

50376  
1993  
79

x 50376  
1993  
79

Numéro d'ordre 1038

# THESE

présentée à

L'Université des Sciences et Technologies de Lille

pour obtenir le grade de

Docteur en Mécanique  
par

Yaya KONATE

ETUDE DU COMPORTEMENT DE FILMS D'ADHESIF :  
APPLICATION AUX CAPTEURS A JAUGES DE DEFORMATION



Soutenue le 20 janvier 1993 devant la commission d'examen :

Président : M. PARSY  
Rapporteurs : M. FREMIOT  
M. GILLIBERT

Examineurs : Mlle ROBIN  
M. OUDIN  
M. CAIGNAERT  
M. HARIRI  
M. VERWAERDE

SCD LILLE 1



D 030 301875 0

Ce travail a été réalisé au laboratoire de calcul des structures du département Matériaux de l'Ecole des Mines de Douai.

Je tiens à remercier ici :

- La direction de l'Ecole des Mines de Douai pour son support financier, scientifique et matériel.

- Monsieur S. HARIRI, Responsable du laboratoire de calcul des structures, pour m'avoir orienté dans cette voie de recherche et m'y avoir considérablement aidé. Qu'il soit assuré de ma profonde gratitude.

- Monsieur F. PARSY, Professeur à l'Université des Sciences et Technologies de Lille, qui a dirigé de près ce travail et qui a bien voulu présider ce jury. Je le remercie pour le temps et l'énergie qu'il a bien voulu y consacrer.

- Monsieur M. FREMIOT, Professeur des Ecoles des Mines et Adjoint à la direction des Recherches de l'Ecole des Mines pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail.

- Monsieur A. DE METS, chef du Département Génie Civil de l'Ecole des Mines de Douai et Monsieur VERWAERDE pour leurs précieux conseils.

Je tiens tout particulièrement à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance à :

- Monsieur Y. GILBERT pour ses conseils éclairés et pour la marque d'intérêt qu'il a bien voulu manifester à l'égard de ce travail.

- Mademoiselle le Professeur ROBIN et à Messieurs les Professeurs OUDIN et CAIGNAERT pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de cette thèse; qu'ils soient remerciés ici de la confiance qu'ils m'ont témoignée.

Ma reconnaissance va également à :

- Monsieur ZAKRZEWSKI, responsable du Laboratoire d'essais mécaniques du Département Matériaux pour l'aide qu'il m'a apportée.

- Au secrétariat et en particulier à madame FICHEL qui a participé à la frappe.

- A l'ensemble des personnels du Département Matériaux et du Département de Métrologie-Qualité, qui m'ont apporté une aide au cours de la présente étude. Qu'ils soient assurés de ma profonde gratitude et de mon amitié.



50376  
1993  
79

50376  
1993  
79

SOMMAIRE

**RESUME**.....1

**INTRODUCTION GENERALE**.....3

**CHAPITRE I : JAUGE DE DEFORMATION**.....10

I.1. Introduction.....11

I.2. Généralités.....11

I.3. Principe de mesure.....12

I.4. Jauges métalliques.....14

    I.4.1 Matériaux.

    I.4.2 Principales caractéristiques.

        I.4.2.1 Résistance.

        I.4.2.2. Facteur de jauge.

        I.4.2.3 Influence de la température.

        I.4.2.4 Géométrie.

I.5. Jauges piézo-résistives.....22

I.6. Conclusion.....23

**CHAPITRE II : CAPTEURS A JAUGES DE DEFORMATION**.....25

II.1. Introduction.....26

II.2. Principes fondamentaux.....26

II.3. Technologie de fabrication et principe de mesure.....27

    II.3.1. Corps d'épreuve.

    II.3.2. principe de mesure.

II.4. Problèmes physiques.....33.

    II.4.1. Problèmes liés à la structure mécanique.

    II.4.2. Problèmes liés à la jauge de déformation.

    II.4.3. Problèmes liés à la colle.

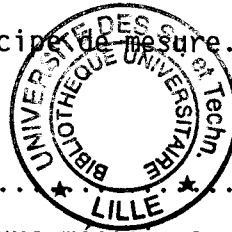
II.5. Conclusion.....47

**CHAPITRE III : LES ADHESIFS**.....48

III.1. Introduction générale.....49

    III.1.1. Historique.

    III.1.2. Intérêt du collage.



|                                     |    |
|-------------------------------------|----|
| III.2. Mécanismes du collage.....   | 51 |
| III.2.1. Théorie de la cohésion.    |    |
| III.2.1.1. Liaisons primaires.      |    |
| III.2.1.2. Liaisons secondaires.    |    |
| III.2.2. Théorie de l'adhésion.     |    |
| III.2.2.1. Théorie mécanique.       |    |
| III.2.2.2. Théorie de la diffusion. |    |
| III.2.2.3. Théorie électrique.      |    |
| III.2.2.4. Théorie du mouillage.    |    |
| III.2.2.5. Théorie chimique.        |    |
| III.3. Conclusion.....              | 54 |

**CHAPITRE IV : METHODE EXPERIMENTALE.....55**

|  |    |
|--|----|
| IV.1. Généralités.....                                 | 56 |
| IV.2. Assemblage symétrique à double recouvrement..... | 58 |
| IV.2.1. Elaboration du corps d'épreuve.                |    |
| IV.2.1.1. Choix du matériau.                           |    |
| IV.2.1.2. Usinage et traitements thermiques.           |    |
| IV.3. Adhésifs utilisés.....                           | 62 |
| IV.3.1. Généralités.                                   |    |
| IV.3.2. Caractéristiques.                              |    |
| IV.4. Procédure d'obtention des assemblages.....       | 64 |
| IV.4.1. Généralités.                                   |    |
| IV.4.2. Traitement des surfaces à encoller.            |    |
| IV.4.3. Assemblage des substrats.                      |    |
| IV.4.4. Cycle thermique de durcissement.               |    |
| IV.5. Conclusion.....                                  | 67 |

**CHAPITRE V : TRAITEMENT DE DURCISSEMENT DES FILMS D'ADHESIF, ESSAIS MECANIQUES ET RESULTATS EXPERIMENTAUX.....68**

|  |    |
|--|----|
| V.1. Introduction.....   | 69 |
| V.2. Condition d'essai.....  | 71 |
| V.3. Essais préliminaires.....   | 71 |
| V.3.1. Variation de la résistance au cisaillement en fonction de la pression de collage.   |    |
| V.3.2. Discussion.   |    |
| V.4. Influence sur la résistance au cisaillement de la température de prise à chaud, du temps de cuisson et de la pression de collage..... | 82 |



|   |            |
|---|------------|
| V.4.1. Modèle expérimental.   |            |
| V.4.2. Influence de la température de prise à chaud.  |            |
| V.4.2.1. Discussion.  |            |
| V.4.3. Influence du temps de cuisson de l'adhésif sur la résistance à la rupture par cisaillement.                      |            |
| V.4.3.1. discussion.  |            |
| V.4.4. Détermination des températures optimales associées aux temps de cuisson.   |            |
| V.4.5. Influence de la pression de collage (épaisseur du film de d'adhésif).  |            |
| V.4.5.1. Discussion.  |            |
| V.5. Conclusion.....  | 107        |
| <b><u>CHAPITRE VI : DETERMINATION DES MICROFISSURES.....</u></b>  | <b>108</b> |
| VI.1. Introduction.....   | 109        |
| VI.2. Modélisation expérimentale.....   | 109        |
| VI.3. Essais mécaniques et résultats expérimentaux.....   | 113        |
| VI.4. Interprétation.....   | 119        |
| VI.5. Confrontation THEORIE - EXPERIENCE.....   | 133        |
| VI.6. Conclusion.....   | 137        |
| <b><u>CHAPITRE VII : : ETUDE THEORIQUE.....</u></b>   | <b>138</b> |
| VII.1. Introduction.....  | 139        |
| VII.2. Position du problème.....  | 141        |
| VII.2.1. Hypothèses.  |            |
| VII.2.2. Equilibre d'une section située au milieu du film d'adhésif suivant l'hypothèse de la résistance des matériaux. |            |
| VII.3. Solution selon la méthode de VOLKERSEN (10).....   | 144        |
| VII.3.1. Equations constitutives.   |            |
| VII.3.2. Expression des contraintes de cisaillement et de décollement.  |            |
| VII.3.3. Discussion.  |            |
| VII.4. Modèle développé.....  | 158        |
| VII.4.1. Equations constitutives.   |            |
| VII.4.2. Solution approchée.  |            |
| VII.4.3. Discussion.  |            |
| VII.4.4. Expression des contraintes de cisaillement et de décollement dans le plan moyen du film d'adhésif.             |            |

|   |     |
|---|-----|
| VII.5. Conclusion.....  | 179 |
| <b><u>CHAPITRE VIII : EXPLOITATION NUMERIQUE DES RESULTATS THEORIQUES.</u></b> .....  | 184 |
| VIII.1. Introduction.....   | 115 |
| VIII.2. Influence de l'épaisseur du film d'adhésif et de la longueur de recouvrement.....   | 185 |
| VIII.2.1. Profil des contraintes de cisaillement.   |     |
| VIII.2.2. Profil des contraintes de décollement.  |     |
| VIII.3. Influence de l'épaisseur des substrats et des modules de Young des deux milieux.....  | 201 |
| VIII.4. Confrontation avec d'autres modèles théoriques.....   | 205 |
| VIII.4.1. Répartition des contraintes spécifiques de cisaillement dans le recouvrement pour différents modèles.   |     |
| VIII.4.1.1. Modèle des développements asymptotiques.  |     |
| VIII.4.1.2. Modèle classique.   |     |
| VIII.4.1.3. Modèle des éléments finis.  |     |
| VIII.4.1.3.1. Maillage. Caractéristiques nominales de l'assemblage.   |     |
| VIII.4.2. Comparaison des résultats numériques.   |     |
| VIII.5. Evaluation des contraintes maximales $\bar{\tau}_m$ , des contraintes $\bar{\tau}(1/2)$ au bord $\bar{x}=1/2$ , de l'abscisse $\bar{x}_m$ et comparaison avec le modèle théorique de VOLKERSEN <sup>m</sup> (10)..... | 219 |
| VIII.6. Conclusion.....   | 230 |
| <b><u>CONCLUSION GENERALE.</u></b> .....  | 234 |
| <b><u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.</u></b> .....  | 240 |

RESUME

La conception mécanique des capteurs de pesage fait appel à trois éléments fondamentaux : le corps d'épreuve, la jauge de déformation et l'adhésif. La jauge est liée au corps d'épreuve par l'intermédiaire de l'adhésif. Sa fonction première consiste à détecter, puis à transformer les déformations superficielles du corps d'épreuve en un signal électrique. Dans cette architecture, l'adhésif joue un rôle important car il détermine la nature de la liaison établie entre la jauge et le corps d'épreuve. Outre l'industrie du pesage pour laquelle cette étude trouve son application directe, nombreux sont les domaines où les informations qu'elle apporte sont des plus précieuses. On peut citer : l'industrie de la mesure des forces, de l'aéronautique, de l'automobile, du bâtiment et de la micromécanique. Pendant la phase de réalisation des capteurs, les caractéristiques mécaniques de l'adhésif demeurent dans certains cas, difficiles à déterminer.

L'étude complète sur les capteurs a donc été ramenée à celle des joints minces d'adhésifs spécialement conçus pour le collage des jauges de déformation. Après avoir proposé une étude sur les dérives thermiques de sensibilité sous charge des capteurs, nous avons mis en oeuvre une méthodologie expérimentale conduisant à l'amélioration des caractéristiques cohésives et adhésives des adhésifs testés en fonction de l'influence de trois principaux paramètres : la température de prise à chaud (température de cuisson), le temps de maintien à cette température ( temps de cuisson ) et la pression de collage. L'influence de ces paramètres a été déterminée par l'évaluation de la tenue mécanique à la rupture par cisaillement des joints d'adhésif. Cette étude expérimentale a été complétée par une analyse extensométrique fine similaire à celle réalisée par (12), (13) et (14). Celle-ci a permis de caractériser dans les joints, les seuils d'apparition et de propagation des microfissures. L'adéquation de certains de nos résultats expérimentaux a été vérifiée avec les résultats théoriques de Y. GILIBERT et A. RIGOLOT (15). Des examens micrographiques ont été effectués sur les faciès de rupture et ont permis de mettre en évidence dans le joint, des plages de rupture mixte (par cisaillement et décollement) et des plages de rupture purement cohésive par cisaillement.

Enfin, nous proposons dans les deux derniers chapitres, une amélioration de l'étude théorique effectuée par VOLKERSEN (10) sur les assemblages collés à double recouvrement.



**INTRODUCTION GENERALE**

Dans l'industrie du pesage et plus généralement de la mesure de forces, le savoir-faire existe maintenant dans les domaines que sont:

- les calculs qui, pour une résolution escomptée, déterminent la sensibilité nécessaire.
- la détermination des erreurs.
- le choix des matériaux.
- la détermination des structures adaptées aux sollicitations désirées.

De même, les processus de fabrication et de calibration sont maîtrisés.

En revanche, la phase d'instrumentation du corps d'épreuve en jauges de déformation fait appel à l'utilisation d'adhésifs performants dont les caractéristiques mécaniques (contrainte admissible, résistance à la rupture ...) demeurent difficiles à déterminer.

La prévision des performances mécaniques impose alors la connaissance de la loi de comportement de l'adhésif vis à vis des sollicitations extérieures. D'où la nécessité de réaliser des tests soit, de manière indirecte sur des assemblages collés, soit sur des éprouvettes massives en colle.

L'étude du comportement mécanique des adhésifs par l'intermédiaire d'assemblages collés connaît sans doute un succès certain. Cependant, le rendement de tels assemblages demeure dans certains cas, limité à cause de la complexité de la répartition des contraintes dans le joint d'adhésif. En effet, plusieurs paramètres entrent en ligne de compte dans l'étude d'un assemblage collé. Son comportement dans le domaine élastique et sa ruine dépendent alors des caractéristiques mécaniques et géométriques de l'adhésif et du

substrat, de l'état physico-chimique des surfaces de liaison, de la présence de défauts ( bulles d'air ), de la nature des charges incluses dans l'adhésif et du type de sollicitation extérieure.

