</i>	<i>Tension (V)</i>
1498	1,5248
1403	1,4248
1295	1,3135
1200	1,2146
1104	1,116
1002	1,0113
903	0,9087
804	0,8082
692	0,6959
594	0,5922
504	0,499
401	0,3929
302	0,2881

<i>Force (N)</i>	<i>Tension (V)</i>
862	0,8615
1124	1,1325
1444	1,4627
798	0,7995
572	0,5675
318	0,3061
105	0,0845

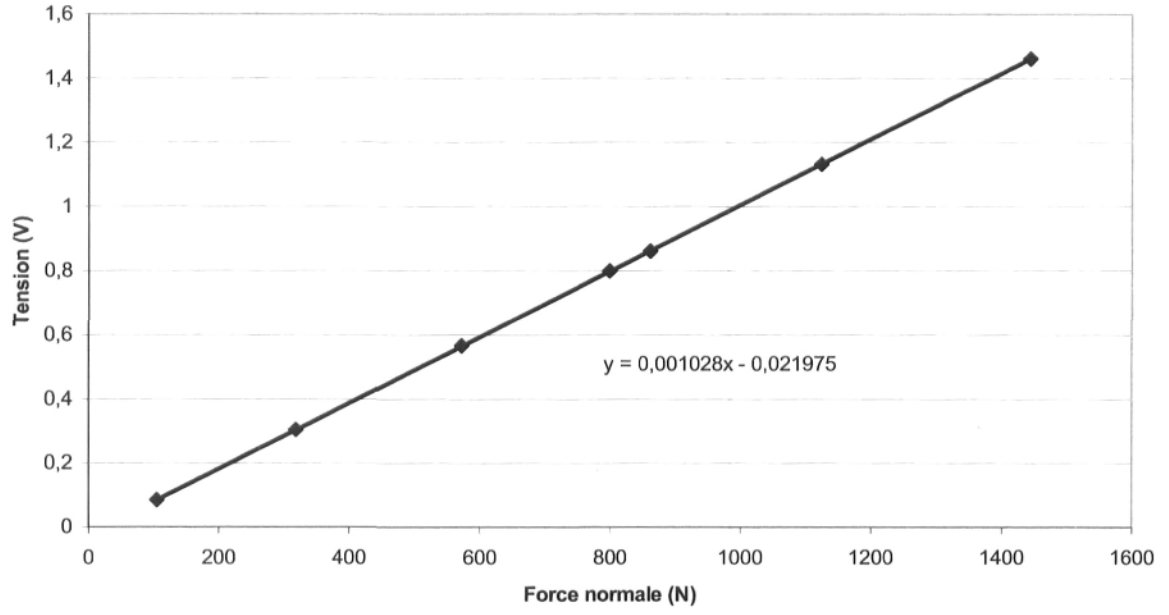
Calibration de la cellule de charge CC-1000  
Série Ascendante



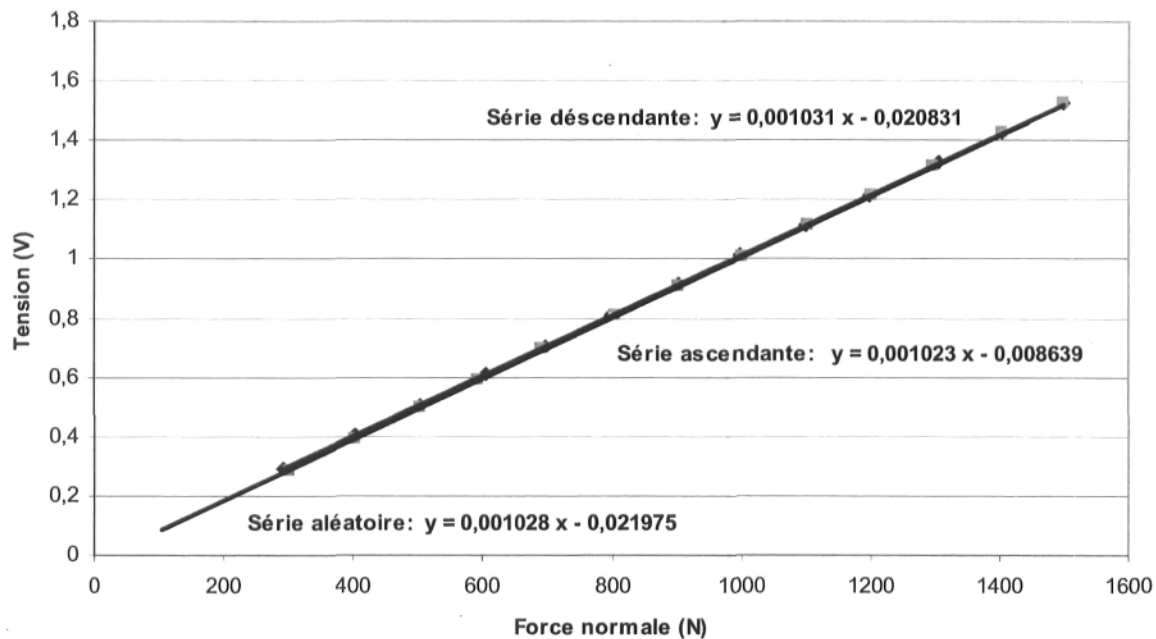
Calibration de la cellule de charge CC-1000  
Série Descendante



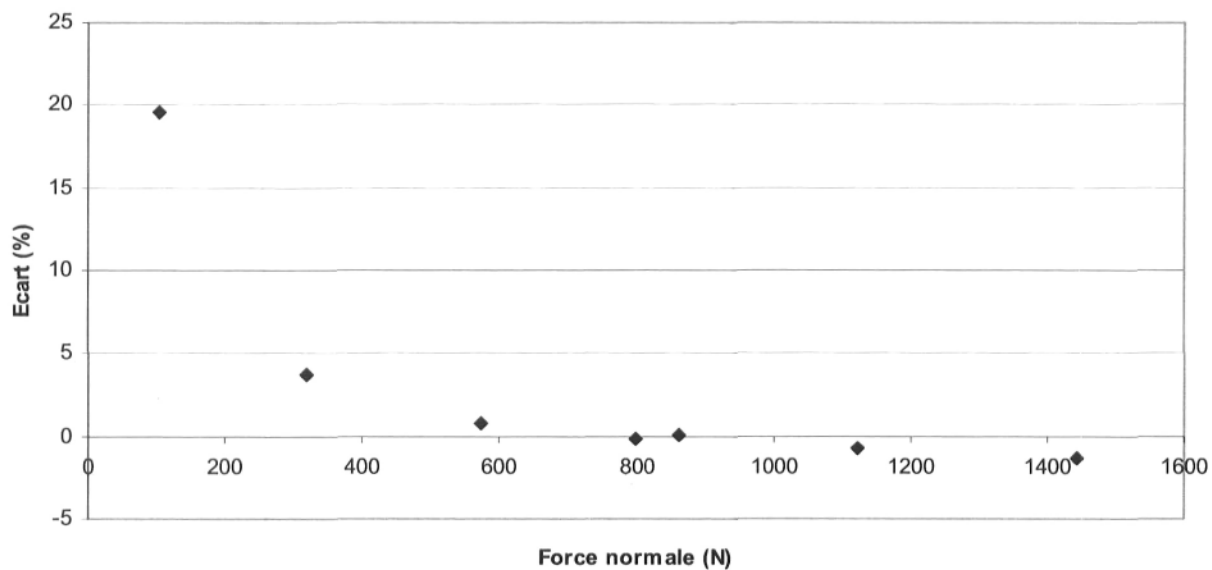
Calibration de la cellule de charge CC-1000  
Série aléatoire







Écart par rapport à la courbe de tendance de la série aléatoire tronquée de l'ordonnée à l'origine



### *Annexe 5*

Résultats de l'étalonnage du montage FA avec la cellule de charge CC-100

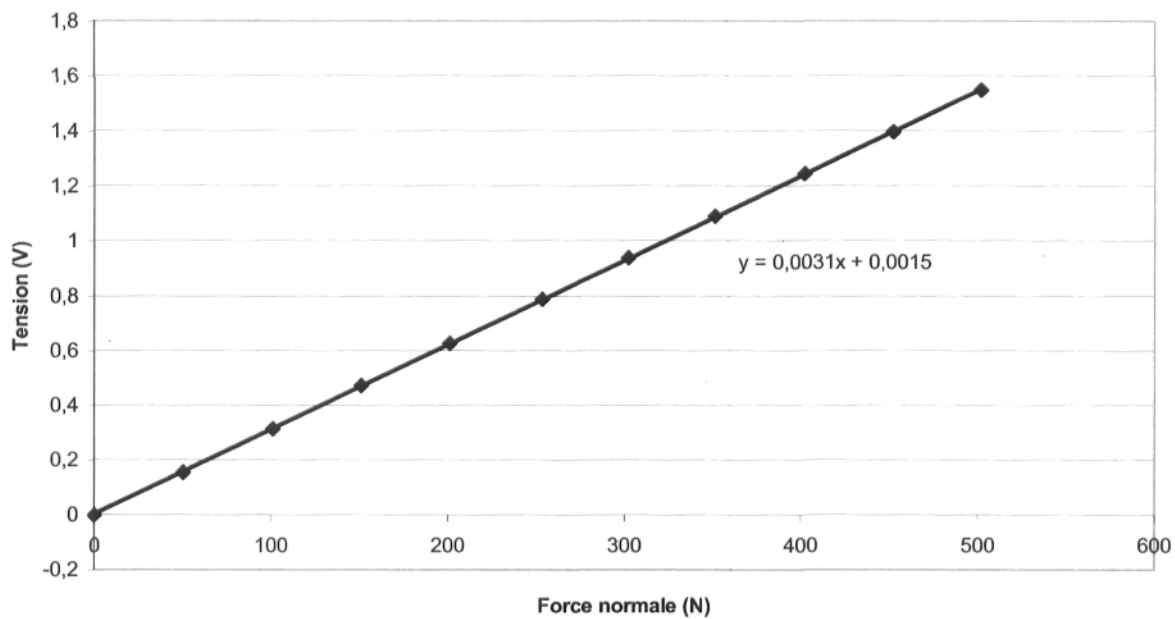
## Calibration du montage FA

Série 1		
Tension Cellule (V)	Tension Plaque (V)	Force (N)
0	-0,0009	0
0,1455	0,1531	50,17241379
0,2925	0,3135	100,862069
0,4389	0,4705	151,3448276
0,5836	0,6261	201,2413793
0,7349	0,7885	253,4137931
0,8765	0,9385	302,2413793
1,0191	1,091	351,4137931
1,1659	1,2455	402,0344828
1,3112	1,3976	452,137931
1,4551	1,5481	501,7586207

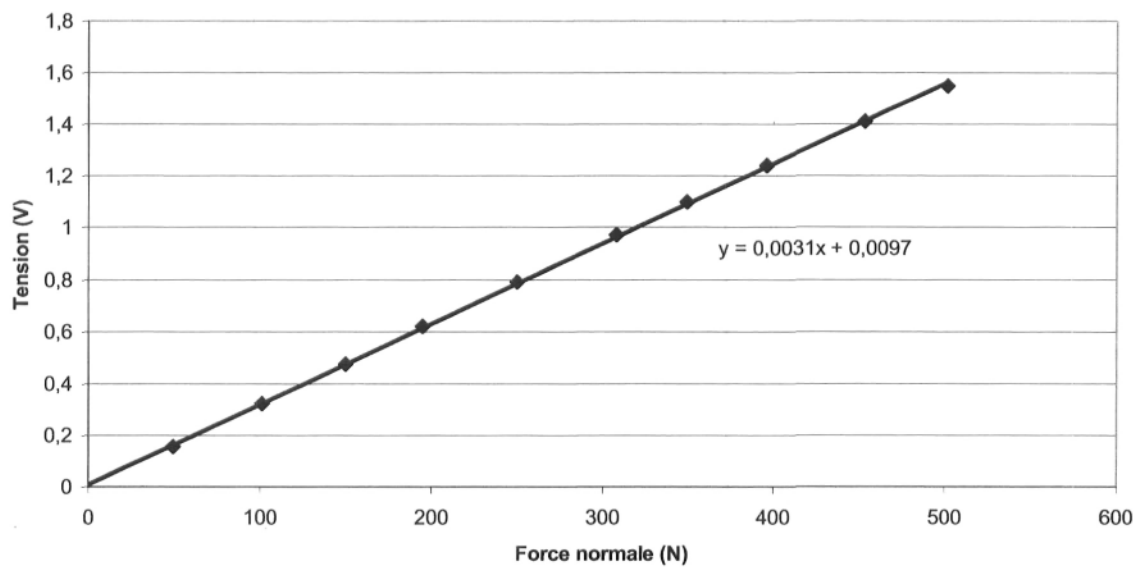
Série 2		
Tension Cellule (V)	Tension Plaque (V)	Force (N)
1,4544	1,5479	501,5172414
1,3142	1,411	453,1724138
1,1485	1,2415	396,0344828
1,0134	1,1001	349,4482759
0,8934	0,9734	308,0689655
0,725	0,7921	250
0,5655	0,6188	195
0,4354	0,477	150,137931
0,2943	0,3213	101,4827586
0,144	0,1575	49,65517241
-0,0019	0,0012	-0,655172414

Série 3		
Tension Cellule (V)	Tension Plaque (V)	Force (N)
0,001	0,0018	0,344827586
0,7235	0,778	249,4827586
0,4476	0,4884	154,3448276
1,312	1,3978	452,4137931
0,6071	0,6627	209,3448276
0,1468	0,1586	50,62068966
1,0246	1,0958	353,3103448
0,2758	0,2999	95,10344828
1,1646	1,2412	401,5862069
1,4524	1,5422	500,8275862
0,8878	0,9628	306,137931