La distribution des efforts dans les joints d'adhésif des assemblages à recouvrement a été pour la première fois étudiée par ARNOVLJEVIC (8) en 1909. Les hypothèses simplificatrices étaient alors les suivantes:

- 1) les pièces à assembler sont assimilées à des poutres.
- 2) le tenseur des contraintes est indépendant de la coordonnée d'épaisseur du joint.
- 3) le glissement relatif des substrats est inversement proportionnel au module de cisaillement de l'adhésif.

Les travaux réalisés ensuite par M. GOLAND et E. REISSNER (9) ainsi que par O. VOLKERSEN (10) ont permis de mettre en évidence, dans le joint, la présence de contraintes de décollement dues à l'excentricité des charges extérieures. Toutes ces démarches présentent un inconvénient majeur: elles ne tiennent pas compte des conditions aux limites sur les bords non chargés du recouvrement. Aussi, compte-tenu de la présence d'angles droits aux extrémités du recouvrement, apparaissent des contraintes singulières qui faussent l'évaluation du niveau des contraintes maximales

En utilisant la technique du " SPEW FILET " ( adjonction d'une partie régularisante au joint ), R. D. ADAMS et N. A. PEPPIATT (11) ont pu réduire le maximum de contrainte au voisinage des bords libres.

Sur le modèle géométrique d'assemblage à double recouvrement étudié par Y. GILIBERT (12) et (13), les auteurs (14), (15) et (16) ont utilisé la technique des perturbations singulières pour traiter la singularité des contraintes et ont pu mettre en évidence le phénomène de couche limite. Cette

couche, située au voisinage des extrémités libres du joint se caractérise par le même ordre de grandeur qui existe entre ses coordonnées longitudinales et transversales.

Un modèle théorique, relatif au calcul des singularités dans les joints collés a été également développé par P. DESTUYNDER, Y. OUSSET et C. STACKER (17). Ces auteurs ont pu évaluer les facteurs d'intensité de contraintes en fonction des paramètres comme la longueur de recouvrement, la rigidité des différents milieux, et la géométrie des extrémités du joint.

Dans le cadre de l'évaluation des singularités, le calcul des contraintes locales aux voisinages des extrémités du joint est très complexe. Cette difficulté peut être contournée par l'utilisation des calculs en éléments finis qui permet en principe, d'éliminer les hypothèses simplificatrices. Une approximation satisfaisante nécessite un maillage très fin. Cette contrainte n'est pas en général compatible, dans la pratique avec le crédit du temps machine et le calcul des pièces comportant plusieurs joints collés. Néanmoins, plusieurs auteurs dont S. AMIJIMA et T. FUJII (18), H. L. GROTH (19), G. R. WOOLEY et D. R. CARVER (20), J. A. HARRIS et R. D. ADAMS (21), R. D. ADAMS. J. COPPENDALE et N. A. PEPPIATT (22) ont développé ou utilisé des techniques d'analyses de contraintes par application de la méthode des éléments finis.

Parallèlement aux travaux portant sur la répartition des contraintes et l'étude des singularités de contraintes, se sont développées des méthodes d'analyses expérimentales et théoriques réalisées sur des adhésifs massifs ou sur des assemblages collés.

Dans son étude sur les joints collés; L. J. HART-SMITH (23) a montré que la relation entre la contrainte de cisaillement et la déformation associée obéissait à un comportement de type élastique linéaire parfaitement-plastique. Une étude analogue de caractérisation mécanique a été menée par G. DOLEV et O. ISHAI (24) ainsi que par S. GALI, G. DOLEV et O. ISHAI (25).



Par ailleurs, l'utilisation des méthodes de mesure non destructive s'applique parfaitement à l'évaluation des caractéristiques mécaniques de l'adhésif. Elle s'applique également au contrôle de l'amorçage et de la propagation des microfissures en régime stable ainsi qu'à l'amorçage et à la propagation des criques en régime instable dans le joint d'adhésif au voisinage de la rupture ultime. Ces méthodes font référence aux travaux de: C. C. H. GUYOTT et P. CAWLEY (26); G. C. KNOLLMAN(27); T. S. SRIVATEN, R. MANTENA, R. F. GIBSON, T. A. PLACE et T. S. SUDARSHAN (28) ainsi qu'aux travaux de Y. GILIBERT, S. HALFAOUI, M. L. L. KLEIN (29) et Y. GILIBERT (37).

Y. GILIBERT (12) a étudié expérimentalement l'adhésivité des matériaux collés en fonction des paramètres géométriques, mécaniques et structuraux. Il a montré l'adéquation de la théorie de O. VOLKERSEN (10) à l'expérience dans la partie centrale de l'éprouvette à double recouvrement qui, seule est élastique globalement. En d'autres termes, dès l'apparition des microfissures ( seuils  $F_d$  (12) ), le corps d'épreuve n'est plus globalement élastique. Seule l'extensométrie par jauges mise au point par Y. GILIBERT (12) permet de déterminer:

- le domaine élastique global.
- le domaine élastique complexe.
- la courbe d'amorçage des microfissures dans le joint en régime stable.
- leur propagation et croissance en régime stable.
- l'amorçage du début de propagation des criques en régime stable et la propagation rapide de celles-ci jusqu'à la rupture ultime du modèle.

Leurs modèles théoriques et expérimentaux sont constitués par des assemblages à double recouvrement. Ce type d'assemblage

est particulièrement intéressant car il permet de minimiser la flexion des couvre-joints extérieurs sous l'effort de traction.

La présente étude utilise ces assemblages afin de déterminer les paramètres de durcissement qui conduisent à une meilleure tenue mécanique du joint de colle. Pour notre part, nous utilisons deux adhésifs à haute performance utilisés dans l'industrie des capteurs de pesage.

Aussi, nous avons estimé qu'il était judicieux de présenter la théorie générale des jauges de déformation et des capteurs: c'est l'objet du chapitre I et du chapitre II.

Le chapitre III décrit le phénomène de collage en précisant quelques concepts de l'adhésion et de la cohésion.

L'étude de la modélisation expérimentale relative à nos essais ( forme géométrique des substrats, montage de positionnement des substrats) fait l'objet du chapitre IV. Le modèle expérimental d'assemblage à double recouvrement a été retenu pour sa simplicité de mise en oeuvre et son extrême facilité d'adaptation sur la machine de traction.

Le chapitre V est consacré à l'étude expérimentale effectuée sur les adhésifs. La méthodologie expérimentale présentée permet de déterminer les paramètres optimaux de durcissement des films d'adhésif testés.

Le chapitre VI, basé sur la procédure expérimentale issue des travaux de Y. GILIBERT (12) présente les seuils d'apparition et de propagation des microfissures dans le joint ainsi que les micrographies des faciès de rupture.

Une modélisation du comportement des joints d'adhésif basée sur la théorie développée par O. VOLKERSEN (10) est proposée dans le chapitre VII. Une amélioration de ce modèle a été

obtenue et permet de mieux satisfaire les conditions physiques sur les bords libres. Les résultats numériques essentiels , portant sur l'intensité des contraintes de cisaillement et de décollement ainsi que sur les conditions aux limites sur les bords libres sont traités dans le chapitre VIII.

Enfin, la conclusion présente une synthèse générale des études expérimentale et théorique menées respectivement sur les adhésifs et sur les assemblages collés à double recouvrement symétrique.

CHAPITRE I

JAUGES DE DEFORMATION



### I.1. - INTRODUCTION.

Dans le domaine du pesage, les jauges électriques à trame pelliculaire occupent une place très importante dans la phase de conception et de réalisation des capteurs. Utilisées comme interface entre le corps d'épreuve ( élément mécanique recevant la charge ) et le dispositif électronique, elles sont chargées de détecter les déformations superficielles du corps d'épreuve puis de les traduire en une grandeur électrique facilement mesurable. D'autre part, la technique qui utilise l'extensométrie à jauges électriques occupe également une place importante dans l'industrie des capteurs de force et de pression. De même, l'utilisation des jauges intègre parfaitement dans la méthodologie scientifique expérimentale mise en oeuvre dans le chapitre VI. En effet, compte tenu de leur extrême sensibilité, celles-ci permettent de déterminer de manière très fine les seuils d'amorçage et de propagation des microfissures, la croissance et la propagation rapide des criques jusqu'à la rupture ultime du joint d'adhésif.

### I.2. - GENERALITES.

Sous sa forme la plus élémentaire, une jauge électrique à trame pelliculaire (jauge de déformation ou de contrainte) est constituée de brins de fil très fins (figure I.1). Ces brins de fil, déposés sur un support isolant de très faible épaisseur sont orientés suivant une direction fixe (axe principal de la jauge).

Lorsque l'on désire connaître l'allongement unitaire superficiel d'un solide déformable en un point M et selon une direction n, il suffit de rendre le centre de la jauge solidaire du point M considéré par collage, son axe  $\Delta$  étant colinéaire à n. La jauge intègre alors sur sa surface active les déformations superficielles du solide. La mesure sera

d'autant plus précise que la surface active de la jauge sera petite.

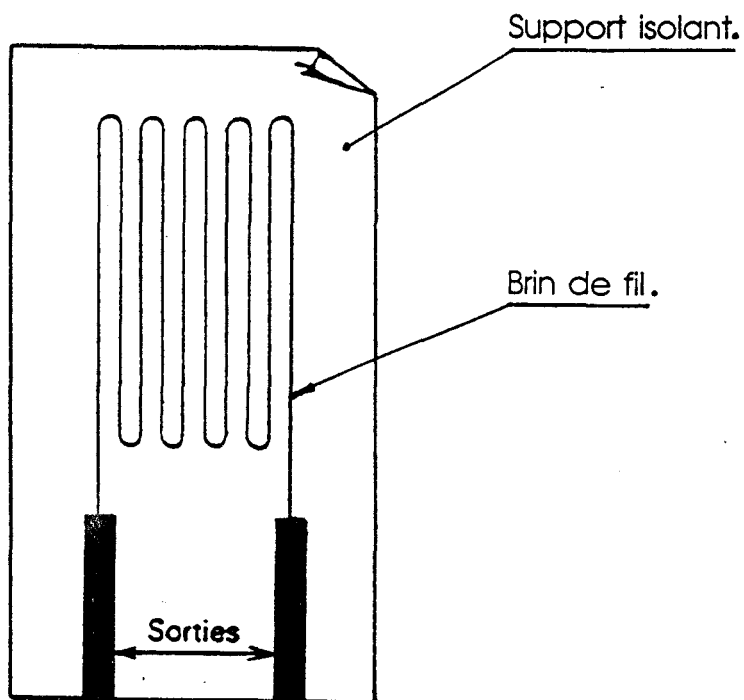


Figure I.1 : Jauge de déformation

### I.3. - PRINCIPE DE MESURE.

Soit un solide élastique (D) dont une partie de la surface extérieure (S) est solidaire (par collage) d'un fil résistif de longueur initiale  $L$  (figure I.2).

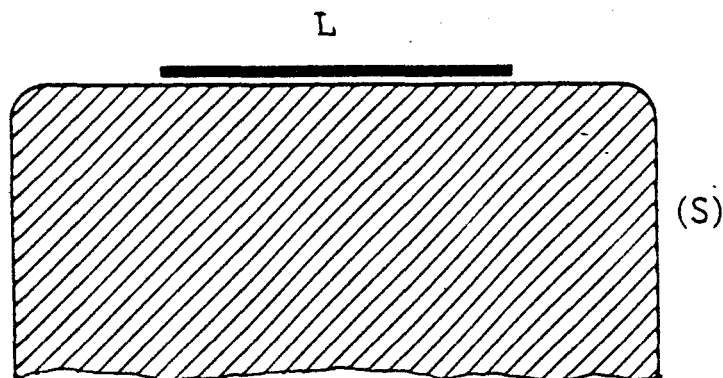


Figure I.2

La résistance du fil électrique est donnée par :

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (\text{I.1})$$

avec R : Résistance électrique  
 $\rho$  : Résistivité électrique  
 L : Longueur du fil  
 S : Aire de la section transversale du fil.

Sous l'effet des sollicitations extérieures, deux hypothèses sont généralement admises :

- a) Les déformations superficielles du domaine (D) et du fil résistif sont égales dans la zone de collage.
- b) Le fil résistif se comporte comme s'il était soumis à un effort axial à ses deux extrémités.

La variation relative de résistance du fil électrique est alors donnée par :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} \quad (\text{I.2})$$

soit

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + (1 + 2\mu) \frac{\Delta L}{L} . \quad (\text{I.3})$$

$\mu$  : coefficient de Poisson du matériau constituant le fil.

A l'aide de la relation de BRIDGMAN, on a :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = C \frac{\Delta V}{V} \quad (\text{I.4})$$

C : constante de BRIDGMAN.

V : volume de matière.

On exprime alors la variation relative de résistance du fil en fonction de sa variation relative de longueur par :

$$\frac{\Delta R}{R} = [1 + 2\mu + C (1 - 2\mu)] \frac{\Delta L}{L} \quad (I.5)$$

Finalement on définit un coefficient de sensibilité K appelé facteur de jauge tel que la relation I.3 s'écrive :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad (I.6)$$

avec :  $K = C (1 - 2\mu) + 1 + 2\mu$ .

Le principe de fonctionnement des jauges de déformation est basé sur la relation I.6 reliant par l'intermédiaire du coefficient K les variations relatives de résistance aux dilatations linéaires. Pour un type de matériau donné, les valeurs de K dépendent entre autre de la constante de BRIDGMAN (C) et du coefficient de Poisson ( $\mu$ ).

D'une manière générale, dans le domaine d'utilisation qu'est le pesage, le choix est porté sur les jauges dont le matériau constitutif présente un coefficient de sensibilité K indépendant de la déformation élastique imposée.

Selon la nature du matériau utilisé, les jauges sont classées suivant deux types : métalliques et semi-conductrices.