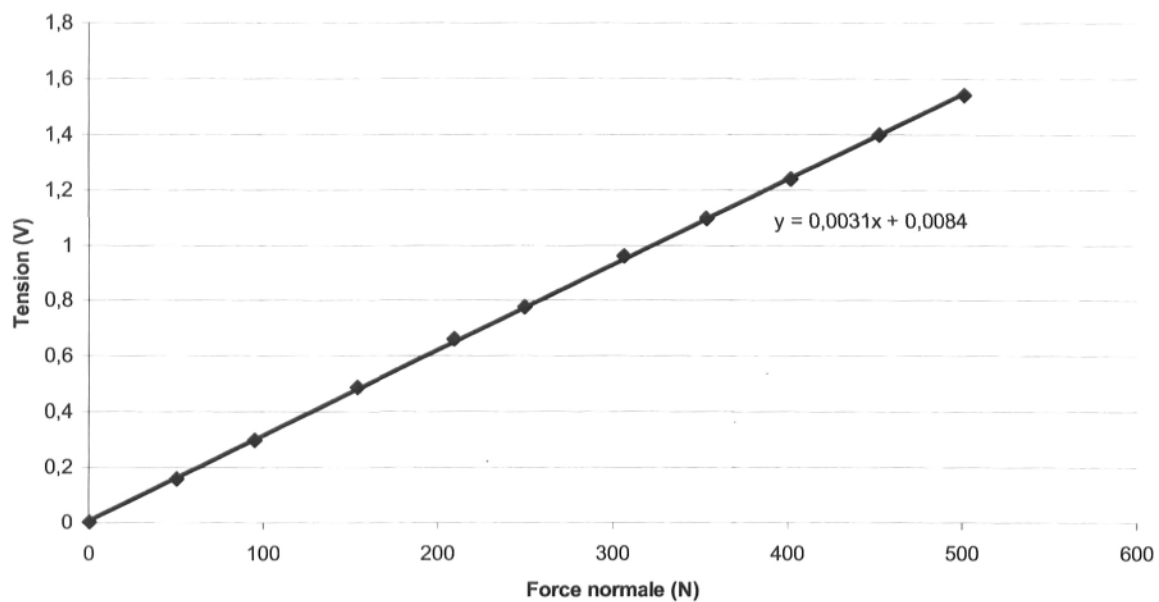
Calibration du montage FA  
Série ascendante

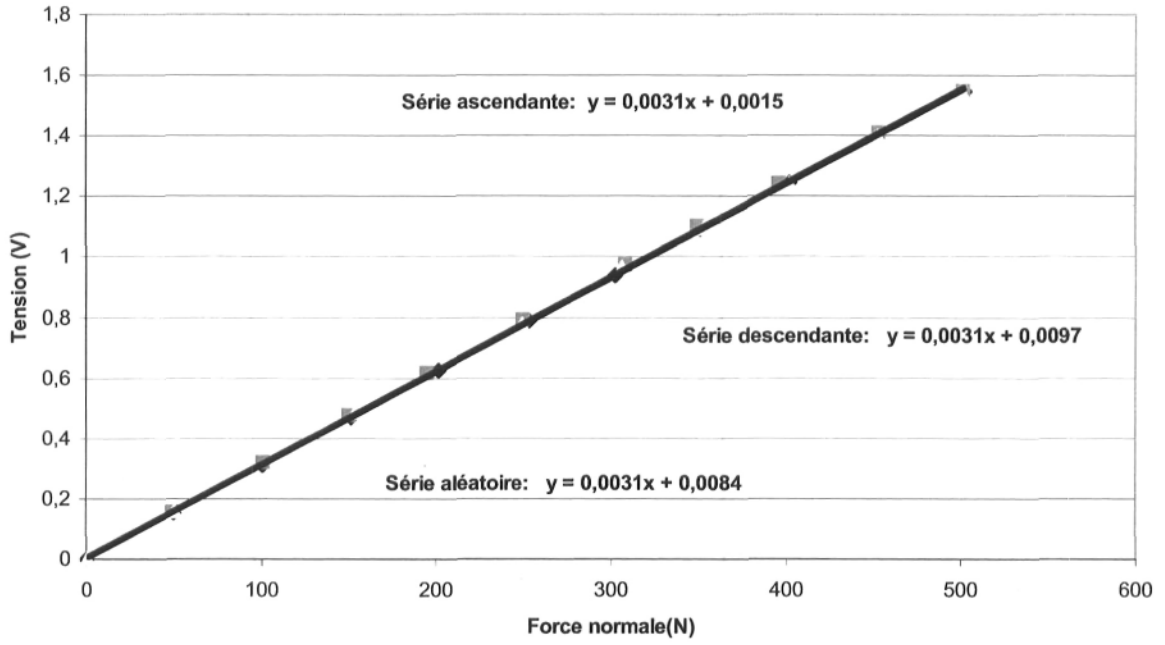


Calibration du montage FA  
Série descendante

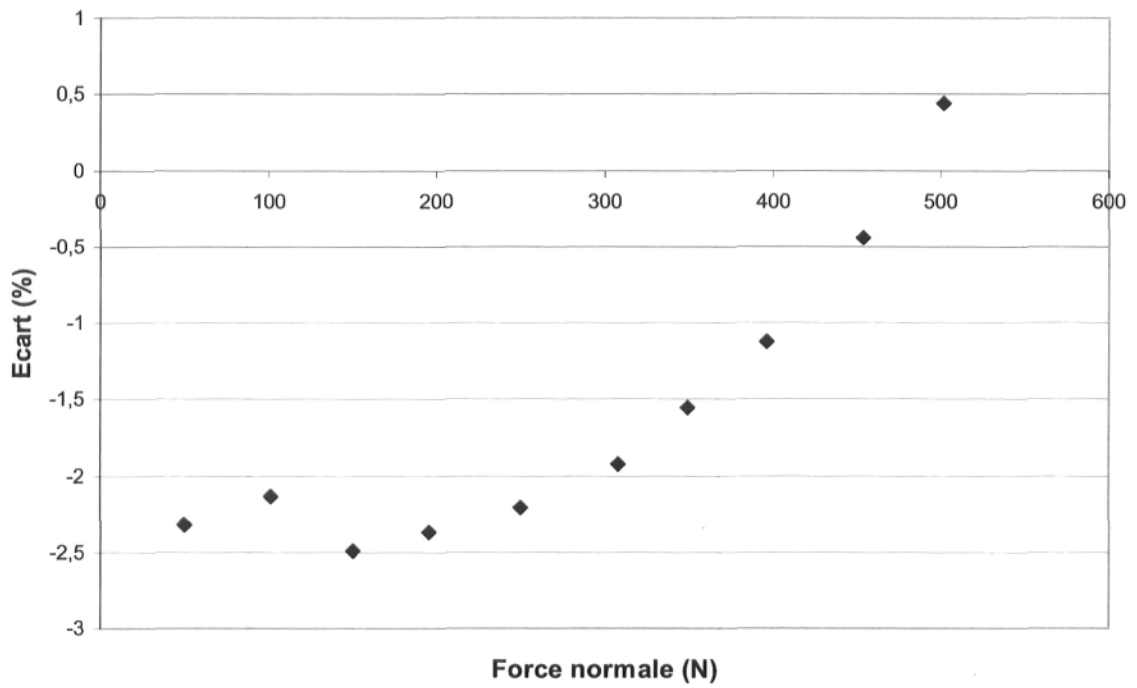


Calibration du montage FA  
Série aléatoire





**Écart par rapport à la courbe de tendance de la série descendante tronquée de l'ordonnée à l'origine**



### *Annexe 6*

Résultats de l'étalonnage du montage AE avec la cellule de charge CC-1000

## Calibration du montage AE

Utilisation de la Cellule de Charge CC-1000

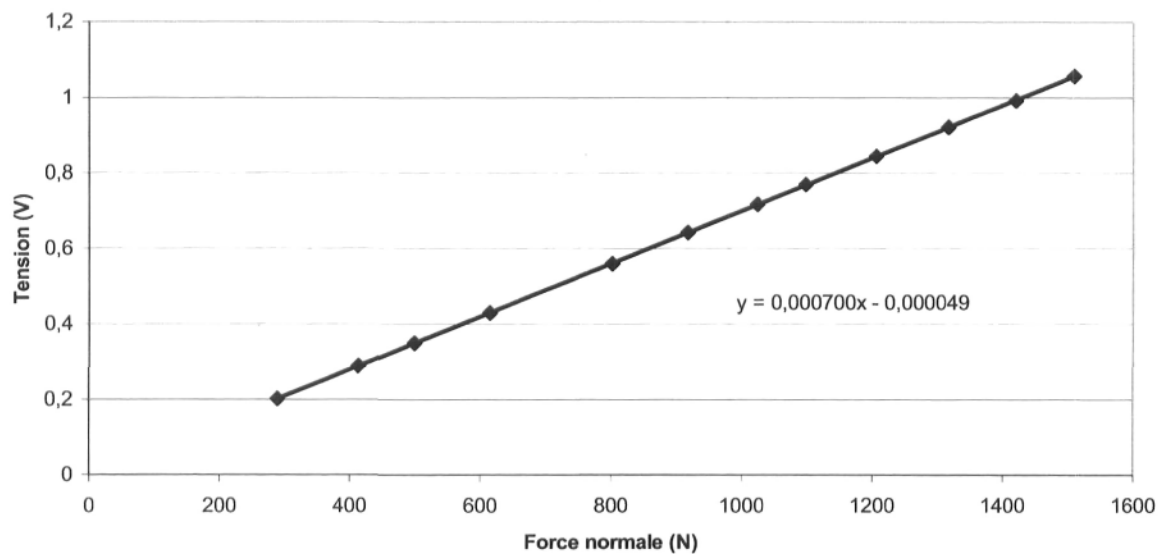
<b>Série 1</b>		
<b><i>Tension Cellule (V)</i></b>	<b><i>Tension Plaque (V)</i></b>	<b><i>Force (N)</i></b>
0,2894	0,2026	289,4
0,4127	0,2891	412,7
0,4998	0,3494	499,8
0,6145	0,4303	614,5
0,8021	0,5611	802,1
0,9166	0,6413	916,6
1,024	0,7166	1024
1,098	0,7689	1098
1,2059	0,8438	1205,9
1,3168	0,9221	1316,8
1,42	0,9936	1420
1,5101	1,057	1510,1

<b>Série 2</b>		
<b><i>Tension Cellule (V)</i></b>	<b><i>Tension Plaque (V)</i></b>	<b><i>Force (N)</i></b>
1,499	1,0497	1499
1,4153	0,9903	1415,3
1,3021	0,9116	1302,1
1,2135	0,8491	1213,5
1,1102	0,7777	1110,2
1,0113	0,7072	1011,3
0,9028	0,6318	902,8
0,8056	0,5637	805,6
0,6989	0,4894	698,9
0,6001	0,4201	600,1
0,5012	0,3506	501,2
0,3929	0,2752	392,9
0,3011	0,2107	301,1

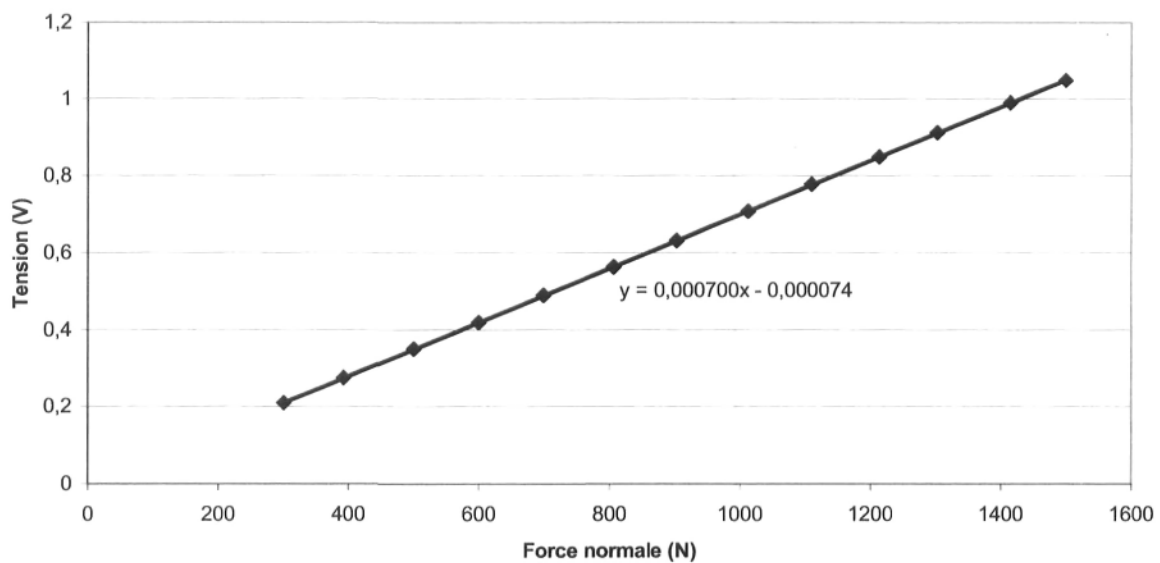
<b>Série 3</b>		
<b><i>Tension Cellule (V)</i></b>	<b><i>Tension Plaque (V)</i></b>	<b><i>Force (N)</i></b>
0,8935	0,6255	893,5
1,2523	0,8765	1252,3
1,4727	1,0307	1472,7
0,7345	0,5143	734,5
0,5221	0,3655	522,1
0,2851	0,1994	285,1
1,0252	0,7175	1025,2