#### **I.4. - Jauges métalliques.**

##### **I.4.1. - Matériaux.**

Les alliages utilisés sont généralement à base de Nickel. Le tableau I.1 donne la composition et le facteur de jauge de quelques alliages.



| DESIGNATION          | COMPOSITION                         | FACTEUR DE JAUGE                             |
|----------------------|-------------------------------------|--|
| Constantan (*)       | 45% Ni, 55% Cu                      | 2.1  |
| Isoélastic (*)       | 52% Fe, 36% Ni, 8%Cr<br>4% (Mn, Ca) | 3.5  |
| Karma (*)            | 74% Ni, 20% Cr, 3%Cu                | 2.1  |
| Manganin             |                                     | 0.6  |
| Nichrome V (*)       | 80% Ni, 20% Cr                      | 2.5  |
| Nickel               |                                     | - 12<br>( $\Delta L/L < 500 \mu\text{m/m}$ ) |
| Platine              |                                     | 6  |
| Platine-Tungtène (*) | 92% Pt, 8% W                        | 4.1  |

Tableau I.1 : Caractéristiques de quelques alliages  
(\*) : alliages pour jauges.

Certains métaux ont un comportement qui les rend impropres à toute utilisation dans la fabrication des jauges. Ces métaux présentent soit des comportements non linéaires, soit de l'hystérésis. (voir figure I.3)

#### I.4.2. - Principales caractéristiques.

##### I.4.2.1. - Résistance

Les valeurs ohmiques des résistances recherchées, généralement comprises entre 100  $\Omega$  et 1000  $\Omega$  sont fixées par :

- a) La longueur totale (L) du fil.
- b) La résistivité ( $\rho$ ) du matériau utilisé.
- c) L'aire de la section transversale (S) du fil.

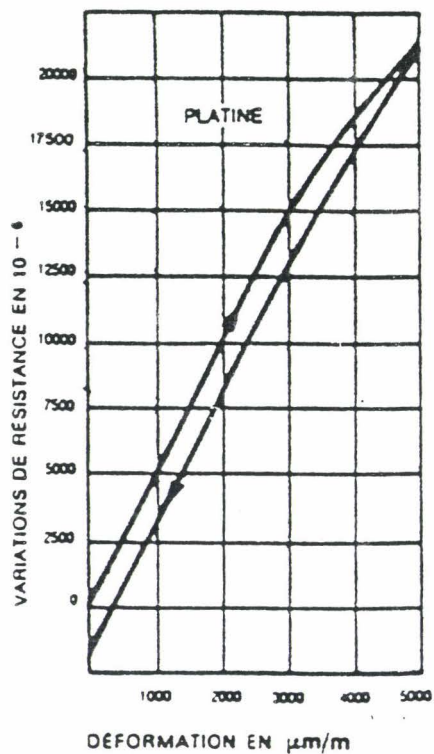
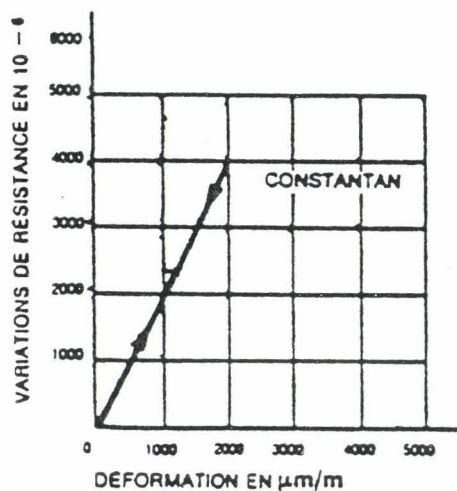
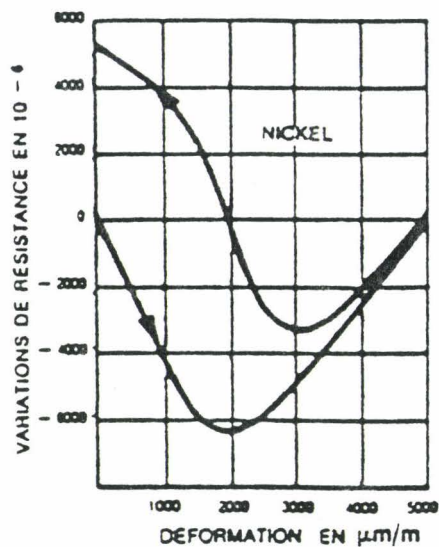
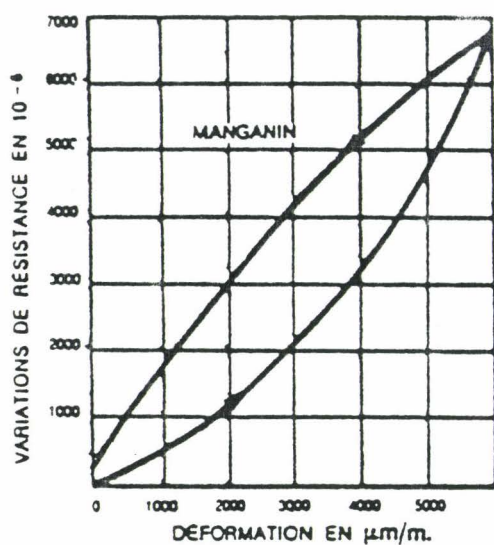


Figure I.3 : Variation relative de résistance en fonction de la déformation imposée. D'après VISHAY-MICROMESURES (42).

Les valeurs de résistance sont obtenues par le choix d'un matériau de résistivité suffisamment élevée de manière à éviter des dimensions exagérées dues à une longueur et une section du fil trop importantes.

#### **I.4.2.2. - Facteur de jauge**

A l'exception de l'alliage Isoélastique et du Platine-Tungstène dont les facteurs de jauge ont pour valeur 3.5 et 4.1, tous les alliages utilisés ont un facteur de jauge voisin de  $2.1 \pm 0.1$  (voir tableau I.1). Le facteur K demeure constant tant que les déformations restent dans le domaine élastique.

#### **I.4.2.3. - Influence de la température**

##### **a) Sur le facteur de jauge**

Excepté l'alliage Isoélastique et l'alchrome (alliage Fer - carbone - aluminium), la plupart des matériaux extensométriques ont une variation du facteur de jauge linéaire en fonction de la température dans une plage de température comprise entre 200°C et 300°C. La loi de variation est généralement donnée par:

$$K(T) = K(T_0) (1 + \alpha_k (T - T_0))$$

$K(T_0)$  : Facteur de jauge à la température de référence  $T_0$ .

$\alpha_k$  : Coefficient de dilatation thermique du matériau de la jauge.

Les variations relatives de K en fonction de la température sont indiquées, pour différents types de matériau par la figure I.4.

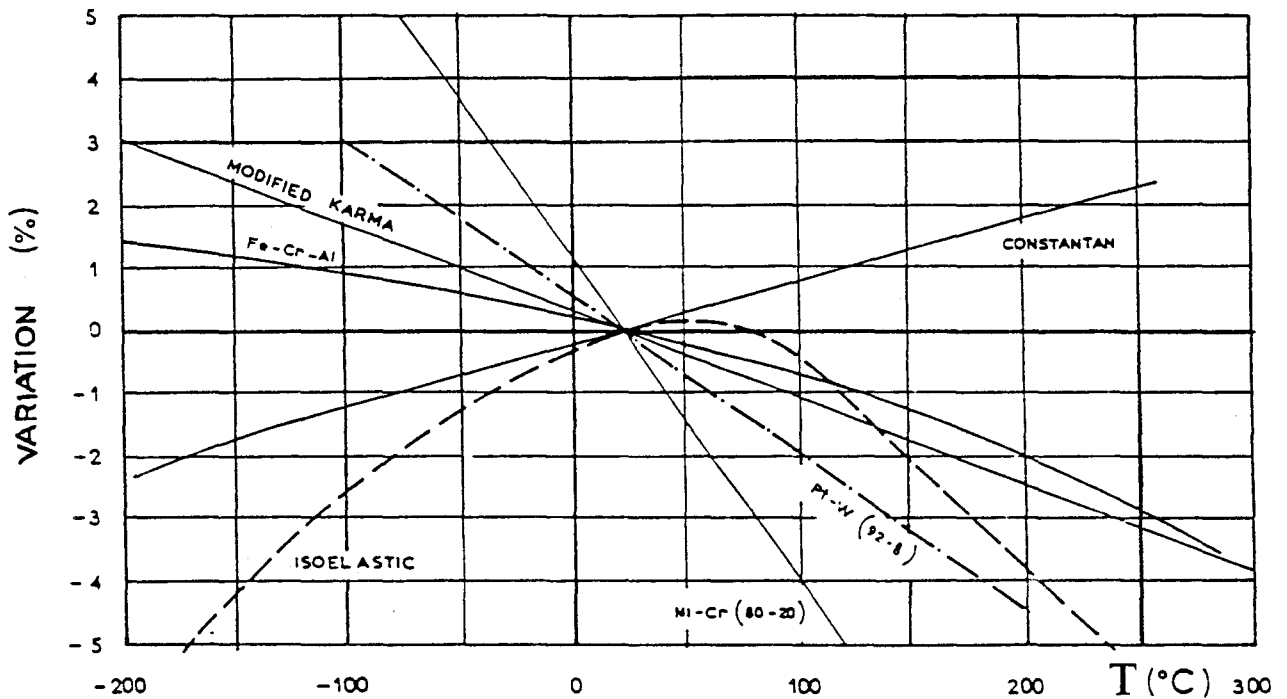


Figure I.4 : Variations relatives de K en fonction de T et pour différents matériaux pour jauges. D'après (40).

b) Sur la jauge solidaire du corps d'épreuve.

La variation de résistance électrique des jauges collées dépend essentiellement de la nature des matériaux qui composent :

- la jauge (matériau, support et adhésif).
- le corps d'épreuve.

Sous l'effet de la température, on observe une variation totale de résistance due à la :

- Variation de résistance propre de la jauge.
- Dilatation différentielle induite par l'inégalité des

coefficients de dilatation thermique du matériau de la jauge et du corps d'épreuve.

La variation relative globale de résistance s'exprime par :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(\Delta R)_T}{R} + \frac{(\Delta R)_d}{R} \quad (\text{I.7})$$

$(\Delta R)_T$  : Variation de résistance propre de la jauge.

$(\Delta R)_d$  : Variation de résistance induite par les dilatations différentielles.

Sous l'effet de la variation de température, les variations relatives de résistivité, de longueur et d'aire de la section transversale du fil de jauge s'écrivent :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \alpha_\rho \Delta T, \quad \frac{\Delta L}{L} = \lambda_j \Delta T, \quad \frac{\Delta S}{S} = 2\lambda_j \Delta T.$$

En posant  $\Delta T = T - T_0$ , on a :

$$\begin{aligned} \Delta \rho &= \rho(T) - \rho(T_0) = \rho(T_0) \alpha_\rho \Delta T \\ \Delta L &= L(T) - L(T_0) = L(T_0) \lambda_j \Delta T \\ \Delta S &= S(T) - S(T_0) = 2L(T_0) \lambda_j \Delta T. \end{aligned}$$

En tenant compte de la relation I.2, on a :

$$\frac{(\Delta R)_T}{R} = \alpha_R \Delta T \quad (\text{I.8})$$

$$\text{où : } \alpha_R = (\alpha_\rho - \lambda_j)$$

En revanche, la variation relative de résistance  $(\Delta R)_d/R$  s'obtient par le produit entre  $K(T)$  et la dilatation différentielle  $(\Delta L)_d/L$ .

$$\frac{(\Delta R)_d}{R} = K(T) \left( \frac{(\Delta L)_s}{L} - \frac{(\Delta L)_j}{L} \right)$$

où  $s$  et  $j$  sont les indices relatifs à la structure et à la jauge.

$$\frac{(\Delta L)_s}{L} = \lambda_s \Delta T, \quad \frac{(\Delta L)_j}{L} = \lambda_j \Delta T.$$

Finalement la variation relative globale de résistance thermique de la jauge collée sur la structure est donnée par :

$$\frac{\Delta R}{R} = \beta_{j/s} \Delta T \quad (\text{I.9})$$

$$\beta_{j/s} = \alpha_R + K(T) (\lambda_s - \lambda_j)$$

$$\alpha_R = \alpha_\rho - \lambda_j.$$

Les tableaux I.2 et I.3 donnent respectivement quelques caractéristiques thermiques d'alliages pour jauges et de matériaux pour corps d'épreuve.

| Matériaux  | $\alpha_R \cdot 10^5 \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ | $\lambda_j \cdot 10^6 \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$ |
|------------|--|---|
| Constantan | 2  | 17  |
| Karma      | 2  | 10  |
| Isoélastic | 17,5   | 4   |
| Nichrome V | 10   | 13  |

Tableau I.2 : Caractéristiques thermiques de quelques alliages pour jauges

| Matériau de corps d'épreuve |                       | Composition (%)  | $\lambda_s \cdot 10^6 (^{\circ}\text{C}^{-1})$ |
|-----------------------------|-----------------------|--|--|
| ACIERS                      | 45 SCD 6<br>(V 300)   | 0.4    1.3    0.5    0.1<br>C    -Si    -Cr    -Mo<br>0.5    1.8    1    0.3 | 11.4   |
|                             | Vascomax 300 CVM      | Ni 18.5-Co 9-Mo4.8<br>Ti 0.6   | 10.1   |
|                             | Z 85 WDV 06 06 02     | C 0.85-W 6- D 6-V 2  | 11   |
| Alliages<br>Fe - Ni         | ADR                   | Fe 61-Ni 39-Si 0.4-<br>Mn 0.4 à 1  | 3.1  |
|                             | Durinval B            | Fe 50-Ni 42-Mo 5-Ti 2<br>Al 1  | 7  |
| Alliage<br>Cu - Ba          | Bronze Beryllium      | Cu 98 - Be 2   | 17   |
| Aluminium                   | A Z 8 G U<br>(Zicral) | -  | 23.5   |

Tableau I.3 : composition et coefficients de dilatation  
linéaires des matériaux pour corps d'épreuve.

Par un choix judicieux de la jauge et du matériau de la structure, on arrive à minimiser sur une plage de température plus ou moins importante les dilatations différentielles résultant de l'inégalité des coefficients de dilatation linéaire.

Les jauges ainsi obtenues sont dites jauges autocompensées en température.

Le type d'autocompensation thermique (nombre à deux chiffres) indique avec quel matériau (de corps d'épreuve) la jauge peut être associée de manière à minimiser les dilatations différentielles d'origine thermique :

03 : Molybdène

05 : Titane

- 06 : Acier
- 09 : Acier inoxydable, cuivre, bronze
- 13 : Aluminium
- 15 : Magnesium
- 41 : Plexiglas.