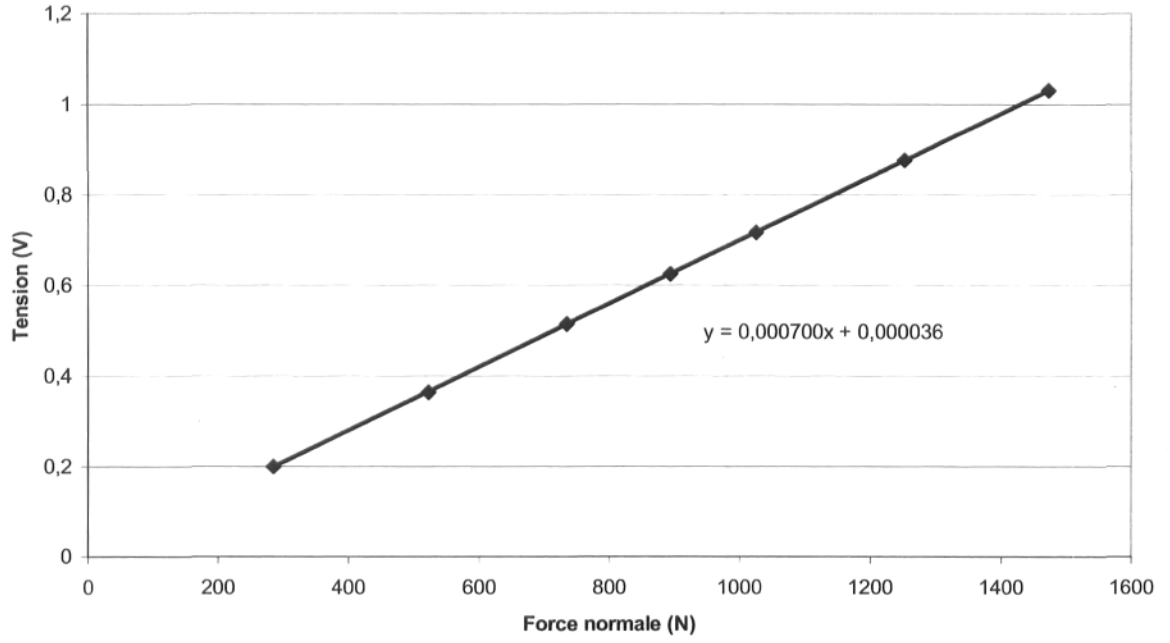
Calibration du montage AE (CC-1000)  
Série ascendante

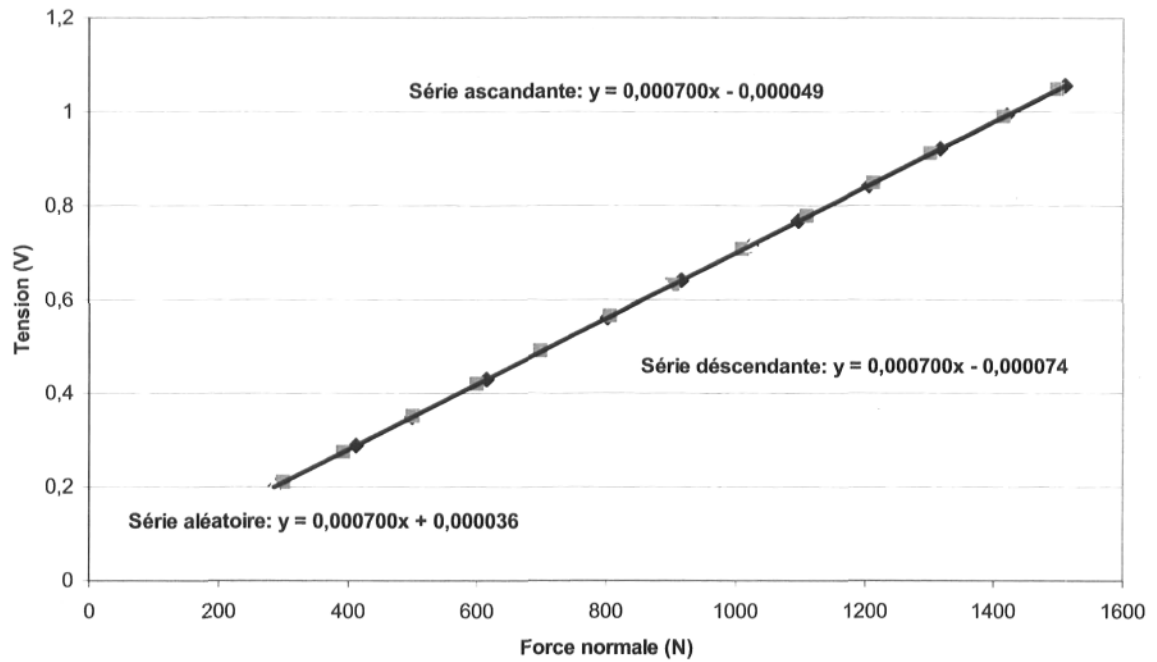


Calibration du montage AE (CC-1000)  
Série descendante

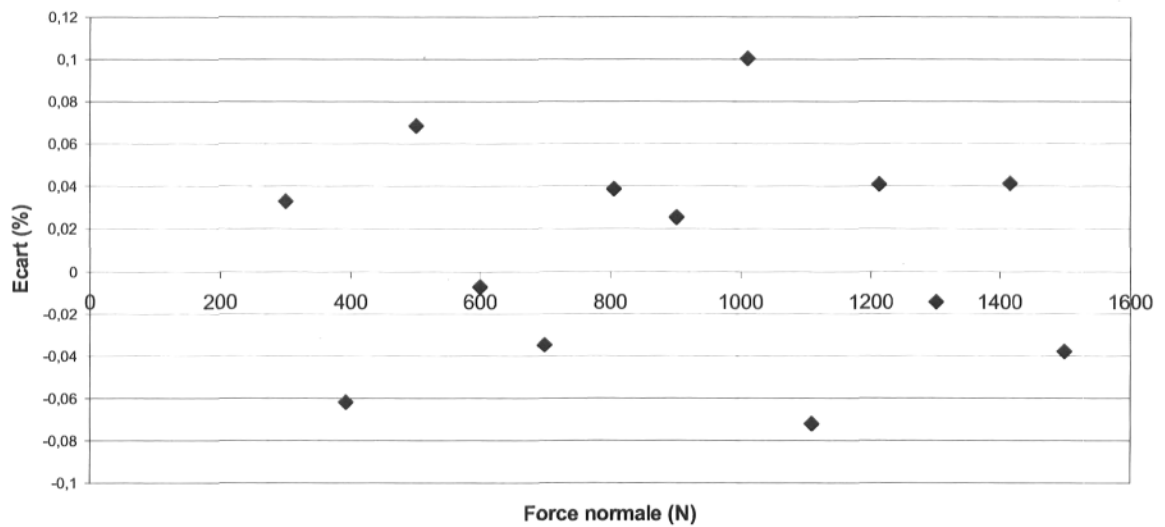


Calibration du montage AE (CC-1000)  
Série aléatoire





Écart par rapport à la courbe de tendance de la série descendante tronquée de l'ordonnée à l'origine



### *Annexe 7*

Résultats de l'étalonnage du montage AE avec la cellule de charge CC-100

## Calibration du montage AE

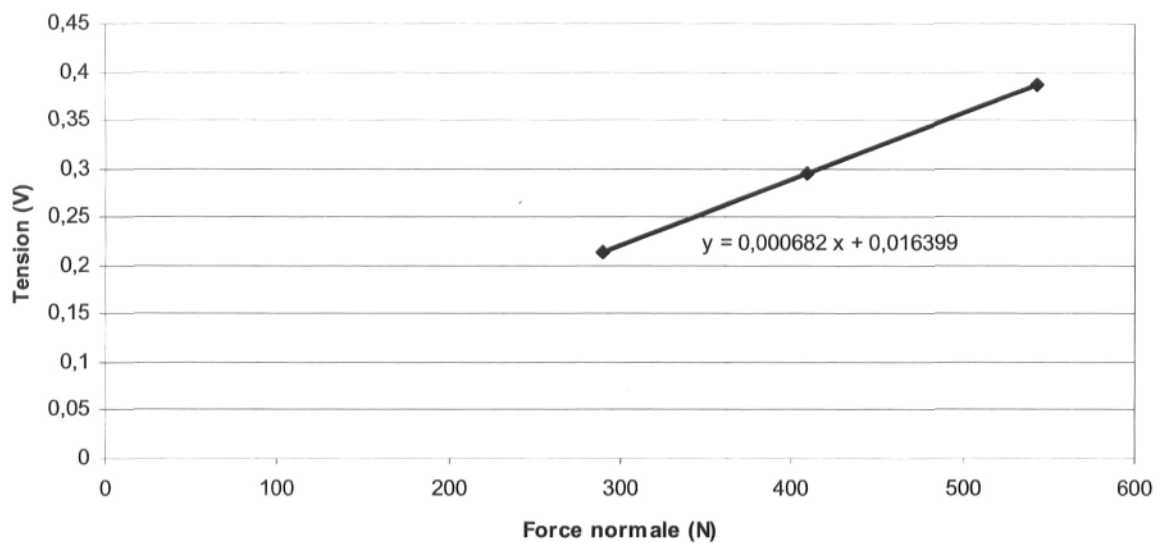
Utilisation de la Cellule de Charge CC-100

<b>Série 1</b>		
<b>Tension Cellule (V)</b>	<b>Tension Plaque (V)</b>	<b>Force (N)</b>
<b>0,8382</b>	0,2135	<b>289,0344828</b>
<b>1,1843</b>	0,2946	<b>408,3793103</b>
<b>1,5764</b>	0,387	<b>543,5862069</b>

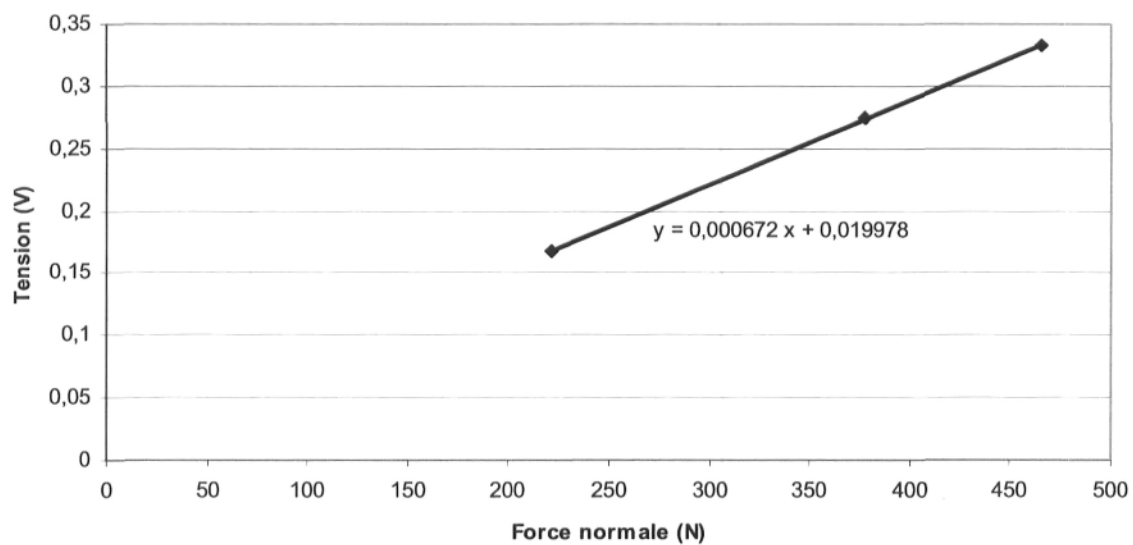
<b>Série 2</b>		
<b>Tension Cellule (V)</b>	<b>Tension Plaque (V)</b>	<b>Force (N)</b>
<b>1,3498</b>	0,3328	<b>465,4482759</b>
<b>1,095</b>	0,274	<b>377,5862069</b>
<b>0,6409</b>	0,1685	<b>221</b>

<b>Série 3</b>		
<b>Tension Cellule (V)</b>	<b>Tension Plaque (V)</b>	<b>Force (N)</b>
<b>0,8016</b>	0,2057	<b>276,4137931</b>
<b>1,6509</b>	0,4041	<b>569,2758621</b>
<b>0,9003</b>	0,2288	<b>310,4482759</b>

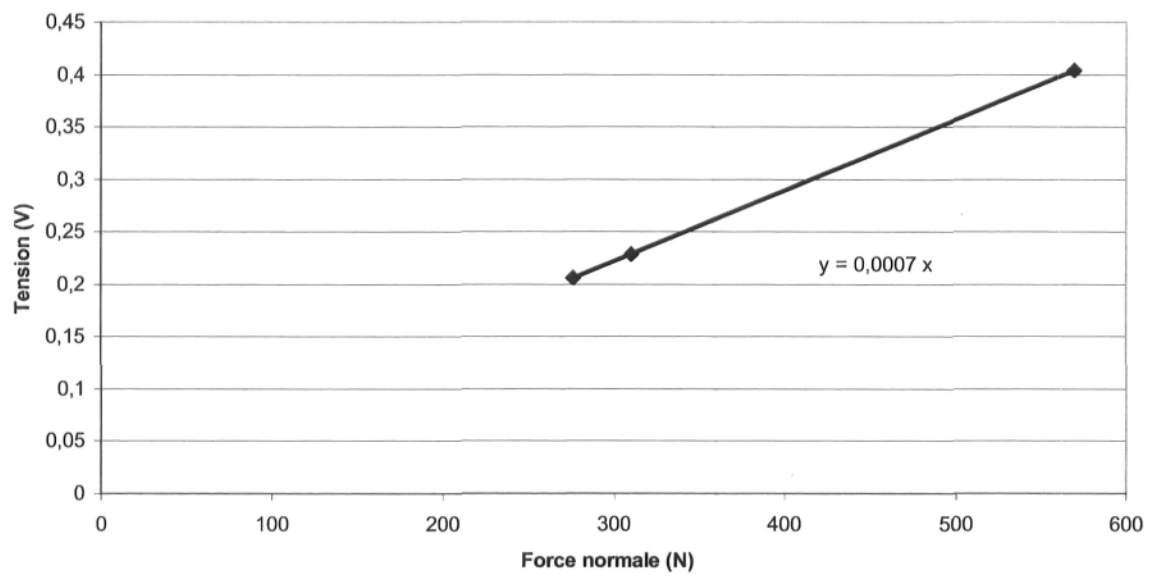
Calibration du montage AE (CC-100)  
Série ascendante