#### **I.4.2.4. - Géométrie**

Les jauges de déformation se présentent généralement sous forme d'une ou plusieurs trames pelliculaires unidirectionnelles, bidirectionnelles ou tridirectionnelles collées sur un même support isolant. On distingue entre autre :

- Les jauges unidirectionnelles à une ou deux trames pelliculaires orientées suivant la même direction (fig. I.5a).
- Les chainettes (fig. I.5b)
- Les rosettes constituées par l'association de jauges dont les trames pelliculaires sont orientées suivant des directions différentes bien connues (fig. I.5c).

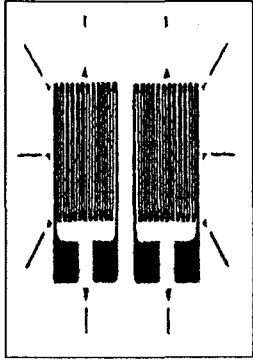
#### **I.5. - Jauges Piezoresistives.**

Moins utilisées dans l'industrie du pesage, ces jauges, constituées par un cristal de silicium dopé s'avèrent très sensibles ( $K$  est de l'ordre de 50 à 400). D'un coût très élevé, leur facteur de jauge, à l'inverse des jauges à trames pelliculaires dépend de la déformation et est généralement donné par :

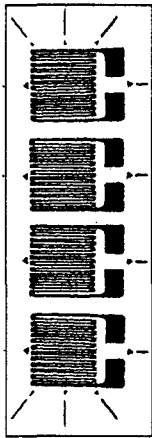
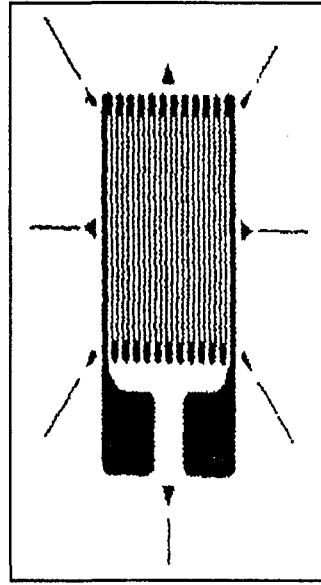
$$K = K_0 + K_1\epsilon + K_2\epsilon^2$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

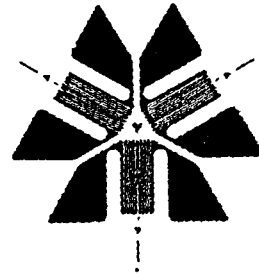




I.5a



I.5b



I.5c

Figure I.5 : Géométrie des jauges.

**I.6. CONCLUSION.**

D'une manière générale, les jauges de déformation obéissent à la relation fondamentale :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \epsilon$$

Utilisées dans la fabrication des capteurs de pesage, les jauges de déformation sont chargées de transformer les déformations d'une pièce métallique dite corps d'épreuve en variation relative de résistance facilement mesurable. Autant que possible, les caractéristiques mécaniques recherchées doivent garantir :

a) Une bonne linéarité de la relation reliant les variations relatives de résistance aux dilatations linéaires.

b) Une faible variation de résistance due aux dilatations différentielles d'origine thermique par un choix judicieux des matériaux constituant la jauge et le corps d'épreuve. D'un simple point de vue mécanique, à défaut d'annuler le coefficient  $\beta_{j/s}$  on le minimise en choisissant des couples de matériaux ( corps d'épreuve, jauges ) tels que le coefficient  $\lambda_s - \lambda_j$  soit minimal.

CHAPITRE II

CAPTEURS A JAUGES DE DEFORMATION

## II.1. - INTRODUCTION

La conception d'un capteur à jauges met en jeu trois éléments fondamentaux: le corps d'épreuve, la jauge et l'adhésif. Une réalisation correcte impose l'indépendance de tous ces éléments vis-à-vis des phénomènes physiques indésirables (fluage, dérives thermiques...). Nous nous proposons de décrire les grandes lignes et les impératifs technologiques à observer lors de la conception des capteurs. Un développement de l'étude réalisée par S. KONIECZKA (43) sur les dérives de sensibilité sous charge (influence de la variation thermique du module de Young du corps d'épreuve) est proposé et tient compte d'un second facteur: la variation thermique du facteur de jauge.

## II.2. - PRINCIPES FONDAMENTAUX

Les capteurs sont des instruments capables de détecter de manière spécifique certaines grandeurs physiques puis de traduire celles-ci en une information directement mesurable. La grandeur physique objet de la mesure (m) est appelée mesurande ou grandeur d'entrée, son image (s) est appelée signal de sortie ou réponse du capteur. Les principes utilisés sont nombreux, on peut citer : l'inductance, la piézo-électricité, les effets photoélectriques et les effets résistifs...

Tout le dispositif, qu'il soit mécanique, électrique ou électronique ayant pour but la saisie et le traitement du signal constitue la chaîne de mesure. En général, la relation reliant la réponse (s) du capteur à la grandeur d'entrée (m) s'exprime par :

$$s = F(m). \quad (\text{II.1})$$

Cette relation dépend de la loi physique qui régit le fonctionnement du capteur, de sa construction (géométrie, dimension et matériau du corps d'épreuve), de son environnement (grandeurs d'influence).

Tous les capteurs sont régis par la relation II.1 qui, sous sa forme exploitable est déterminée par étalonnage.

En pesage, on cherche toujours à avoir une relation linéaire entre le signal de sortie et la charge de tel sorte que :

$$\Delta s = S \Delta m \quad (\text{II.2})$$

$\Delta s$  et  $\Delta m$  sont respectivement les accroissements du signal de sortie et de la charge. (S) est par définition la sensibilité du capteur. La technologie alors basée sur l'effet résistif utilise des jauges de déformation collées sur une pièce mécanique dite corps d'épreuve.

### II.3. - TECHNOLOGIE DE FABRICATION ET PRINCIPE DE MESURE.

#### II.3.1. - Corps d'épreuve.

Le corps d'épreuve est l'élément fondamental du capteur. Sa conception exige un choix judicieux portant sur : **le matériau**, **les formes à adopter** et **les dimensions compatibles** avec la charge à supporter.

##### a) **Matériau**

Dans le domaine élastique, le matériau doit présenter une bonne linéarité de la courbe contrainte-déformation car la linéarité du capteur dépend de la propre linéarité du corps d'épreuve. Le tableau I.3 donne la nuance de quelques matériaux couramment utilisés. Outre ce critère de linéarité, le matériau tout en présentant une bonne usinabilité afin de faciliter la réalisation de formes complexes, doit également supporter certains traitements thermiques ayant pour but l'optimisation des caractéristiques mécaniques, et l'annulation des contraintes résiduelles induites lors de l'usinage.

## b) **Forme et Dimensions**

En fonction du type de sollicitation à mesurer, une géométrie optimale et un dimensionnement sont réalisés de manière à assurer :

- b<sub>1</sub>) Le collage des jauges dans les zones non affectées par les effets de bord et présentant une répartition uniforme de contrainte.
- b<sub>2</sub>) La fonction de découplage afin de permettre la mesure d'une seule composante de charge parmi plusieurs d'égale probabilité.
- b<sub>3</sub>) Une déformation élastique en tout point du corps d'épreuve. Les déformations élastiques maximales sont en général de l'ordre du quart de la déformation à la limite élastique.

La conception mécanique, fondée sur des corps d'épreuve à structure monobloc symétrique permet d'éliminer :

- Les jeux qui ont l'inconvénient de retarder l'application des charges et de créer des discontinuités de la courbe d'étalonnage.
- Les frottements générant de l'hystérésis sans que les propriétés de la jauge et de l'adhésif soient considérées

Les encastremements sont taillés dans la masse et les points d'application des charges localisés par des billes ou des couteaux. L'usinage du corps d'épreuve selon les critères ci-dessus est suivi de l'instrumentation qui comporte trois phases essentielles :

- Préparation des surfaces destinées à recevoir les jauges.

cette préparation permet d'obtenir par dégraissage chimique des surfaces saines et par abrasion des surfaces dont la rugosité  $R_a$  est de l'ordre de  $0,4 \mu\text{m}$  à  $1,6 \mu\text{m}$ .

- Choix des jauges (géométrie, résistance, compensation thermique).
- Choix d'un adhésif.

### II.3.2. - Principe de mesure.

Soit le corps d'épreuve matérialisé par un milieu continu occupant un domaine  $D$  ( $D \in \mathbb{R}^3$ ) de surfaces extérieure ( $\partial D_e$ ) et intérieure ( $\partial D_{i1}$  et  $\partial D_{i2}$ ). Quatre jauges de déformation  $J_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) de résistances initiales  $R_0$  sont par exemple respectivement centrées aux points  $M_i \in \partial D_e$ . (figure II.1)

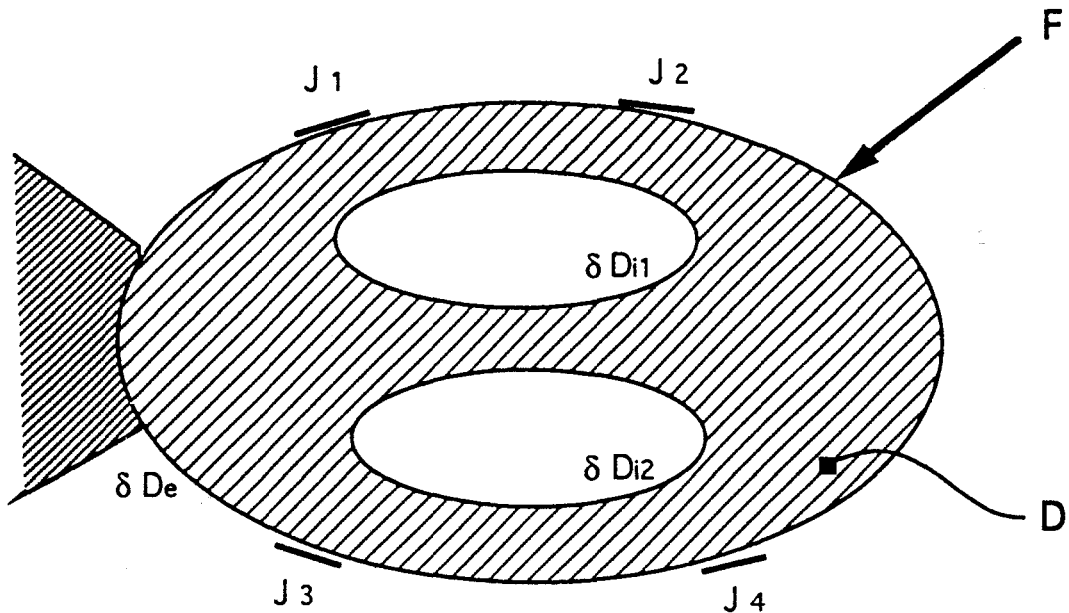


Figure II.1

Sous l'effet des sollicitations extérieures, le milieu ( $D$ ), en équilibre statique est soumis à un champ de déformation. Les jauges ( $J_i$ ) collées chacune selon une direction  $\vec{n}_i$

(vecteur unitaire appartenant au plan tangent en  $M_i$ ), intègrent les déformations sur leurs aires de collage. Leurs résistances électriques deviennent :

$$R_i = R_0 + \Delta R_i \quad i = (1, 2, 3, 4).$$

$$\text{soit : } \frac{R_i - R_0}{R_0} = \frac{\Delta R_i}{R_0} \quad (\text{II.1})$$

L'allongement unitaire moyen de chaque jauge  $e_i$  ( $e_i = \Delta L_i/L_0$ ) dans la direction  $\vec{X}_k$  ( $k = 1, 2, 3$ ) de vecteur unitaire  $n_i$  est donné par :

$$e_i (\vec{X}_k) = n_h (\epsilon_{hk}(M_i) n_k) \quad (\text{II.2})$$

Si toutes les jauges ont le même facteur de jauge  $K$ , leurs variations relatives de résistance s'expriment alors par :

$$\frac{\Delta R_i}{R_0} = K e_i \quad (\text{II.3})$$

Par ailleurs, si elles sont branchées en pont complet dans un pont de Wheatstone (figure II.2), l'expression du signal de sortie  $V/U$  du pont en fonction des variations relatives de résistance est donnée par :

$$\frac{V}{U} = \frac{\sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \frac{\Delta R_i}{R_0}}{4 + 2 \sum_{i=1}^4 \frac{\Delta R_i}{R_0}} \quad (\text{II.4})$$



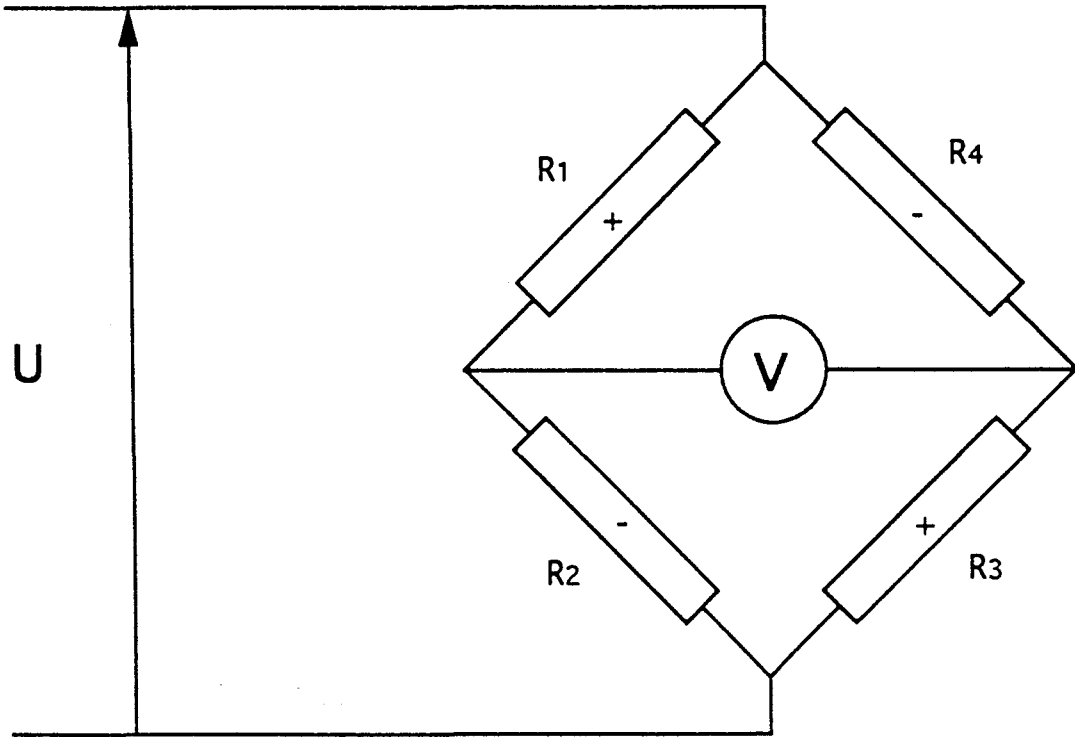


Figure II.2 : Pont de Wheatstone.

U : tension d'alimentation constante.

V : tension de sortie.

### Remarque

On supposera dans ce qui suit que le matériau du corps d'épreuve est homogène et isotrope et que les hypothèses de linéarité géométrique (déplacements infinitésimaux) et de linéarité physique (linéarité contraintes-déformations) sont satisfaites. Dans le cadre de ces hypothèses, on peut noter, qu'en tout point M du corps d'épreuve, les dilatations linéaires dans le domaine élastique sont proportionnelles à l'intensité P des charges.

$$e_i = a_i P \quad (\text{II.5})$$

Dans la relation II.5, le terme  $a_i$  a pour dimension l'inverse de la charge. Il dépend : des constantes élastiques du matériau constituant le corps d'épreuve, de sa géométrie,

des points  $M_i$  et des directions  $n_i$  de collage des jauges. En tenant compte des relations II.3 et II.5, le signal de sortie s'écrit :

$$\frac{V}{U} = \frac{K (a_1 - a_2 + a_3 - a_4) P}{4 + 2K (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) P} \quad (\text{II.6})$$

On voit d'après la relation (II.6) que l'obtention d'un signal qui allie la linéarité parfaite en fonction de  $P$  à une sensibilité maximale dépendra des termes  $a_i$ . Pour obtenir une sensibilité maximale, il faut maximiser le numérateur de l'expression (II.6) et minimiser son dénominateur.

Les capteurs qui réalisent le mieux cela sont ceux qui vérifient l'hypothèse ( $H_3$ )

$$(H_3) \quad \begin{cases} a_1 = a_3 \\ a_2 = a_4 \end{cases} \quad \text{et } a_1 = -a_2$$

Dans ces conditions, (II.6) s'écrit :

$$\frac{V}{U} = K a P, \quad a = |a_i|, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (\text{II.7})$$

L'hypothèse ( $H_3$ ) entraînant la linéarité parfaite du signal en fonction de la charge  $P$  suppose le choix d'une architecture du corps d'épreuve de manière à assurer l'existence de quatre zones où les déformations tout en étant de même valeurs absolues, demeurent de signes opposés deux à deux. L'architecture de la plupart des corps d'épreuve des capteurs utilisés en pesage est basée sur ce principe.

Trois principaux types de capteur sont généralement utilisés en pesage. Leurs corps d'épreuve sont soumis essentiellement à des sollicitations de flexion, cisaillement, compression ou traction.

**REMARQUE.**

Le principe de mesure, apparemment simple, résulte des relations II.3 et II.7. Mais la réalité est beaucoup plus complexe que ne le suggèrent ces deux relations. Compte tenu de la précision recherchée, il est nécessaire d'étudier attentivement la phase de conception du capteur afin de le rendre autant que faire se peut, insensible à tous les phénomènes physiques indésirables.

**II.4. PROBLEMES PHYSIQUES**

Quelles que soient les performances de l'électronique dans une chaîne de mesure, les qualités de cette dernière seront avant tout déterminées par le capteur et par l'indépendance de celui-ci vis-à-vis des phénomènes physiques indésirables. La réalisation correcte des chaînes de pesage, de balances ou de dynamomètres, sensibles, fidèles et robustes, exige donc un soin attentif dans toutes les opérations successives d'étude, de fabrication et d'instrumentation en jauges des capteurs.

Nous nous proposons de recenser les paramètres qui semblent influencer les différents éléments du capteur ( à l'exception de l'électronique). Ces paramètres sont relatifs au corps d'épreuve, à la jauge de déformation et à l'adhésif.

**II.4.1. Problèmes liés à la structure mécanique.**

Le matériau et l'architecture du corps d'épreuve dépendent d'un certain nombre de paramètres dont il faut noter l'interdépendance.

Ainsi, les matériaux utilisés ( peu coûteux ) et les formes retenues ( monoblocs tout au moins dans la partie active recevant les jauges ) doivent assurer:

**a) Un bon découplage**

En effet, quel que soit le mode de construction du corps d'épreuve (monobloc ou par élément), il est nécessaire d'assurer un bon découplage mécanique des différentes composantes d'effort pour en faciliter l'analyse et diminuer les interactions. Ce découplage est généralement réalisé par des amincissements répartis dans la structure. Ces amincissements assurent dans le cas des balances, une grande rigidité dans le sens des efforts parasites et une rigidité compatible avec l'intensité de la composante d'effort à mesurer.

**b) Une sensibilité maximale**

En général, dans les sections actives des corps d'épreuve, le problème à résoudre est ardu car les exigences de raideur et de sensibilité sont de nature contradictoire. Les contraintes moyennes admissibles dépendent alors des caractéristiques mécaniques du matériau utilisé.

**c) Une linéarité parfaite**

La linéarité du signal de sortie des capteurs dépend essentiellement de la linéarité de la courbe contrainte - déformation du métal utilisé. Cependant, bien que les capteurs soient sollicités dans leur domaine élastique, les déformations élastiques consécutives aux charges appliquées modifient la géométrie du corps d'épreuve et induisent de ce fait des interactions du second ordre qui ont pour effet d'affecter la linéarité du signal de sortie.

**d) Une faible dérive thermique.**

Sous l'effet de la température, il se produit une dérive de la sensibilité. Le signal ou la charge lue paraît croître

avec la température. Ce phénomène a pour cause la diminution du module d'élasticité du matériau et une augmentation du facteur de jauge  $K$  pendant l'augmentation de température.

En supposant que les zones actives du corps d'épreuve sont soumises à des contraintes uniaxiales, le signal de sortie  $V/U$  s'écrit:.

$$\frac{V}{U} = K \frac{\sigma}{E} \quad \text{II.8}$$

où  $E$  est le module d'élasticité longitudinale du matériau.

$K$  le facteur de jauge

$\sigma$  la contrainte uniaxiale au point de collage de la jauge et suivant sa direction de collage.

$U$  la tension d'alimentation constante.

$\sigma$  correspond à la charge appliquée, elle est donc constante.

Par contre si la température  $T$  varie à partir d'une température de référence  $T_0$ ,  $K$  et  $E$  sont des fonctions de  $T$  respectivement croissante et décroissante [cf DUBOIS (40) ].

On voit que

$$\frac{d}{dT} \left[ \frac{V}{U} \right] = \frac{K \sigma}{E} \left( \frac{1}{K} \frac{dK}{dT} - \frac{1}{E} \frac{dE}{dT} \right) \quad \text{II.9}$$

La relation II.9 étant positive, le signal de sortie  $V/U$  est une fonction non décroissante de  $T$ .

L'expérimentateur désire que la tension de sortie  $V$  reste constante et plus généralement que le rapport  $V/U$  demeure également constant. Pour cela, il est clair que l'on doit faire varier la tension d'alimentation  $U$  du pont de Wheatstone. On y parvient en plaçant, en série avec le pont, une résistance  $r$  variable avec la température  $T$  et en appliquant la tension  $U'$  constante à l'entrée ( fig.II.3 ).

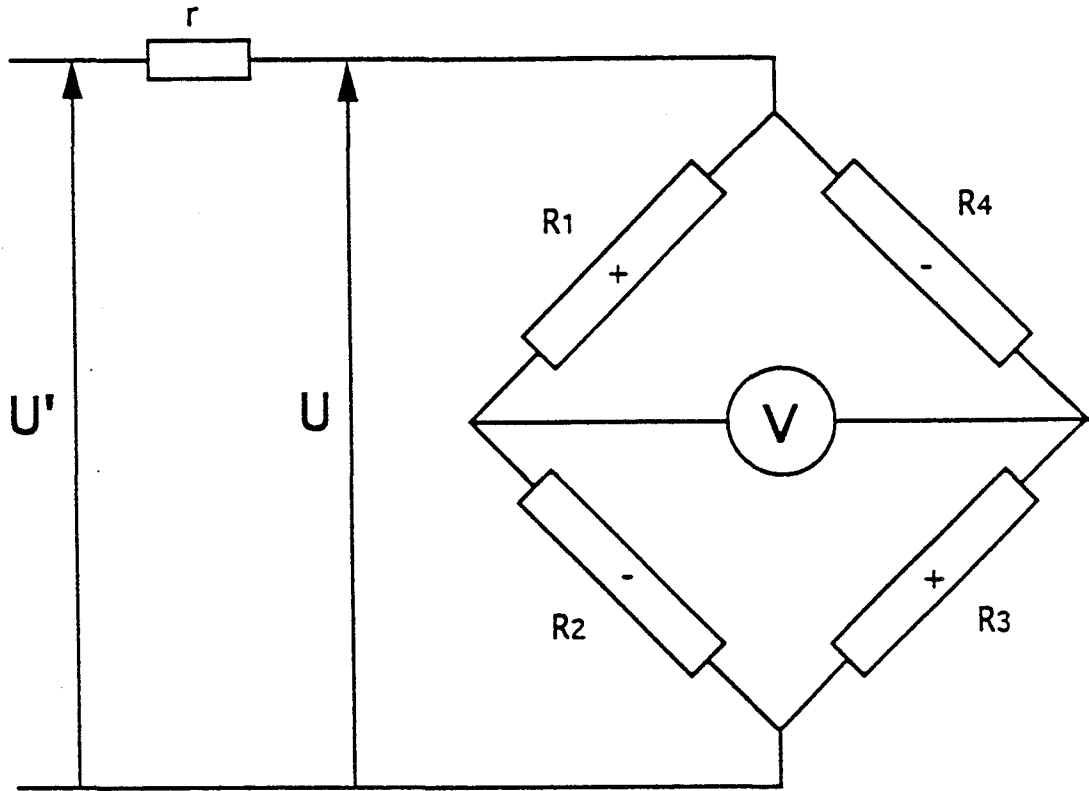


Fig II.3 : Pont de wheatstone. Correction des dérives thermiques sous charge.

A la température  $T$  différente de  $T_0$  les tensions  $U$  et  $U'$  sont reliées par:

$$U(T) = \frac{R}{R + r(T)} U' \quad \text{II.10}$$

$U$  est bien variable avec  $T$ .

D'autre part,  $\sigma$  restant constant et si l'on affecte de l'indice zéro toute quantité fonction de  $T$  pour désigner sa valeur pour  $T=T_0$ , on a:

$$\sigma = \frac{V_0 E_0}{U_0 K_0} \quad \text{II.11}$$

La tension d'alimentation  $U'$  et la résistance  $R$  étant constante, si l'on peut écrire dans l'intervalle de température considéré:

$$\frac{dr}{dT} = A r_0 \quad \text{II.12}$$

où  $A = \text{constante}$  et  $r_0 = r(T_0)$

soit:  $r(T) = A r_0 (T - T_0) + r_0$ .

On a compte tenu de (II.10):

$$\frac{dU}{dT} = A r_0 \frac{dU}{dr} = - \frac{U'R}{(R+r)^2} A r_0.$$

On obtient alors:

$$\frac{dU}{dr} = - \frac{U}{R+r}$$

d'où:

$$U = \frac{R + r_0}{R + r} U_0 \quad \text{II.13}$$

et, pour que  $V/U = V_0/U_0$ , il faut et il suffit que:

$$V = \frac{R + r_0}{R + r} V_0 = V_0 \frac{1}{1 + \alpha(T - T_0)}$$

où 
$$\alpha = \frac{A r_0}{R + r_0}$$

Si  $|\alpha(T-T_0)| \ll 1$  ,  $V = V_0 \left[ 1 - \alpha(T-T_0) + o(\alpha^2(T-T_0)^2) \right]$

et, de même  $U = U_0 \left[ 1 - \alpha(T-T_0) + o(\alpha^2(T-T_0)^2) \right]$

Mais (II.8), (II.9) et (II.10) assurent que l'on a:

$$\frac{V}{U}(T) = \frac{V_0}{U_0} \left( 1 + \left[ \frac{1}{K_0} \left( \frac{dK}{dT} \right)_0 - \frac{1}{E_0} \left( \frac{dE}{dT} \right)_0 \right] (T-T_0) \right) + o(\beta^2(T-T_0)^2) \quad \text{II.14}$$

avec:

$$\beta = \frac{1}{K_0} \left( \frac{dK}{dT} \right)_0 - \frac{1}{E_0} \left( \frac{dE}{dT} \right)_0$$

Alors que (II.13) permet d'écrire

$$\begin{aligned} \frac{V}{U}(T) &= \frac{V}{U_0} \left( 1 + \alpha (T-T_0) \right)^{-1} = \\ &= \frac{V}{U_0} \left( 1 - \alpha (T-T_0) \right) + o(\alpha^2(T-T_0)^2) \quad \text{II.15} \end{aligned}$$

Dans le domaine d'application qu'est le pesage, on a:

$$|T-T_0|_{\max} \approx 2 \cdot 10^1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Lorsqu'on associe par exemple une jauge en constantan avec un matériau du type V300 (nuance 45 SCD 6), on a d'après (40):

$$K_0 = 2.1 \quad , \quad \frac{1}{K_0} \left( \frac{dK}{dT} \right)_0 \approx 6 \cdot 10^{-5}$$



$$E_0 = 214000 \text{ MPa} , \quad \frac{1}{E_0} \left[ \frac{dE}{dT} \right]_0 \approx -1.4 \cdot 10^{-9}.$$

On trouve  $\beta$  tel que :  $|\beta| \approx 6 \cdot 10^{-5}$

Donc :  $\beta |T-T_0|_{\max} \approx 12 \cdot 10^{-4}$ . Ce qui justifie d'une part l'approximation que nous avons faite à  $0(\beta^2(T-T_0)^2)$  près.