Calibration du montage AE (CC-100)  
Série descendante



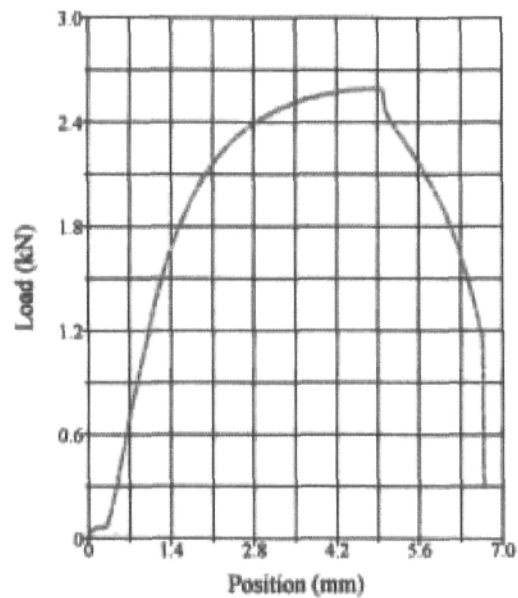
Calibration du montage AE (CC-100)  
Série aléatoire



## *Annexe 8*

Essais de traction effectués sur les fils d'aluminium





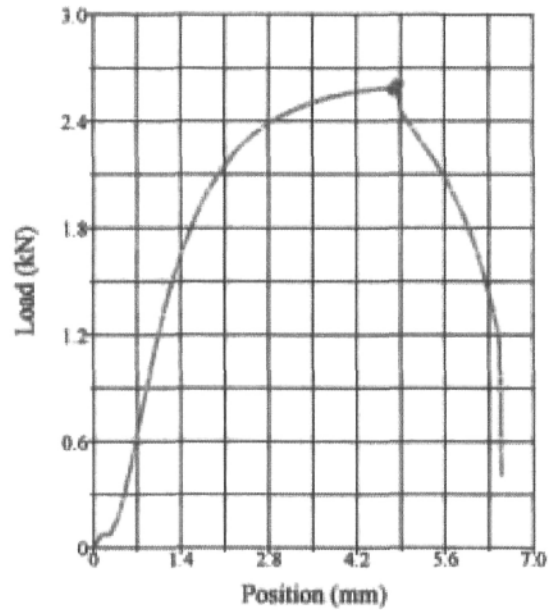
**Test Results**  
 Area: **14.2130** mm<sup>2</sup>  
 Diameter: **4.2540** mm  
 Peak Load: **2.5889** kN

**Test Summary**

Counter: **1852**  
 Elapsed Time: **00:01:40**  
 Procedure Name: **test**  
 Start Date: **04-05-31**  
 Start Time: **09:48:30**  
 End Date: **04-05-31**  
 End Time: **09:50:10**  
 Workstation: **U. Laval**  
 Tested By: **Guy**  
 Identification: **2**  
 Utilisateur: **GMC**

Calcul  $S_{ut}$  :

$$S_{ut} = \frac{P_{\max}}{Aire} = \frac{2588.9N}{14.2130mm^2} = 180MPa$$



**Test Results**  
 Area: **14.1662** mm<sup>2</sup>  
 Diameter: **4.2470** mm  
 Peak Load: **2.5844** kN

#### Test Summary

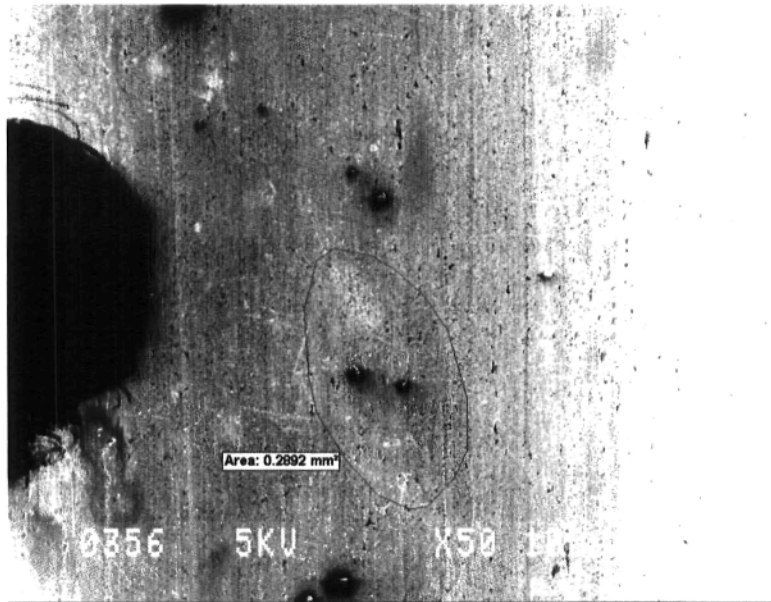
Counter: **1851**  
 Elapsed Time: **00:01:37**  
 Procedure Name: **test**  
 Start Date: **04-05-31**  
 Start Time: **09:36:04**  
 End Date: **04-05-31**  
 End Time: **09:37:41**  
 Workstation: **U. Laval**  
 Tested By: **Guy**  
 Identification: **1**  
 Utilisateur: **GMC**

Calcul  $S_{ut}$  :

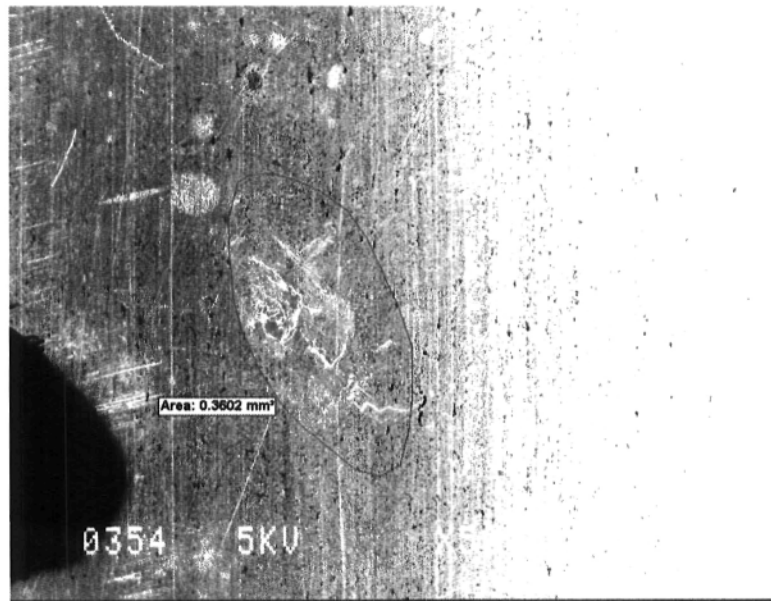
$$S_{ut} = \frac{P_{\max}}{Aire} = \frac{2584.4N}{14.1662mm^2} = 182.4MPa$$

### *Annexe 9*

Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 60 degrés



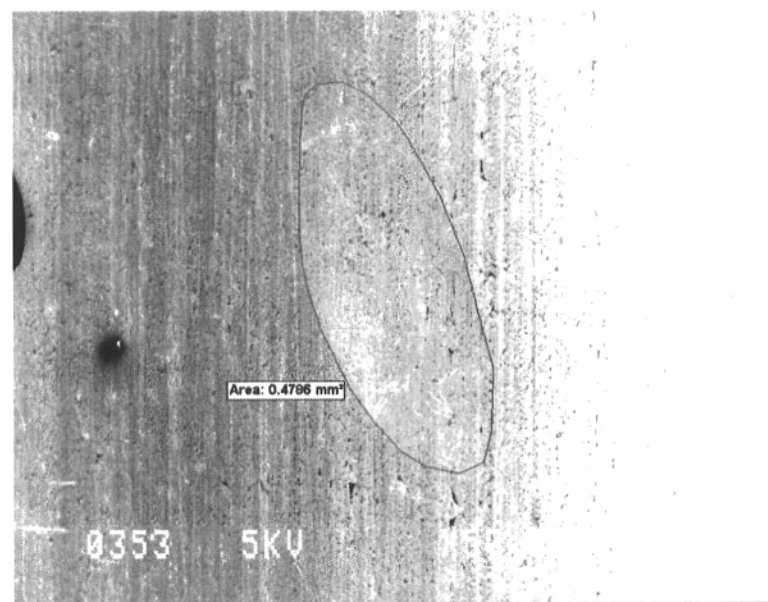
*Photo b3*



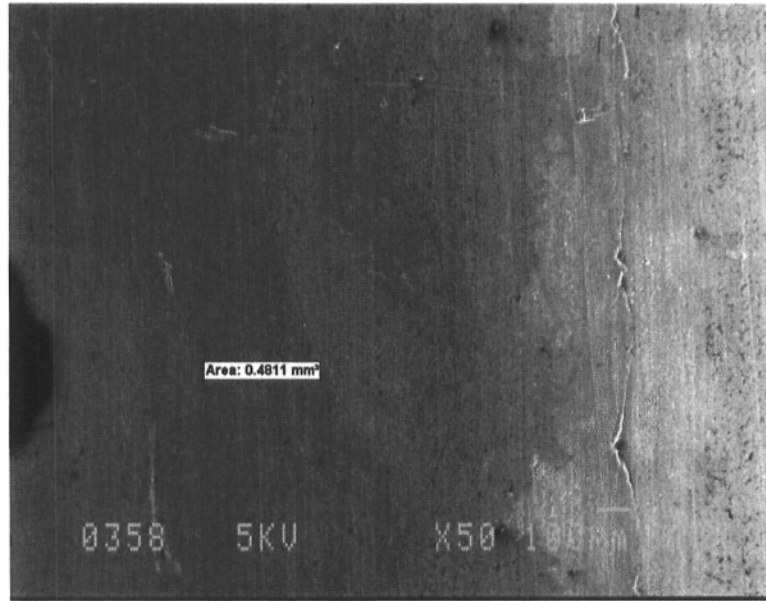
*Photo b5*



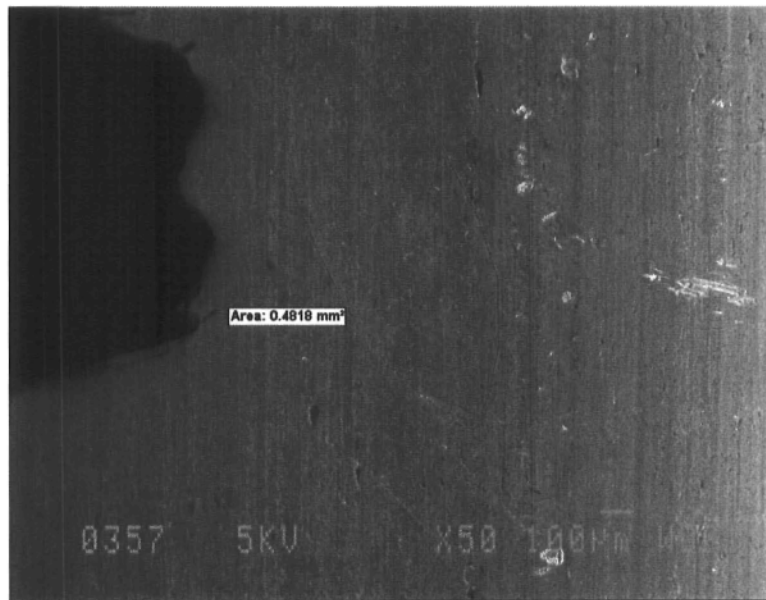
*Photo b7*



*Photo b8*



*Photo b9*



*Photo b10*



*Photo b11*

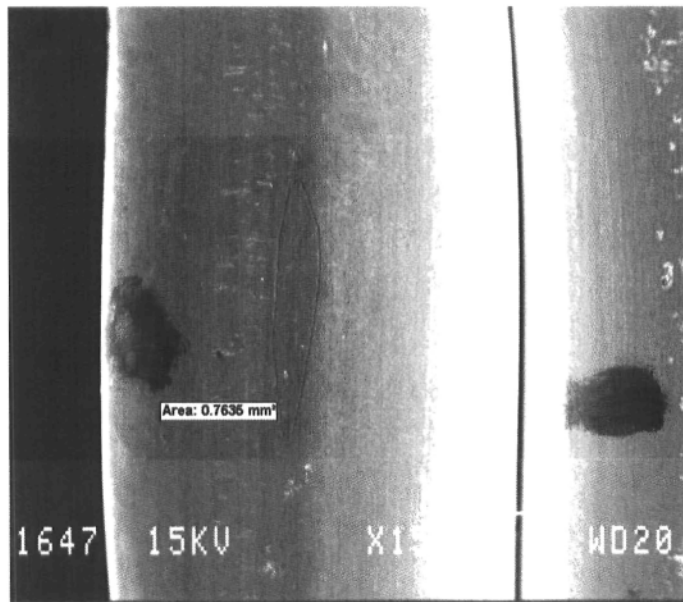


*Photo b14*

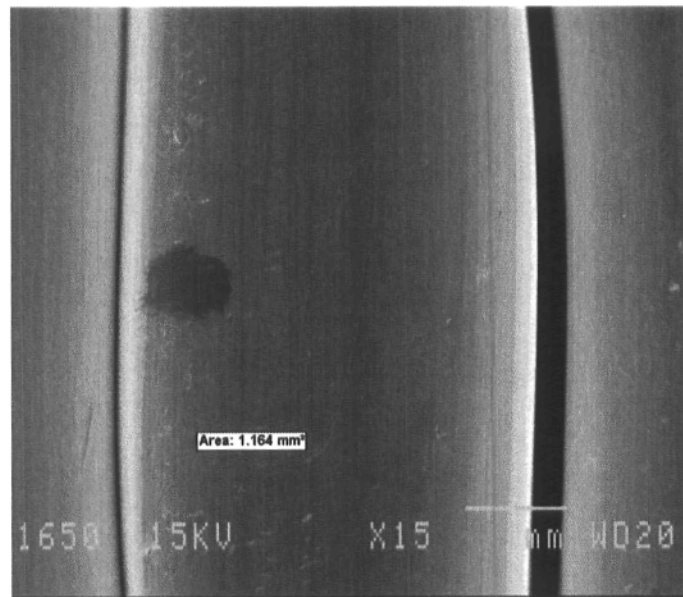
*Annexe 10*

Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 30 degrés

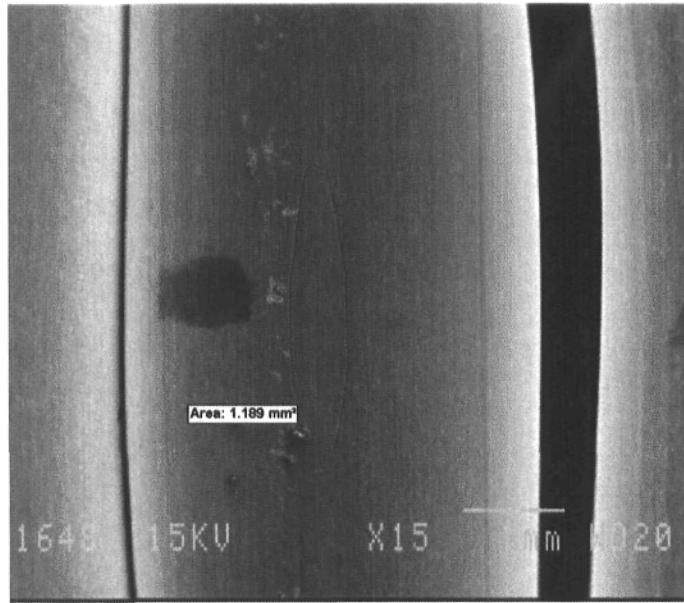




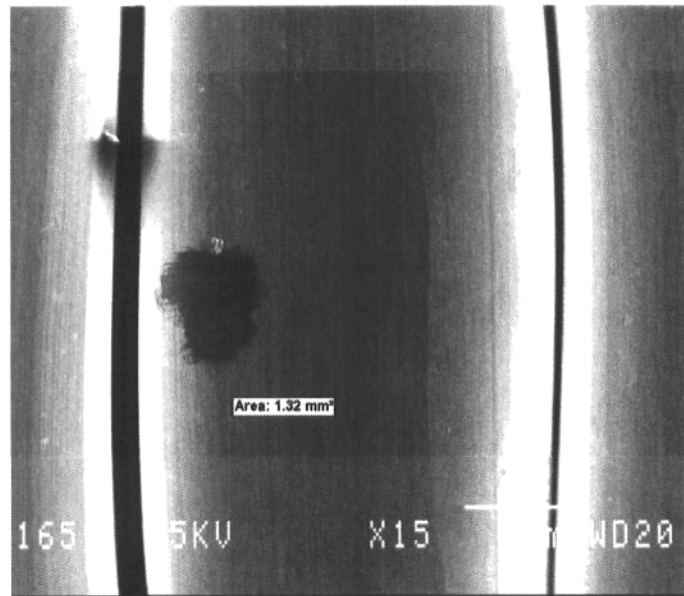
*Photo b21*



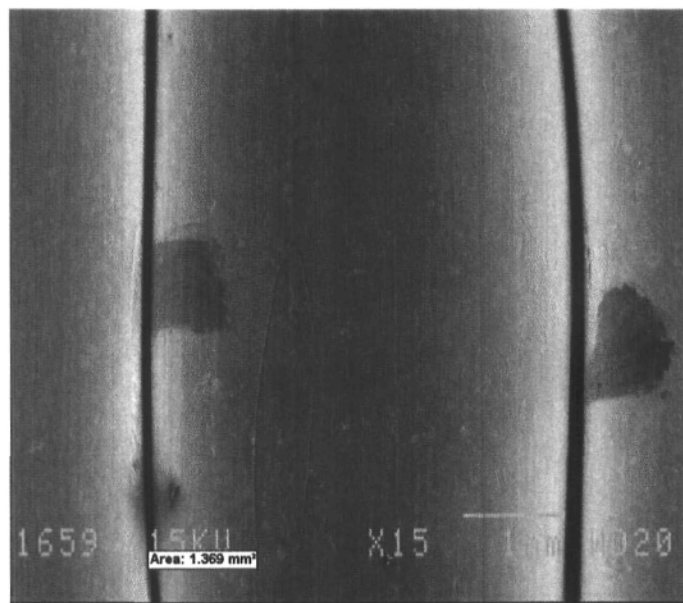
*Photo b23*



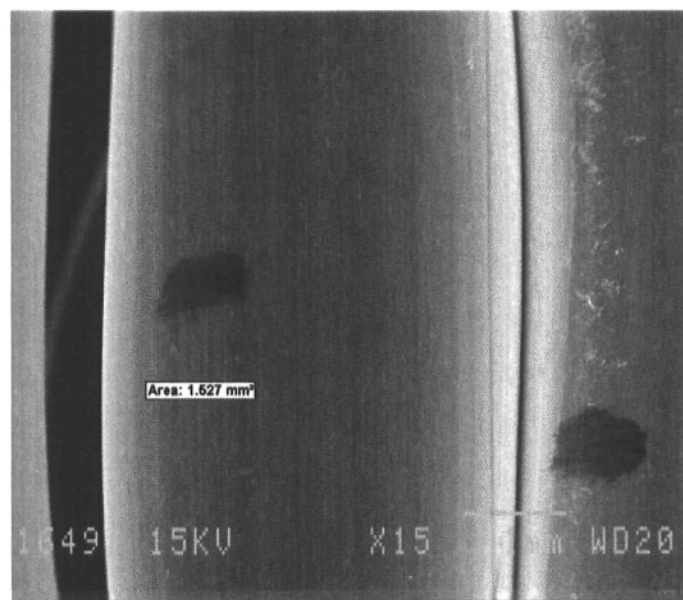
*Photo b24*



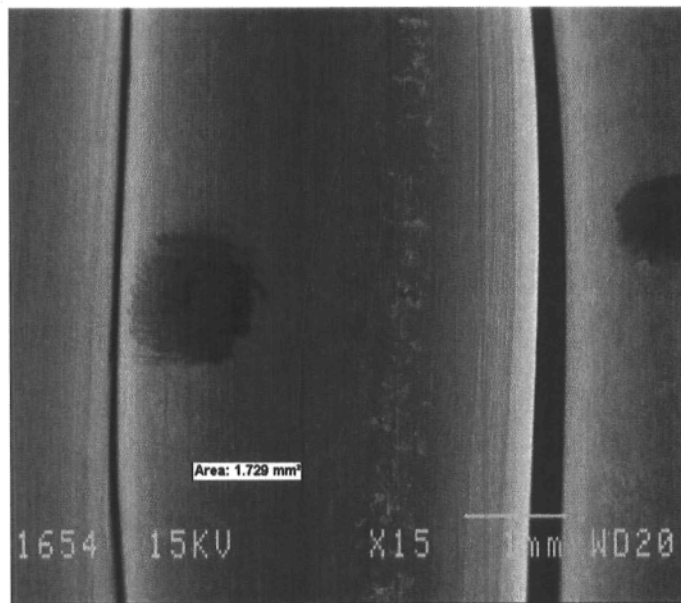