(II.14) et (II.15) seront compatibles si:

$$\text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} V = V_0 \\ \frac{A r_0}{R + r_0} = - \frac{1}{K_0} \left[ \frac{dK}{dT} \right]_0 + \frac{1}{E_0} \left[ \frac{dE}{dT} \right]_0 = - \beta \end{array} \right.$$

Ce qui revient à choisir une résistance de valeur  $r_0$  à la température de référence telle que:

$$r_0 = - R \frac{\beta}{A + \beta} .$$

La quantification du terme  $\beta$  est tirée de l'essai de dérive de sensibilité du capteur. Cette dérive de sensibilité n'est liée qu'au matériau du corps d'épreuve et à la nature des jauges utilisées. Sa correction demeure identique pour toute une série de capteurs conçus à partir des mêmes matériaux de corps d'épreuve et instrumentés avec des jauges de même type.

#### e) Un faible fluage

Le fluage caractérise la particularité que possède tout capteur de délivrer un signal qui évolue au cours du temps. Le fluage du corps d'épreuve va dans le sens de la déformation: il est positif. En revanche, il apparaîtra négatif si la cause essentielle est le fluage de la jauge collée.

#### II.4.2. PROBLEMES LIES A LA JAUGE DE DEFORMATION

Les jauges de déformation, constituées d'un support isolant en matériau plastique et de brins de fil métalliques sont soumises principalement à deux types de problèmes physiques: dérives thermiques et fluage. Tout en alliant faible coût, linéarité parfaite et sensibilité maximale répondant aux exigences de résolution et de précision recherchées, leur choix doit garantir le minimum de dérive thermique et un faible taux de fluage.

##### a) Dérives thermiques du zéro.

D'un point de vue théorique, un capteur instrumenté de quatre jauges de même nature et de résistances initiales égales est insensible aux dérives thermiques du zéro. En fait, dans la pratique, ceci est difficilement réalisable à cause des deux phénomènes suivants:

a) Inégalité des résistances nominales des quatre jauges du pont de Wheatstone après leur collage sur le corps d'épreuve.

b) Pour certains types de capteur, l'éloignement relatif des jauges les unes des autres. (Ce phénomène a l'inconvénient de générer un gradient thermique entre les quatre jauges).

Pour remédier au premier phénomène, on rééquilibre résistivement le pont en insérant une résistance dans la branche convenable.

Le second phénomène se révèle d'une manière générale lors de l'élévation de température. Il induit un déséquilibre du pont de jauge et conduit par conséquent à l'apparition d'un signal fictif  $\Delta P$ .

Le signal de sortie du pont est tel que:

$$\frac{V}{U} = \frac{1}{4R} \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} R_i$$

Si le signal de sortie est une fonction linéaire de la charge, on a la relation suivante:

$$\frac{V}{U} = s P$$

$$s = \text{cte} = \frac{V_0}{U_0 P_0} ; \frac{P}{P_0} = \frac{V/V_0}{U/U_0}$$

$s$  est la sensibilité du capteur.

En posant:  $\Delta P = P - P_0$  et  $\Delta T = T - T_0$ , l'élévation  $\Delta T$  de la température entraîne :

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \left[ \frac{U_0}{V_0} \right] \left[ \frac{1}{4R} \right] \frac{\partial}{\partial T} \left[ \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} R_i \right] \Delta T \quad \text{II.16}$$

Si les dérivées thermiques des quatre jauges sont égales et de même sens, alors:

$$\frac{\Delta R_j}{\Delta T} = \frac{\Delta R_{j+1}}{\Delta T} \quad \text{pour } j=1,3 \quad \text{et } \Delta P = 0.$$

Dans le cas contraire,  $\Delta P$  est non nul. Si le sens du déséquilibre est connu, il convient de monter en série avec une résistance du pont ( $R_4$  par exemple si le déséquilibre est

négatif) une résistance  $R'_4$ , variable avec la température ( voir fig.II.4)

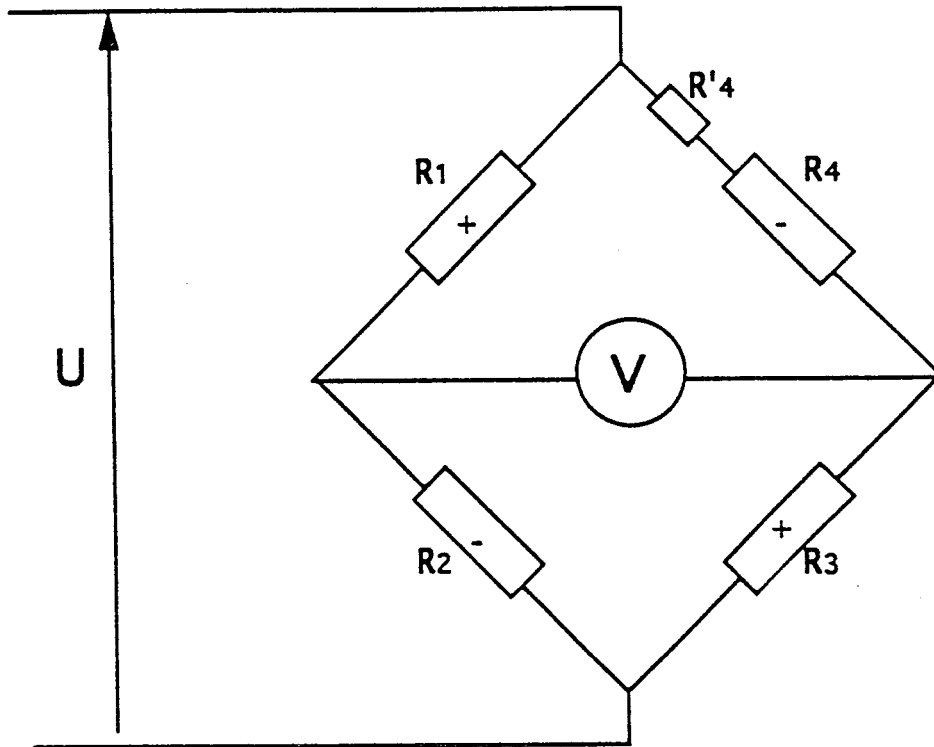


Fig II.4 : Pont de wheatstone. Correction de la dérive dérive thermique du zéro.

$R'_4$  est généralement choisie de telle sorte que:

$$\frac{\Delta R'_4}{R'_4} = A'_R \Delta T$$

Dans ce cas, on obtient avec (II.16):

$$\frac{\Delta P}{P_0} = \left[ \frac{U_0}{V_0} \right] \left[ \frac{1}{4R} \right] \left[ \frac{\partial}{\partial T} [R_1 - R_2 + R_3 - R_4] - \frac{\partial}{\partial T} (R'_4) \right] \Delta T$$

Le signal parasite  $\Delta P$  devant être annulé, on a la relation suivante:

$$\frac{\partial R'_4}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial T} \left[ R_1 - R_2 + R_3 - R_4 \right]$$

Soit une valeur de résistance  $R'_4$  telle que:

$$R'_4 = \frac{4 R}{A'_R} \left[ \frac{V_0}{U_0} \right] \left[ \frac{\Delta P}{P_0} \right]$$

#### II.4.3. PROBLEMES LIES A LA COLLE.

La phase de collage des jauges est une des plus importantes lors de la réalisation d'un capteur. Tout en assurant sa fonction de liaison, l'adhésif doit en outre transmettre avec fidélité les déformations du corps d'épreuve à la jauge. Cela suppose que les caractéristiques mécaniques du film d'adhésif soient adaptées à l'intensité des contraintes locales. En outre, quelle que soit la nature de l'adhésif, deux types de défaut apparaissent et perturbent, selon leur importance plus ou moins grande, la qualité du signal de sortie. Ce sont:

- Le fluage sous charge
- Les dérives dans le temps

Ces défauts résultent en grande partie d'une méconnaissance des caractéristiques mécaniques de l'adhésif. Ces caractéristiques dépendent en fait d'un certain nombre de paramètres qui ont une influence certaine sur la qualité de la liaison établie. Nous recensons :

- La nature du trio " métal-colle-jauge".
- Le cycle thermique de durcissement de l'adhésif.
- La pression de collage qui fixe en fait l'épaisseur du film de colle.

- Le traitement de post-cure de l'adhésif.

Les figures II.5, II.6 et II.7 indiquent d'une manière générale, tous les paramètres relatifs à l'adhésif, au corps d'épreuve et à la jauge.

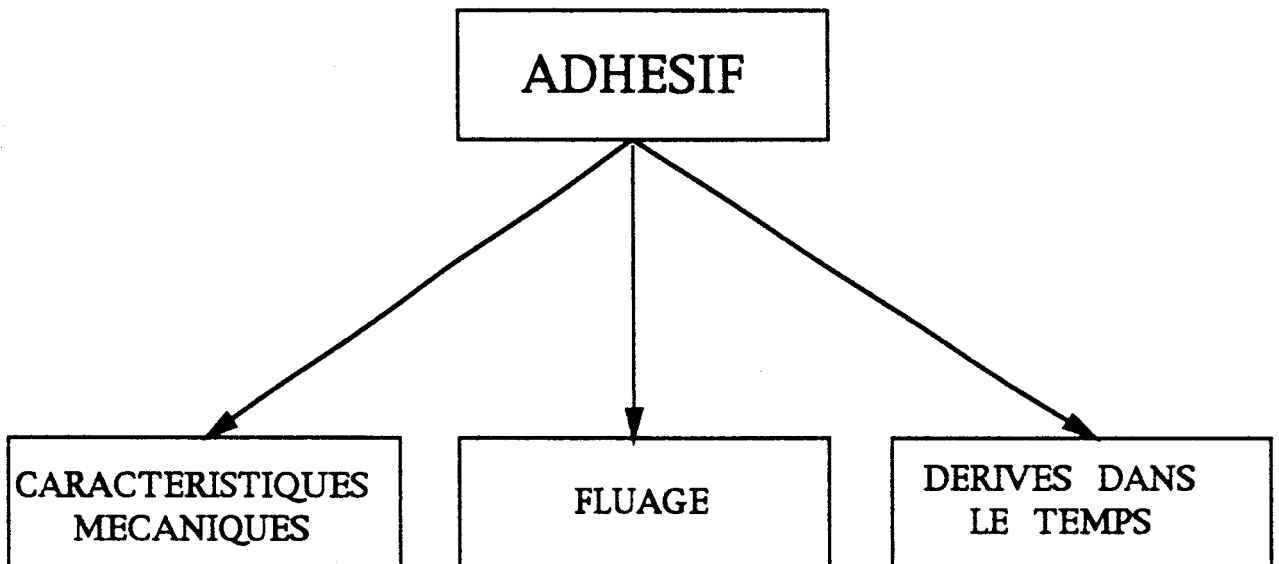


Figure II.5 : Diagramme des paramètres de l'adhésif.

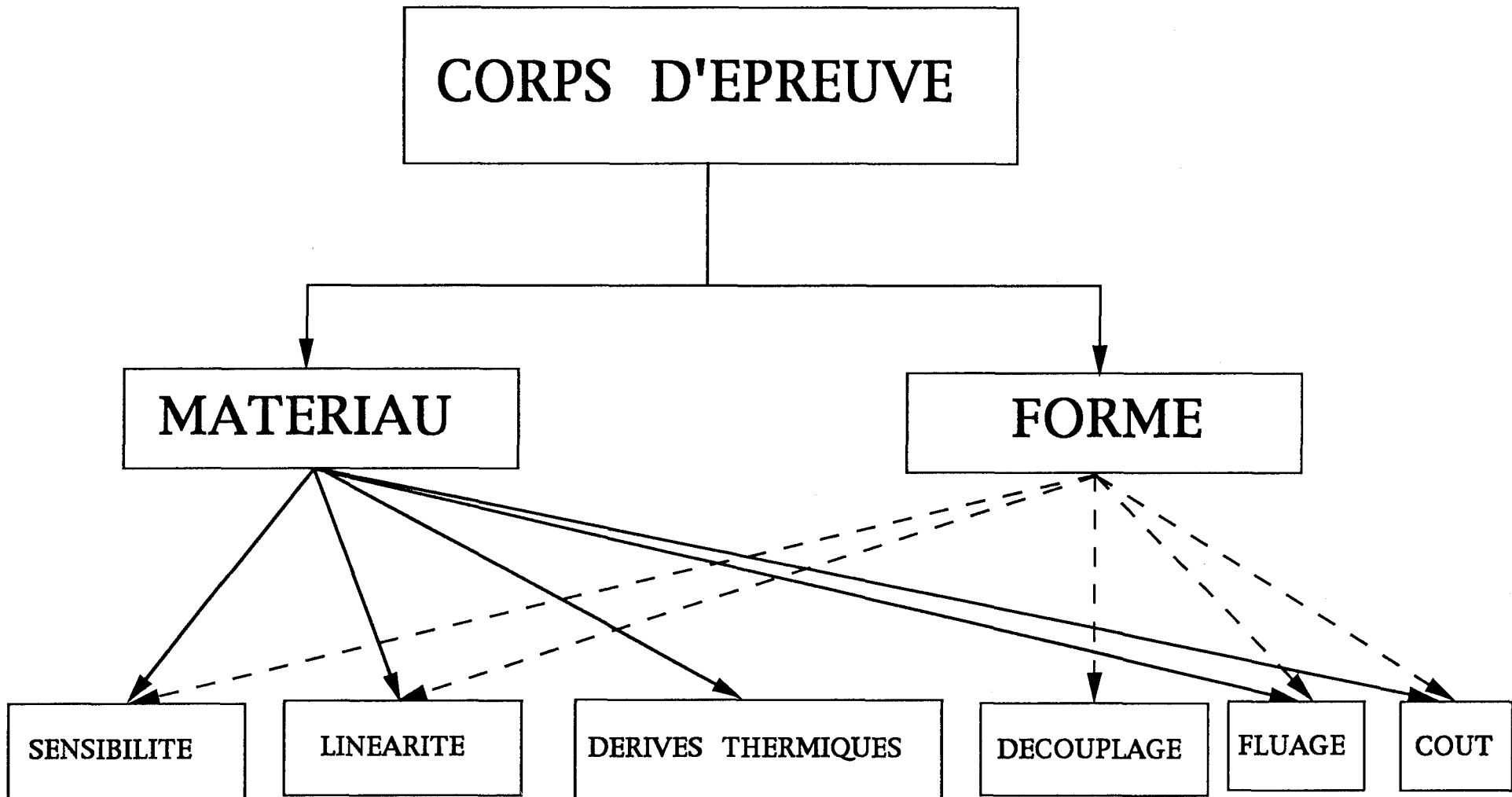


Figure II.6 : Diagramme des paramètres du corps d'épreuve.