*Photo b25*



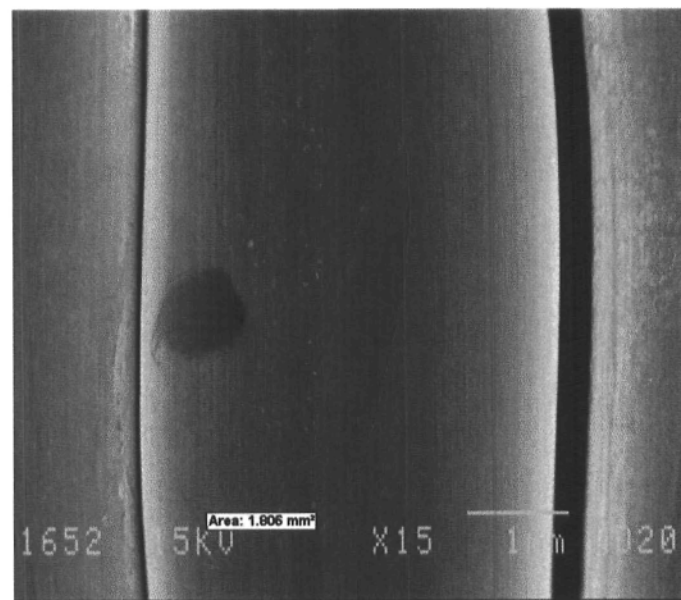
*Photo b26*



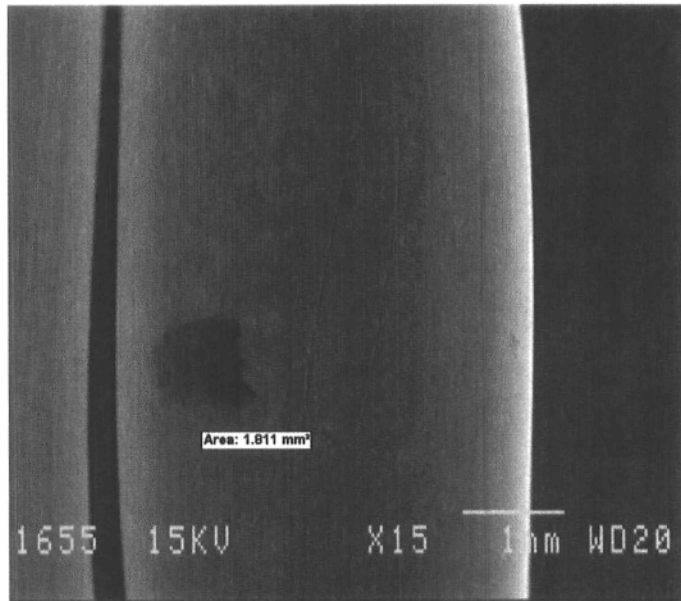
*Photo b27*



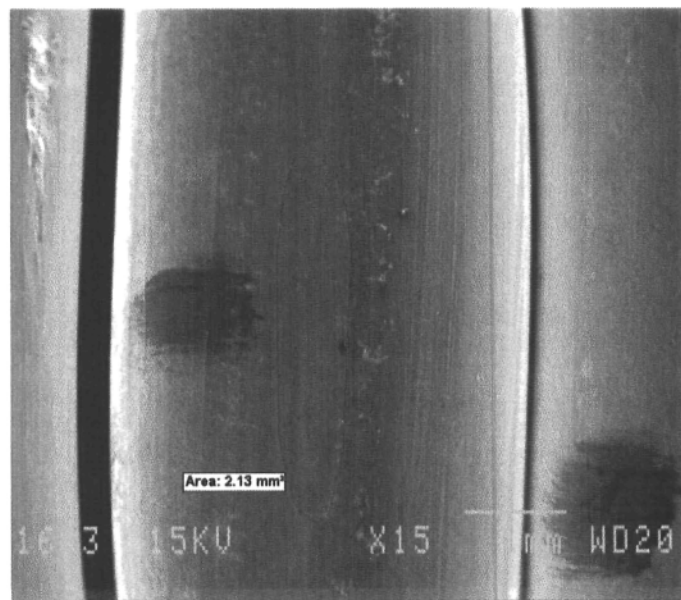
*Photo b29*



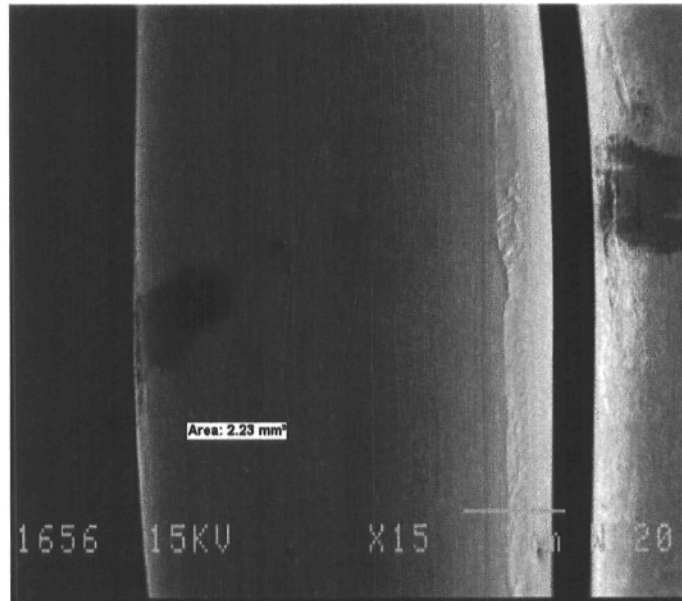
*Photo b31*



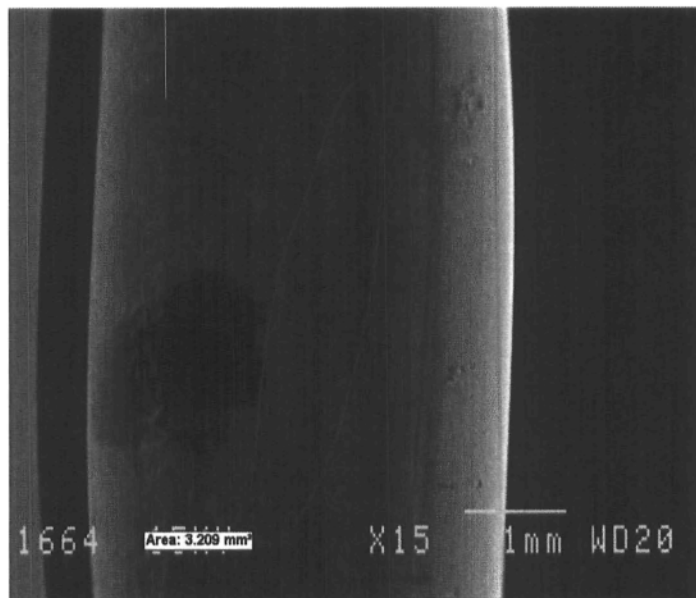
*Photo b32*



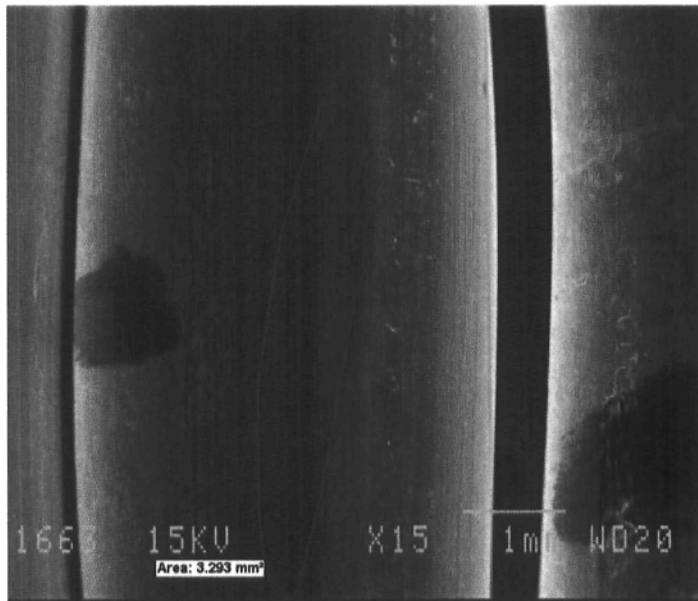
*Photo b33*



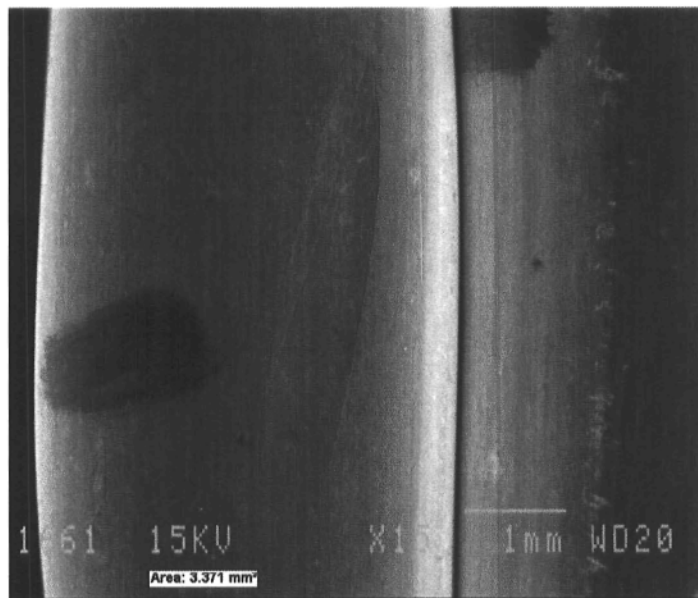
*Photo b34*



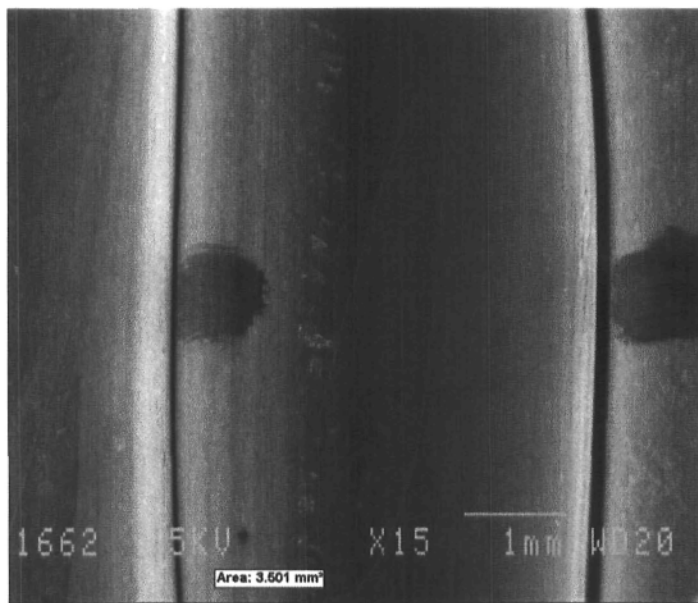
*Photo b39*



*Photo b40*



*Photo b41*

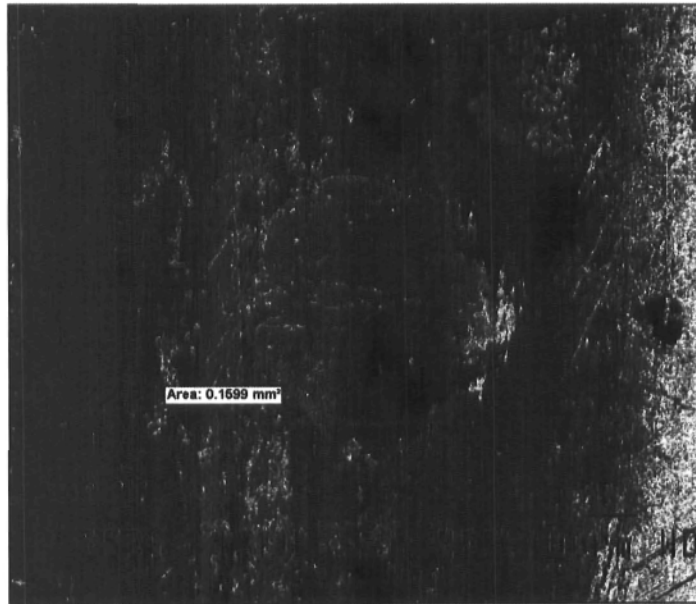


*Photo b42*

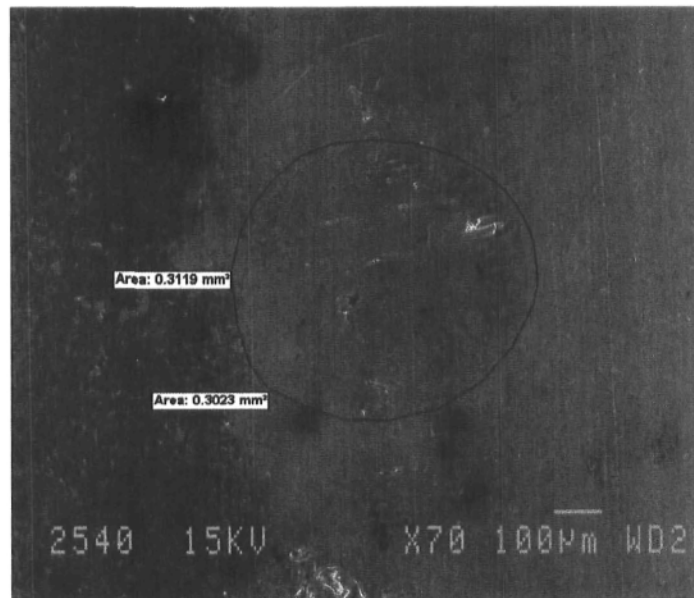


*Annexe 11*

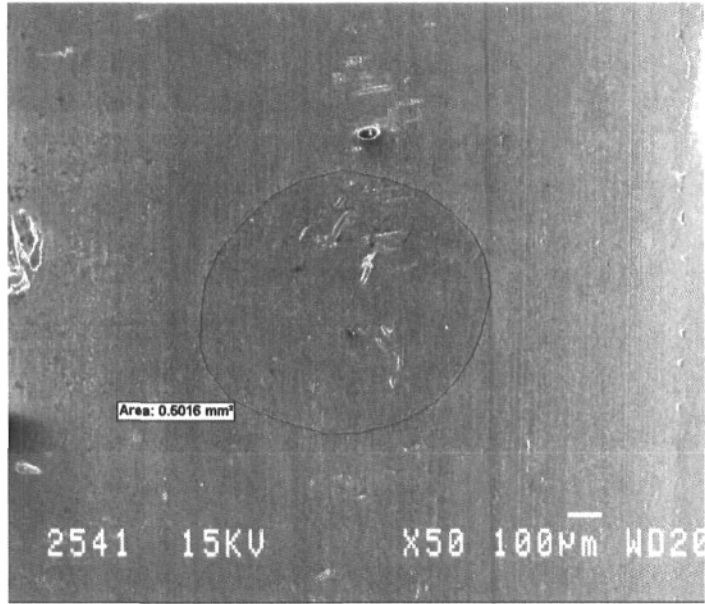
Photos des essais pour un contact selon un angle d'intersection de 90 degrés