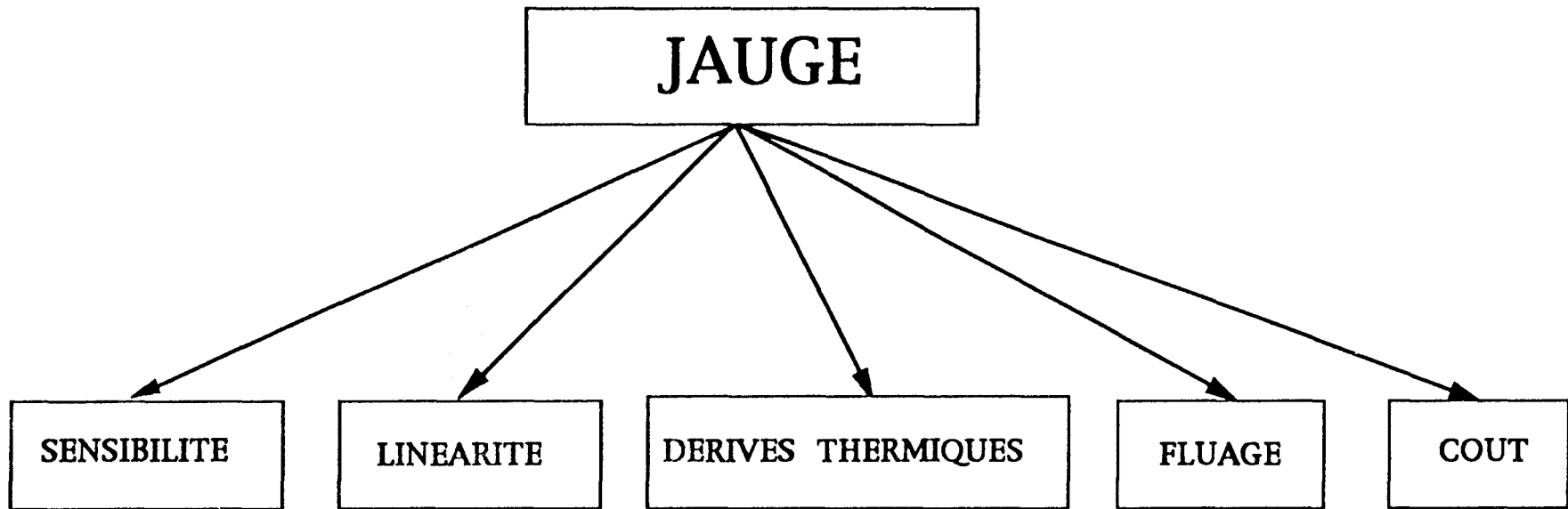


Figure II.7 : Diagramme des paramètres de la jauge.



## II.5. - CONCLUSION

On a vu que l'adhésif ( ou la colle ) intervenait dans le comportement global du capteur (corps d'épreuve/colle/jauge) à part entière. La qualité de la liaison établie entre le corps d'épreuve et la jauge dépend de la nature des forces de cohésion et d'adhésion développées par l'adhésif. Celles-ci sont liées :

- à la nature de l'adhésif (composition chimique)
- l'épaisseur du joint fixée par la pression de collage.
- cycle de cuisson ( température de cuisson et temps de cuisson ).
- traitement de post-cure.
- compatibilité adhésif/matériau du corps d'épreuve.

Tous ces paramètres, associés à une bonne définition des subjectiles ( états de surface ) contribuent à l'obtention de véritables liaisons. Il s'avère donc utile de rappeler quelques notions importantes sur les adhésifs, notions qui interviendront dans les calculs ultérieurs.

CHAPITRE III

LES ADHESIFS

### **III.1. INTRODUCTION GENERALE**

Dans la phase de réalisation des capteurs à jauges, l'adhésif joue un rôle important. Il détermine la qualité de la liaison mécanique établie entre le corps d'épreuve et la jauge. Cette liaison mécanique dépend essentiellement de la nature des forces de cohésion et d'adhésion développées entre les particules solides de l'adhésif et à travers les interfaces adhésif-substrat. Ce chapitre décrit de manière succincte: l'historique du collage, son intérêt ainsi que les grandes lignes à caractère physico-chimique ou mécanique qui régissent le mécanisme du collage.

#### **III.1.1. - HISTORIQUE**

Le collage est peut-être le premier procédé d'assemblage rationnel utilisé par l'homme. Les gravures découvertes à LOUXOR quinze siècles avant JESUS CHRIST confirment que les Egyptiens employaient déjà ce procédé d'assemblage. Cependant il a fallu attendre le début du vingtième siècle pour voir apparaître les premières applications de cette technique dans la fabrication des premiers avions. Les structures d'avion étaient alors obtenues par empilage de lamelles de bois collés. Les progrès techniques réalisés dans la chimie des matières plastiques et thermodurcissables pendant la seconde guerre mondiale ont permis l'essor de la fabrication des adhésifs. Depuis quelques décennies, on assiste à une profonde mutation de cette industrie avec, notamment, l'apparition sur le marché d'une multitude de colles synthétiques. Un progrès spectaculaire a été ensuite accompli avec l'apparition des résines époxydiques.

#### **III.1.2. - INTERET DU COLLAGE ET QUELQUES APPLICATIONS**

Le collage est un procédé d'assemblage permettant de réaliser la liaison de deux ou plusieurs matériaux (substrats) à l'aide d'un troisième (l'adhésif). Les matériaux constituant les substrats peuvent être de natures différentes. Beaucoup de

conditions sont en effet réunis pour que le collage soit considéré comme un véritable procédé d'assemblage. Son succès est dû à plusieurs avantages. Tout d'abord, c'est la seule façon connue à ce jour d'assembler deux pièces métalliques de natures différentes sans en altérer les propriétés mécaniques, physiques, ou chimiques. L'intérêt que portent les industriels à ce procédé est fondé, en grande partie sur, le gain de poids par rapport à des assemblages obtenus par rivetage, l'abaissement du prix de revient dû au gain de temps et d'énergie de mise en oeuvre.

Ses applications , dans des domaines industriels très diversifiés sont variées. Outre l'industrie du pesage à laquelle cette étude est directement liée par le collage des jauges de déformation sur les corps d'épreuve , on peut citer comme industries intéressés par ce problème :

a) Les industries aéronautiques et aérospatiales par :

- la fabrication de structures d'épaisseurs variables.
- les constructions en nid d'abeille et le collage des jauges sur les pâles d'hélicoptères.
- le collage des jauges sur corps d'épreuves de dynamomètres pour bancs d'essai.

b) L'industrie du bâtiment par :

- la menuiserie métallique.
- l'assemblage béton-béton.
- le collage des panneaux en alliages légers sur les façades de bâtiments.

c) Les industries mécaniques par :

- l'assemblage de pièces mécaniques non soumises à des efforts importants.
- la fixation de pare-brise et de vitres de véhicules.

- le collage des forets en acier rapide dans les cônes de centrage et la fixation d'électrodes pour usinage électrochimique.

### III.2. - MECANISME DU COLLAGE

Nous donnons dans ce chapitre, une explication succincte des différents phénomènes qui interviennent dans le mécanisme du collage. Ces phénomènes de type physico-chimique ou mécanique sont essentiellement fondés sur la théorie de la cohésion et de l'adhésion.

#### III.2.1.- THEORIE DE LA COHESION

La cohésion caractérise l'ensemble des forces de liaison (adhérence) qui tendent à associer les particules solides ou liquides d'un même milieu. Elle se manifeste par deux types de liaison : liaisons primaires (ou à forte énergie) et liaisons secondaires.

##### III.2.1.1.- LIAISONS PRIMAIRES

Ce sont des liaisons inter-atomiques ou chimiques qui se manifestent à des distances très courtes de l'ordre de (1 à 2 Å), elles sont de trois types : ioniques, covalentes ou métalliques.

##### III.2.1.2. - LIAISONS SECONDAIRES

Elles sont du type Van der Waals et résultent d'interaction intermoléculaires dues à la dissymétrie des charges. Contrairement aux liaisons primaires, les liaisons secondaires sont caractérisées par des distances

intermoléculaires plus grandes( de l'ordre de 3 à 5 Å). Pour cela, elles sont dites à faible énergie.

### III.2.2. - THEORIE DE L'ADHESION

L'adhésion est un phénomène physico-chimique permettant de créer des forces de liaison à l'interface de deux milieux. C'est une propriété fondamentale que doit posséder un adhésif afin que son usage garantisse la plus grande efficacité. Plusieurs théories dont nous donnons quelques aperçus décrivent ce phénomène.

#### III.2.2.1. - THEORIE MECANIQUE

Cette théorie est due aux travaux de MAC .BAIN (1). Elle est basée essentiellement sur l'étude de l'ancrage mécanique de l'adhésif sur la surface des substrats. Selon cette théorie, la colle remplit les microcavités de la surface et s'infiltré dans les pores lorsque ceux-ci existent. Ce type d'ancrage se rencontre avec des substrats tels que le papier, le bois, les tissus et l'aluminium. Dans le cas du collage aluminium - aluminium, la présence d'une couche d'oxyde poreuse, créée par anodisation permet l'infiltration par capillarité de l'adhésif. La colle épouse alors très facilement les surface à encoller.

#### III.2.2.2. - THEORIE DE LA DIFFUSION

Cette théorie est fondée sur l'interdiffusion moléculaire à l'interface colle - substrat. Celle-ci génère alors à l'interface des forces de liaison. L'interpénétrabilité moléculaire se base essentiellement sur deux critères : le critère thermodynamique et le critère cinématique. Ces deux critères traduisent respectivement le caractère soluble des

substrats et la mobilité des molécules à travers l'interface. Cette théorie a été initiée par VOYUSTKII (2) et développée par la suite par de nombreux auteurs. Les principaux travaux sur ce sujet sont dûs à :

a) KAUSH (3) qui a montré que l'énergie de rupture à l'autohésion des polymères est proportionnelle au carré du temps de contact des substrats.

b) SCHONHORN (4) et HUNSTBERGER (5) qui ont montré que le phénomène de diffusion (relativement rare) ne se produit que lorsque les substrats sont en contact intime, ce qui se traduit par une épaisseur de colle très faible.

#### III.2.2.3. - THEORIE ELECTRIQUE

DERYAGIN et KROTOVA (6) proposent d'assimiler le système colle/substrat à un condensateur dont les armatures sont les deux couches électriques formées au contact des deux substrats. L'étude du phénomène d'adhésion est alors ramenée à celle de l'attraction développée entre les deux armatures

#### III.2.2.4. - THEORIE DU MOUILLAGE

Un assemblage collé nécessite initialement un contact liquide-solide, (l'adhésif étant liquide avant polymérisation) La condition pour une parfaite adhésion sera généralement satisfaite si aucune poche de vapeur ne subsiste dans les cavités superficielles de la surface de recouvrement. Par ailleurs, l'adhésif doit pouvoir s'étaler et s'insérer très facilement dans les microcavités superficielles. D'où la nécessité que la colle possède un grand pouvoir mouillant. D'après les travaux de ZIZMAN (7), cette mouillabilité sera assurée si la condition suivante :

$$\gamma_a \leq \gamma_b \text{ est vérifiée.}$$

$\gamma_a$  et  $\gamma_b$  sont respectivement les tensions superficielles de l'adhésif et du substrat. ( la tension superficielle d'un matériau correspond à l'énergie qu'il faut lui fournir pour augmenter sa surface extérieure d'une unité).

Remarque : la mouillabilité est généralement assurée dans le cas des assemblages métalliques. En effet les métaux ont une tension superficielle élevée (de l'ordre de 500 à 8000 erg/cm<sup>2</sup> ) alors que celle des adhésifs est souvent inférieure à 50 erg/cm<sup>2</sup>

#### III.2.2.5. THEORIE CHIMIQUE

Ce modèle est basé sur l'existence de liens covalents à l'interface adhésif-substrat. Les molécules mises en jeu lors de la fabrication de l'adhésif sont conçues de manière à avoir à leur extrémités des agents de couplage correspondants aux molécules des substrats. On crée ainsi de véritables liaisons primaires (liaison à forte énergie) garantissant par la suite une meilleure résistance mécanique.

#### III.3. - CONCLUSION

A défaut d'une théorie générale sur l'adhésion et en raison du nombre important de paramètres, nous ne retiendrons que la préparation des surfaces à encoller et la condition de mouillabilité. Dans notre étude, le modèle de diffusion ne peut guère s'appliquer car, nous sommes en présence de substrats métalliques. En revanche, le critère de ZIZMAN (7) portant sur les tensions superficielles de l'adhésif et du substrat devra être vérifié afin d'assurer la condition de mouillabilité.



CHAPITRE IV

METHODE EXPERIMENTALE

#### IV.1. - GENERALITES

Comme nous l'avons vu précédemment, les adhésifs sont caractérisés par leurs qualités adhésives ( formation d'un interface avec le substrat) et cohésives. Lorsqu'il est impossible de réaliser des éprouvettes massives d'adhésif, l'évaluation de ces caractéristiques s'obtient généralement, de manière indirecte, par des essais de caractérisation mécanique sur des assemblages collés. Le comportement mécanique de ces assemblages dépend alors d'un nombre important de paramètres dont les principaux sont les suivants :

a) Paramètres liés aux substrat.

Leurs natures et dimensions géométriques.

b) Paramètres liés à l'adhésif.

- Sa nature (composition chimique).
- L'épaisseur du joint ou pression de collage.
- Cycle de cuisson (temps et température de polymérisation).

c) Traitement des surfaces et procédure d'assemblage des substrats.

- Traitement mécanique (ponçage ou sablage).
- Traitement chimique (dégraissage).
- Positionnement relatif des substrats.

d) Modalités d'essai

- Conditions d'essai: amarrage de l'éprouvette de manière à assurer un bon alignement afin d'éliminer les sollicitations parasites, vitesse d'application des charges et

température d'essai.

- Nature des sollicitations: quasi-statiques, alternées ou de longue durée.