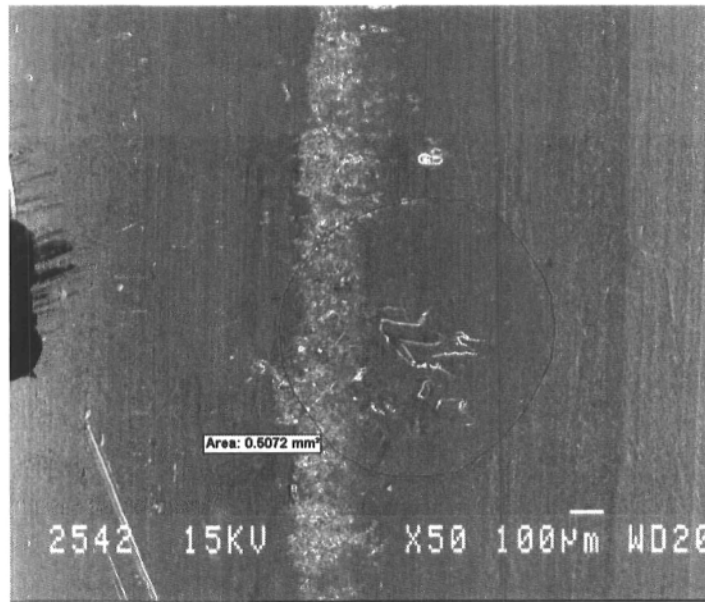
*Photo 1M*



*Photo 3M*



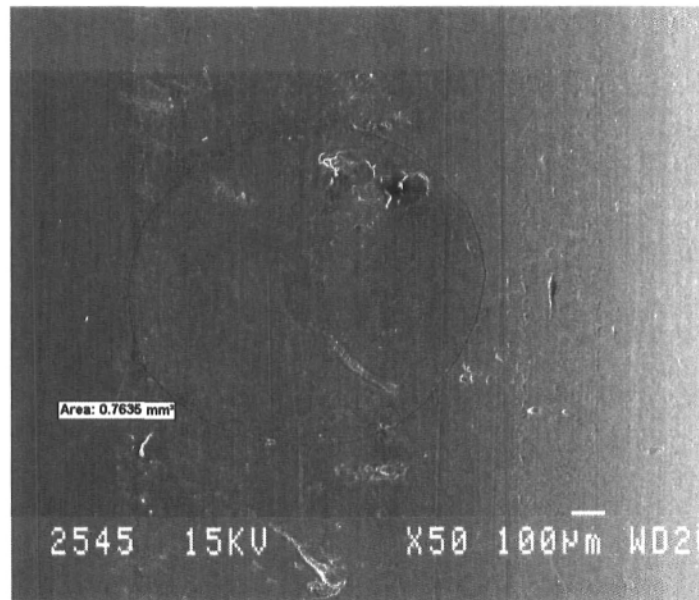
*Photo 4F*



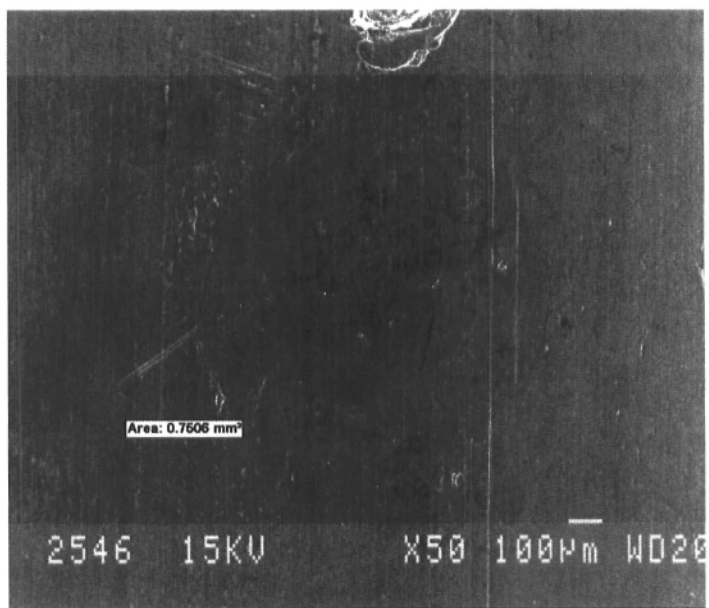
*Photo 4M*



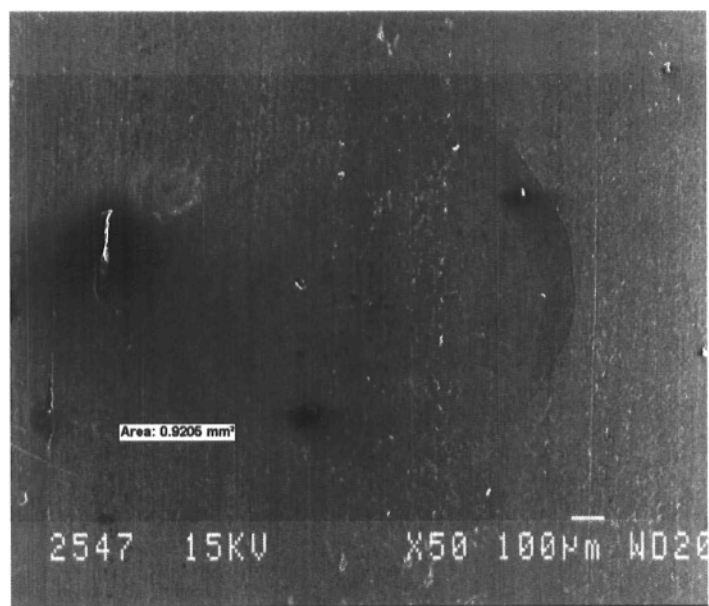
*Photo 5M*



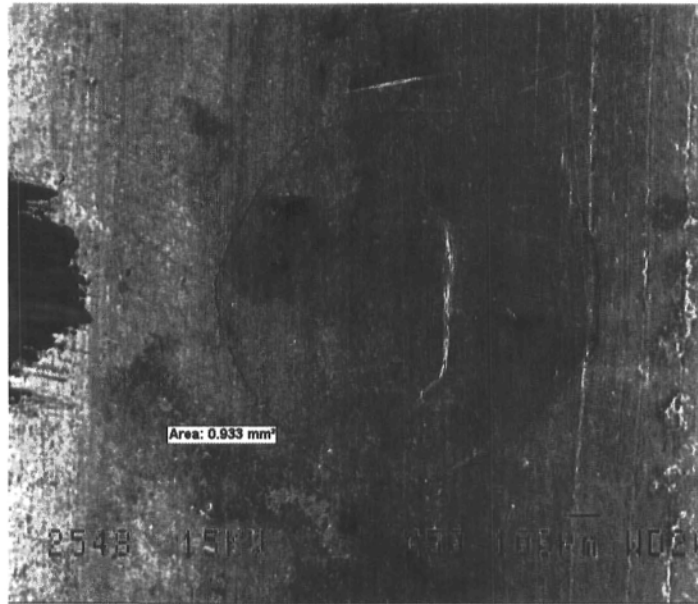
*Photo 6F*



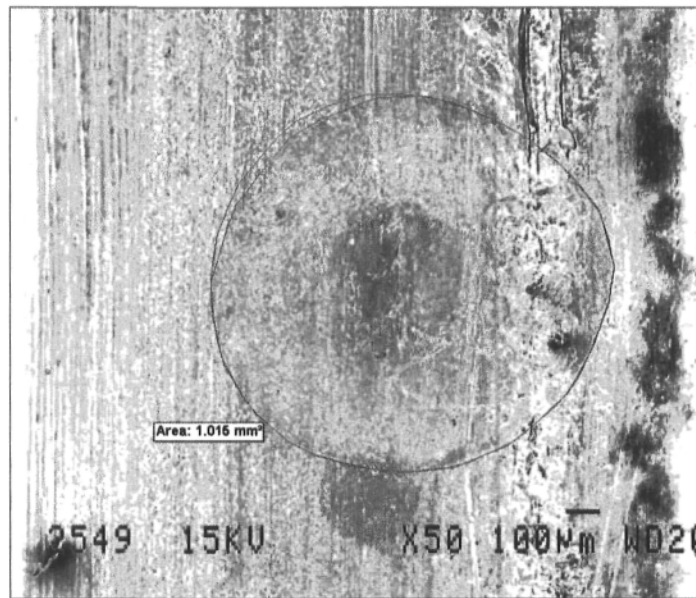
*Photo 6M*



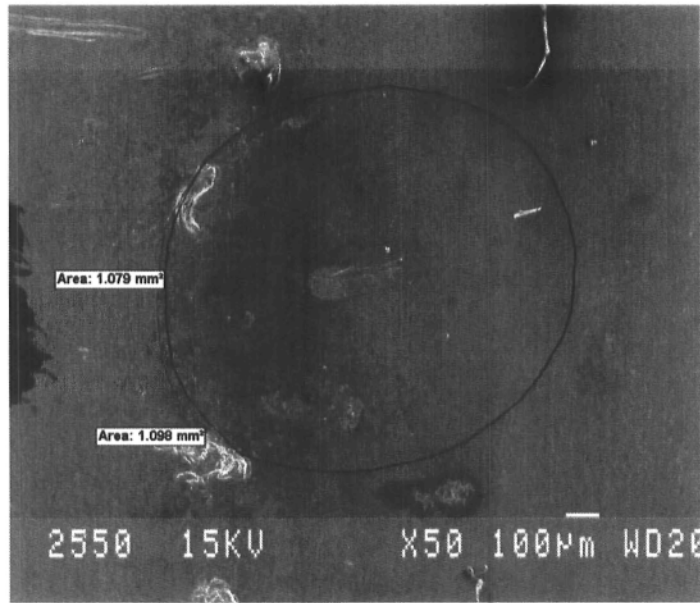
*Photo 7F*



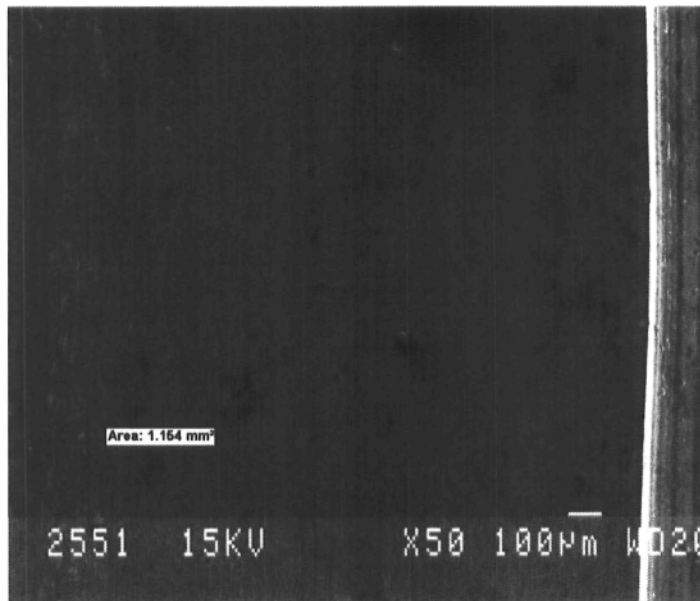
*Photo 7M*



*Photo 8F*



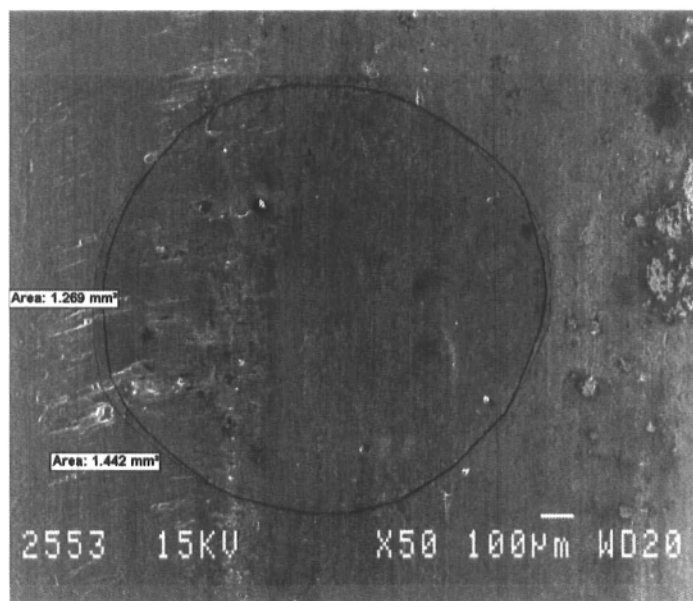
*Photo 8M*



*Photo 9F*

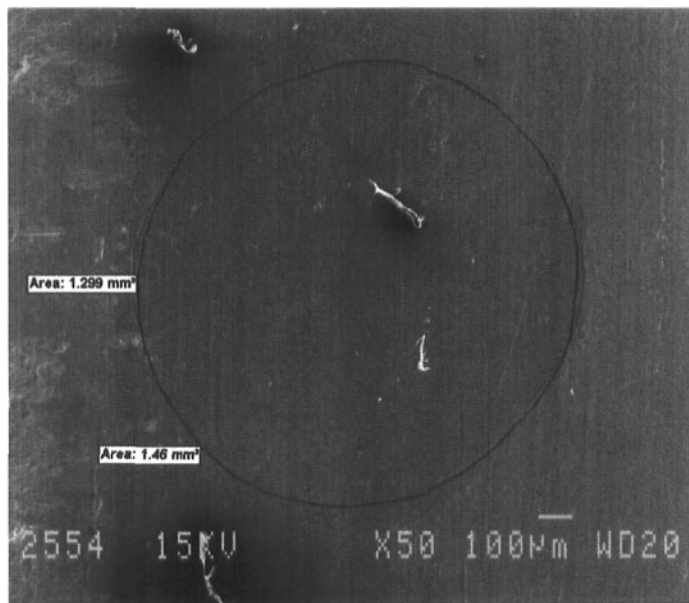


*Photo 9M*



*Photo 10F*

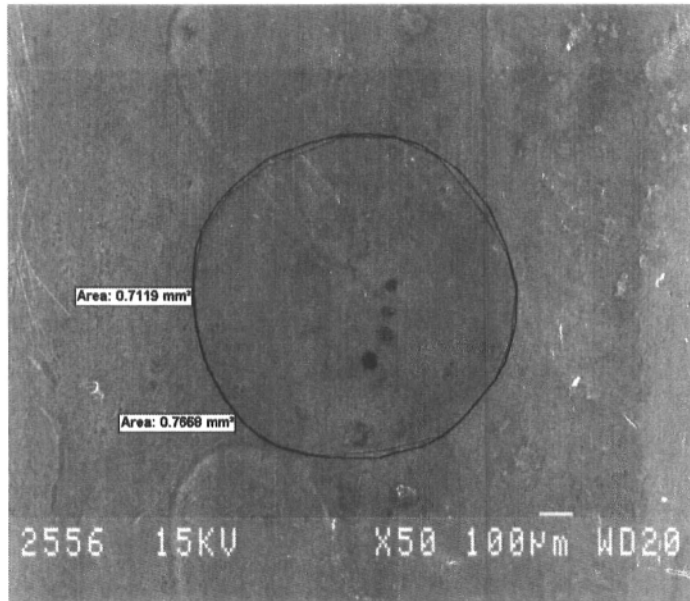




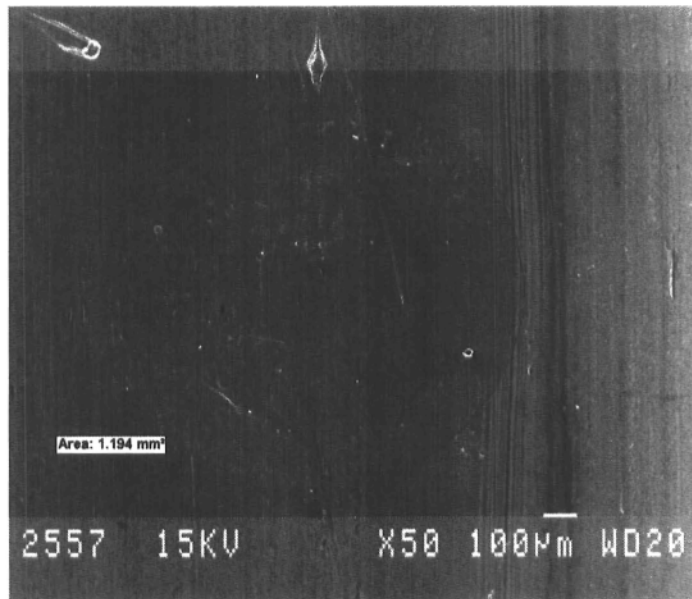
*Photo 10M*



*Photo 11F*



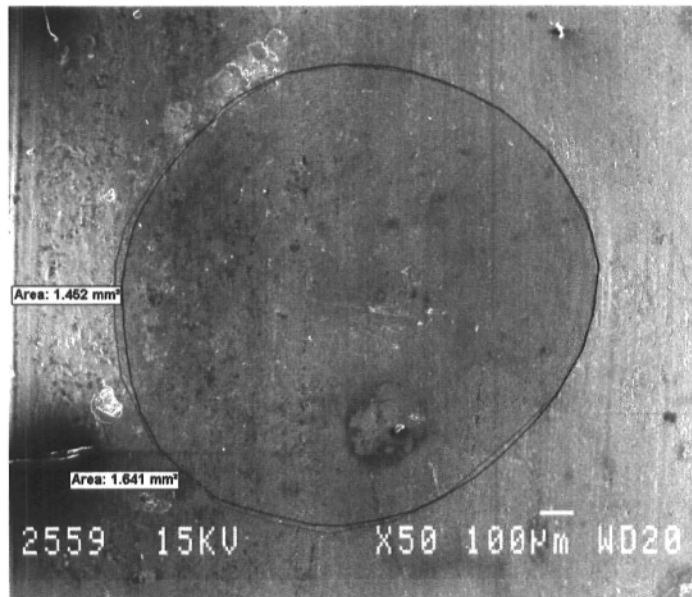
*Photo 11M*



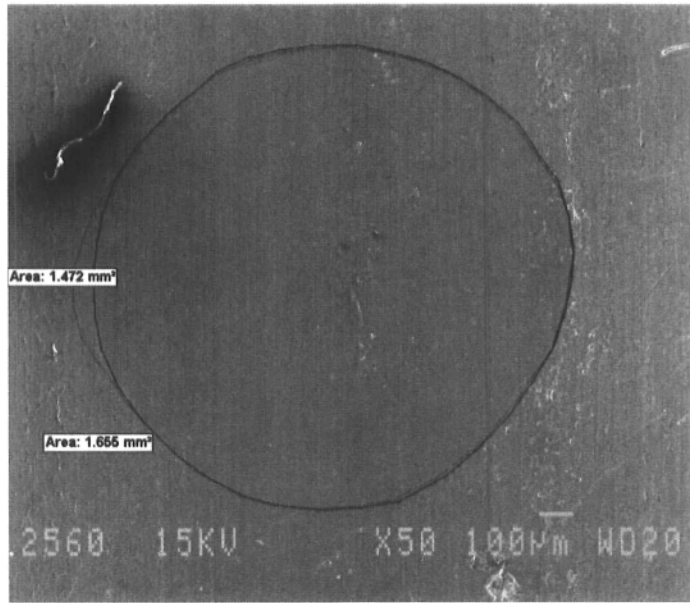
*Photo 12F*



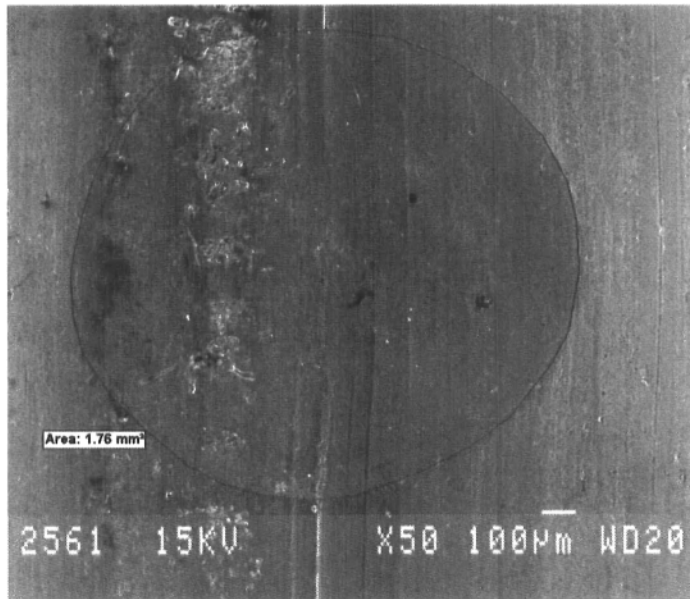
*Photo 12M*



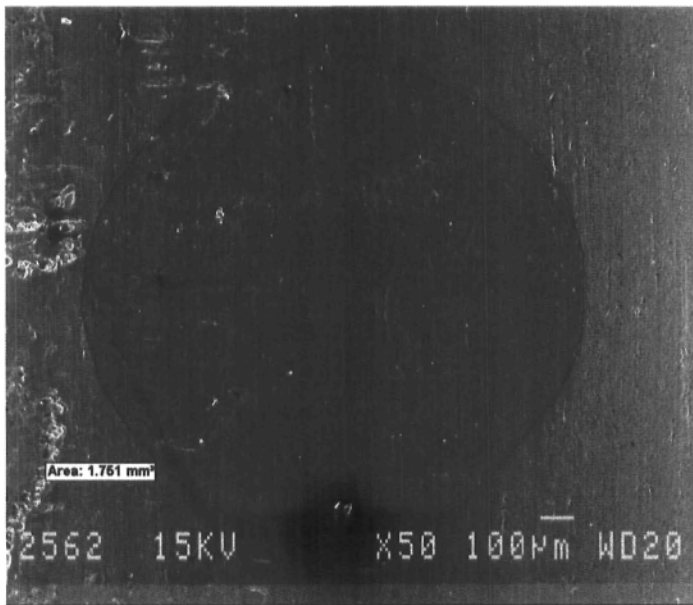
*Photo 13F*



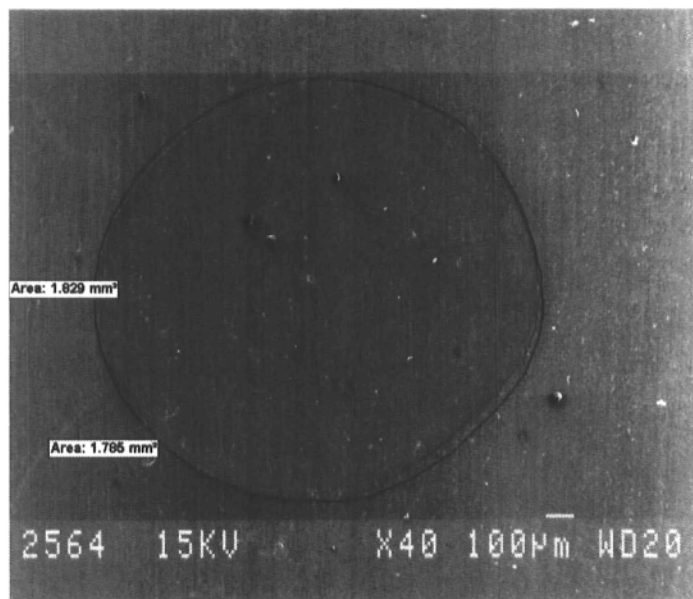
*Photo 13M*



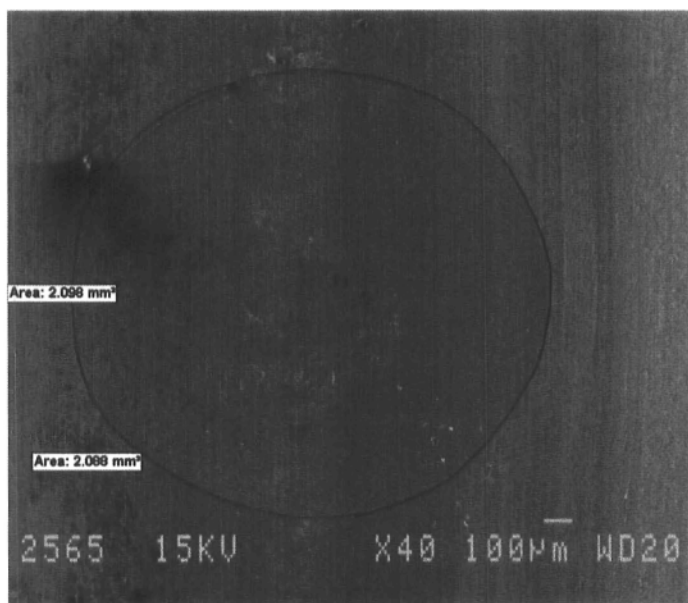
*Photo 14F*



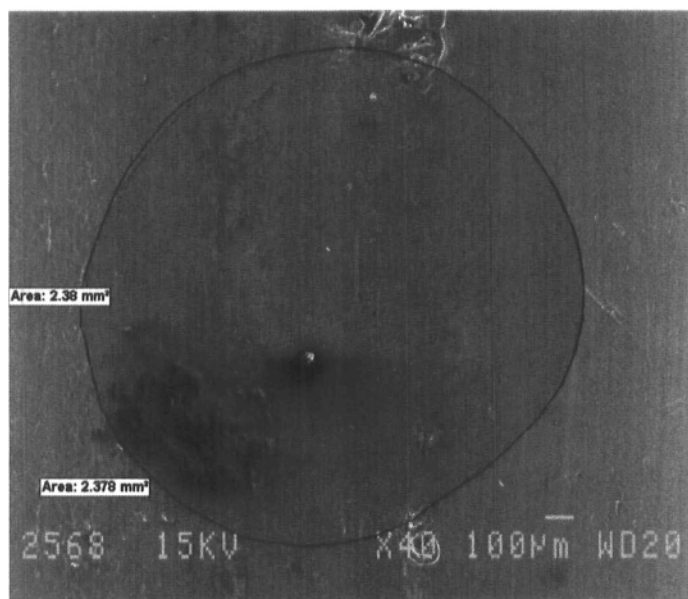
*Photo 14M*



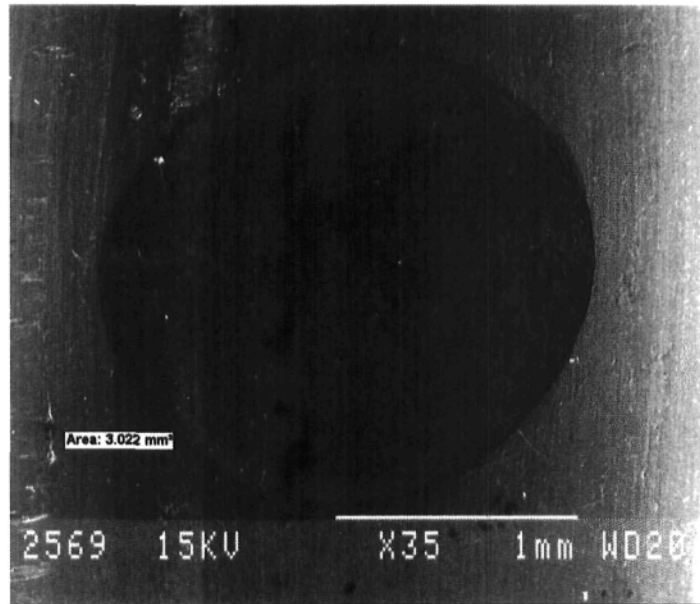
*Photo 15M*



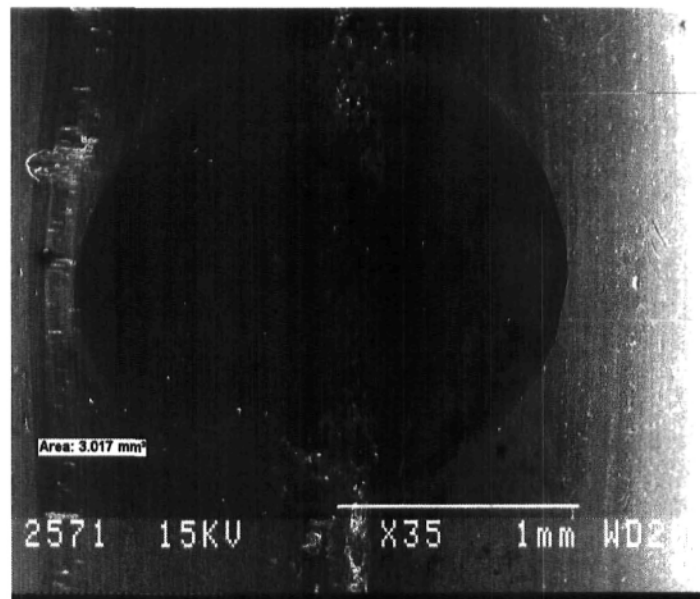
*Photo 16F*



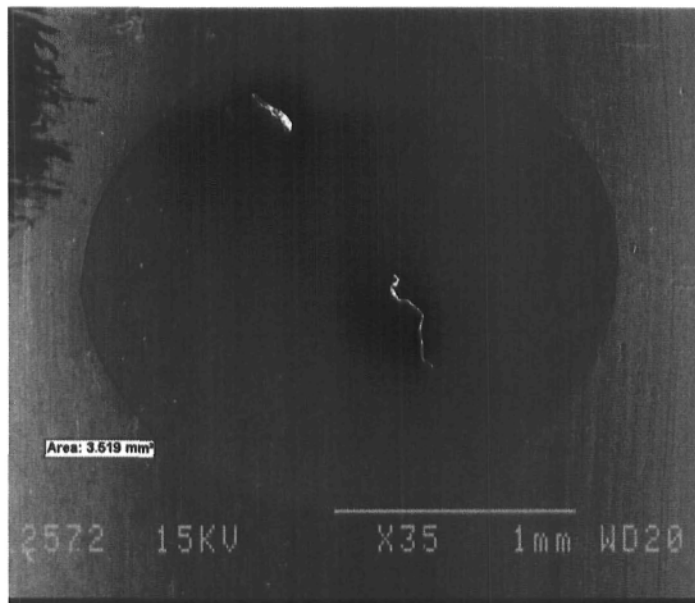
*Photo 17M*



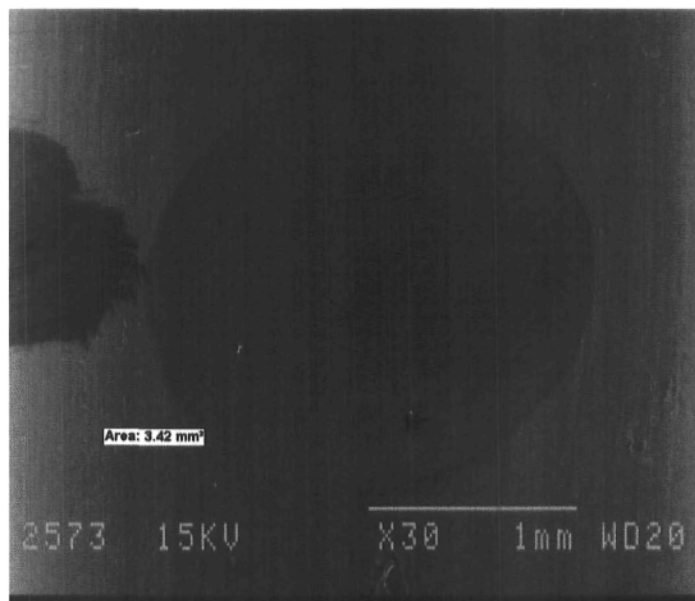
*Photo 18F*



*Photo 18M*

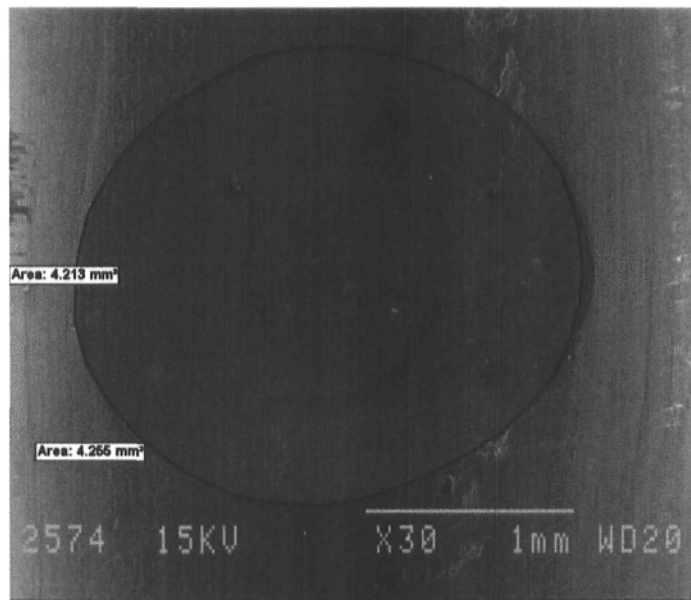


*Photo 19F*

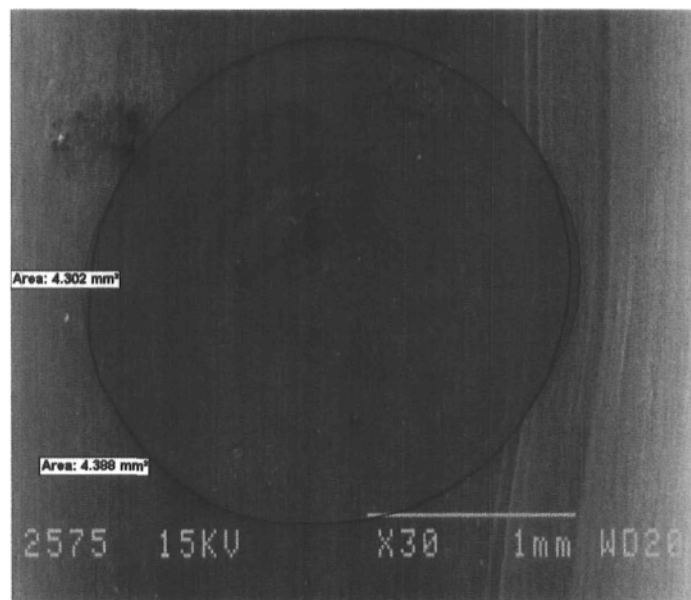


*Photo 19M*





*Photo 20F*



*Photo 20M*