#### REMARQUE

L'étude du comportement mécanique des adhésifs, compte tenu des paramètres évoqués ci-dessus, nécessite le choix d'un modèle expérimental adapté à la nature de la sollicitation à laquelle sera soumise l'adhésif dans les conditions réelles d'utilisation. Les deux types d'adhésif que nous étudions, spécialement conçus pour le collage des jauges de déformation et pour l'obtention de films très fins sont essentiellement soumis à des efforts de cisaillement.

La résistance au cisaillement des joints de colle dépend généralement de la géométrie de l'assemblage métallique. La ruine du film est due soit à :

- Un cisaillement préférentiel du joint par dépassement de la contrainte admissible.
- Un décollement préférentiel ou arrachement en présence de contraintes de décollement.
- Une combinaison des deux sollicitations.

Par notre montage d'étude expérimentale, nous avons essayé de ne préserver que le mode de cisaillement

préférentiel. Pour cela nous avons utilisé un assemblage symétrique à double recouvrement.

#### **IV.2. - ASSEMBLAGE SYMETRIQUE A DOUBLE RECOUVREMENT**

Afin de minimiser, voir rendre négligeable l'effet de flexion parasite dans la zone de recouvrement, nous avons choisi un montage à double recouvrement (voir fig.IV.1).

Notre corps d'épreuve est constitué de trois plaques métalliques liées entre elles par l'adhésif à tester. Les plaques supérieures, médianes et inférieures ont respectivement une épaisseur de 2.6, 5.2, et 2.6 mm. Un trou de diamètre 8 H7 situé à leurs extrémités permet l'accrochage de l'ensemble sur la machine de traction.

##### **IV.2.1. - ELABORATION DU CORPS D'EPREUVE**

Les résultats expérimentaux et leur interprétation sont étroitement liés à la géométrie et aux caractéristiques mécaniques des substrats.

Lors de l'élaboration de notre éprouvette, nous avons privilégié les trois éléments suivants :

- a) le choix des substrats
- b) le choix de l'adhésif
- c) le choix des paramètres entrant dans la mise en oeuvre de l'assemblage

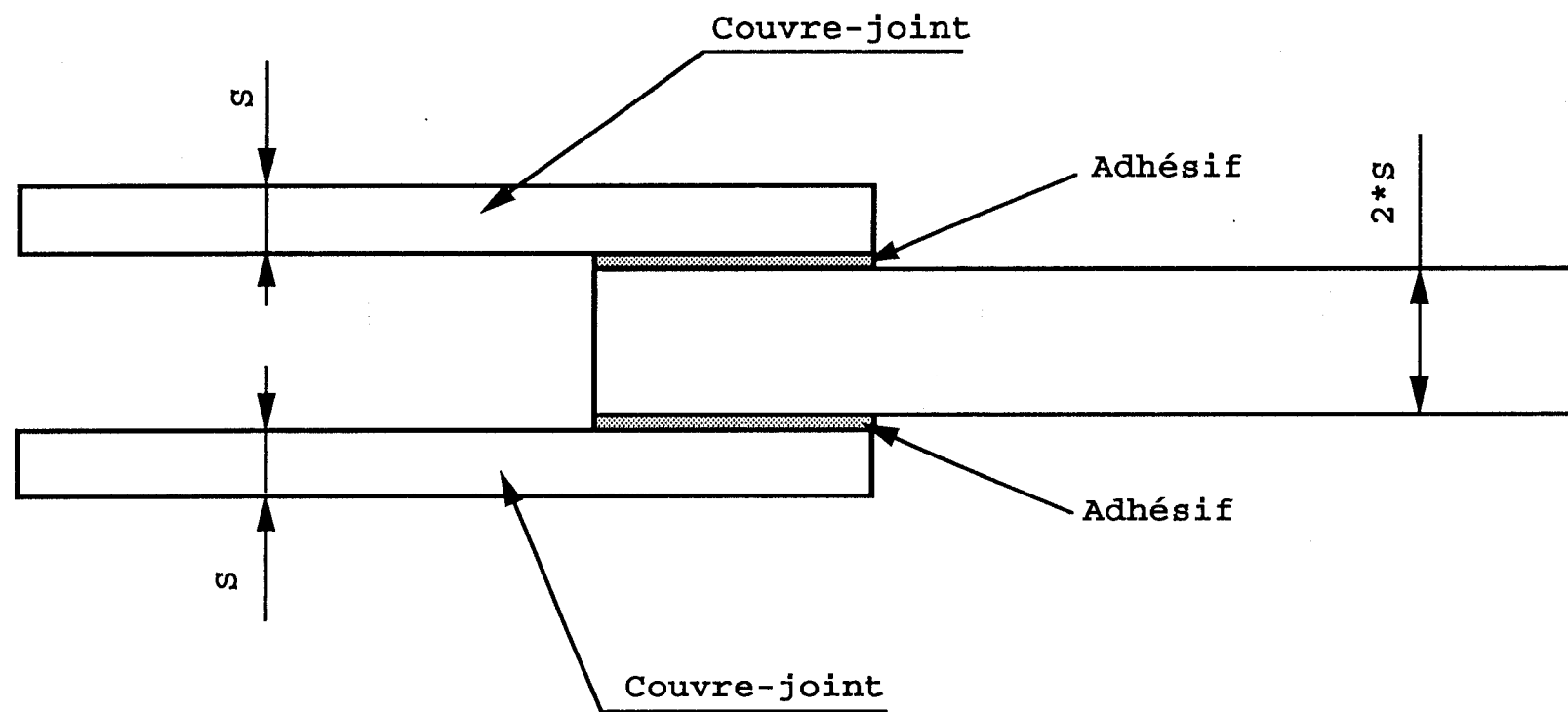


Fig.IV.1 : Schéma de l'assemblage symétrique à double recouvrement.

#### IV.2.1.1. - CHOIX DU MATERIAU DES SUBSTRATS

A défaut d'un système d'ancrage basé sur le principe de la rotule (44) et assurant un alignement correct de l'éprouvette, le corps d'épreuve a été lié à la machine de traction par l'intermédiaire d'un système comportant une double articulation cylindrique. Ce type d'ancrage nécessite des trous cylindriques à l'extrémité de chaque substrat. Afin d'éviter toute rupture prématurée dans ces sections (trouées), le choix des matériaux constitutifs des substrats a été fait de manière à ce que la charge  $F$  de traction n'excède en aucun moment la charge à la limite élastique  $F_e$  des substrats.

$$F_e = \sigma_e S (l-d) \quad (\text{IV.1})$$

où on a noté:

$F_e$  : la charge à la limite élastique  
 $\sigma_e$  : la limite élastique du matériau  
 $l$  : la largeur des substrats  
 $d$  : le diamètre du trou  
 $S$  : l'épaisseur des substrats

La condition de non plastification des substrats s'exprime par:

$$F \leq \sigma_e S (l-d) \quad (\text{IV.2})$$

En exprimant la contrainte nominale (contrainte moyenne) de cisaillement à la rupture  $\tau_{rm}$  du joint d'adhésif en fonction de la charge  $F$ , la condition de non plastification des substrats devient:

$$\sigma_e \leq \tau_{rm} \frac{2 L d}{S (l-d)} \quad (\text{IV.3})$$

$$\tau_{rm} = \frac{F_r}{1 L}$$

$F_r$  : force à la rupture

L : longueur de recouvrement

En fixant la valeur de  $\tau_{rm}$  à 50 MPa, les matériaux des substrats devront avoir une limite élastique supérieure ou égale à 590 MPa. L'acier retenu, de nuance 50 CV4 a après traitement thermique une limite élastique de l'ordre de 930 MPa.

#### IV.2.1.2. - USINAGE ET TRAITEMENTS THERMIQUES

Par prélèvement sur des plaques d'acier à ressort préalablement recuites, nous avons réalisé l'ébauche des substrats par fraisage. Les traitements thermiques indiquées dans le tableau IV.1 ont été ensuite effectués afin de garantir une limite élastique supérieure à 590 MPa.

|                |        |
|----------------|--------|
| NUANCE (AFNOR) | 50 CV4 |
| REVENU         | 500 °C |
| TREMPE (EAU)   | 870 °C |

Tableau IV.1: Nuance et traitements thermiques des substrats.

Après traitement thermique, les substrats ont été usinés en finition à l'outil meule. Ce procédé d'usinage engendre à vitesse de coupe et à profondeur de coupe optimale une couche de Belbi de bonne planéité et un meilleur état de surface. Le substrat présente cependant une différence de dureté au coeur et en peau. Bien que l'état de surface rectifiée finement soit satisfaisant, il aurait été préférable

d'appliquer un traitement de sablage préconisé par (12), (45), (46), (47), (48) et (49).

### IV.3. - LES ADHESIFS UTILISES

#### IV.3.1 - GENERALITES

Les adhésifs testés sont de deux types. Spécialement conçus pour le collage des jauges (Vishay Micromesures), sondes thermiques et indicateurs de fatigue, ils se présentent sous la forme de deux composants (résine époxyde et durcisseur) très fluides. Le caractère fluide du mélange résine-durcisseur confère ainsi à la colle une facilité d'application sur les surfaces à lier et permet en outre l'obtention de films très fins sous des pressions relativement modérées.

#### IV.3.2. - CARACTERISTIQUES

Bien que le domaine d'utilisation de ces deux colles soit le même, leurs cycles de polymérisation respectifs demeurent différents. Les diagrammes de la figure IV.1 et IV.2 montrent les cycles thermiques recommandés par le fabricant. Les seules caractéristiques données sont illustrées dans le tableau IV.2.

|                                 |         |                |
|---------------------------------|---------|----------------|
| TEMPERATURE                     | -269 °C | 24 °C à 260 °C |
| ALLONGEMENT<br>(VALEUR ABSOLUE) | 1%      | 3%             |

Tableau IV.2 : Caractéristiques des adhésifs M<sub>1</sub> et M<sub>2</sub> selon le fabricant.



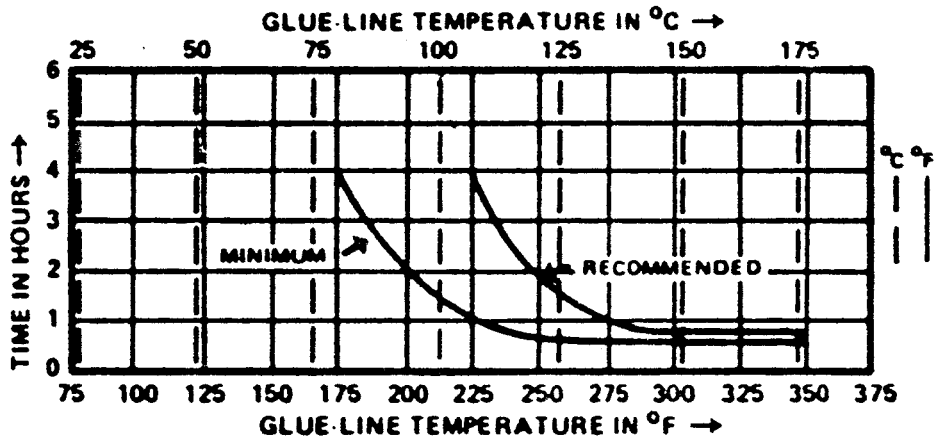


Figure IV.2 : Diagramme de cuisson. Colle M<sub>1</sub> selon le fabricant.

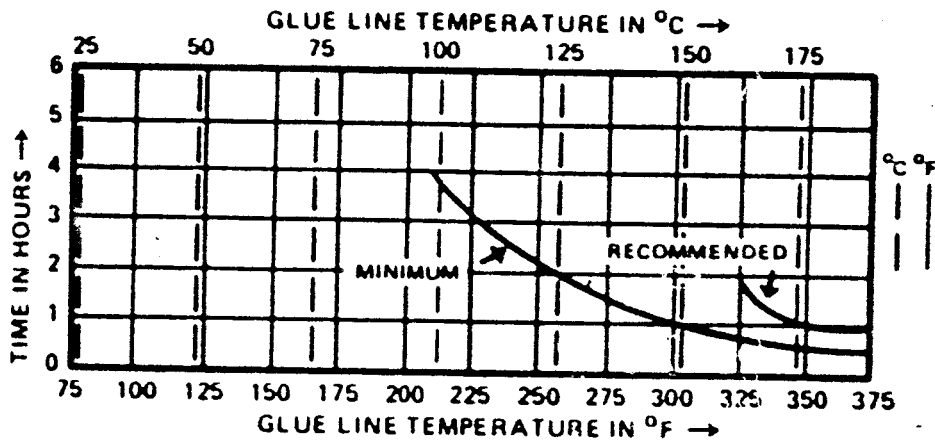


Figure IV.3 : Diagramme de cuisson. Colle M<sub>2</sub> selon le fabricant.

**REMARQUE**

Un grand nombre de paramètres dont nous connaissons peu ou mal l'influence, conditionnent la qualité du produit collé. En ce qui concerne spécialement le collage des jauges de déformation, les spécifications et les notices techniques données par le fabricant (Vishay Micomesures) demeurent bien souvent incomplètes. En général, elles ne donnent qu'une évaluation succincte des caractéristiques mécaniques (voir tableau IV.3). Il convient alors de caractériser, à l'aide d'essais destructifs la tenue mécanique en cisaillement du joint en fonction des paramètres de durcissement (cuisson).

**IV.4. - PROCEDURE D'ELABORATION DES ASSEMBLAGES****IV.4.1. - GENERALITES**

Outre les défauts géométriques relatifs aux conditions d'amarrage de l'éprouvette sur la machine de traction, les conditions de mise en oeuvre des assemblages peuvent être une source importante de dispersion des résultats expérimentaux. Trois étapes importantes nous ont guidé dans cette procédure :

- a) - **Traitement des surfaces de recouvrement et encollage.**
- b) - **Assemblage des substrats et ancrage sur la machine.**
- c) - **Choix d'un cycle thermique de durcissement.**

**IV.4.2. - TRAITEMENT DES SURFACES ET ENCOLLAGE**

La préparation des surfaces a surtout pour but d'éliminer ou de minimiser les défauts d'adhérence, par création de sites actifs sur les subjectiles (surfaces élaborées sur laquelle on applique l'adhésif par un procédé reproductible). Cette surface doit avoir en principe une

rugosité adaptée aux dimensions moyennes des charges minérales ou élastomères qui font partie de la composition de l'adhésif. Une bonne adhésion sera donc obtenue si la forme des sites est compatible avec la nature de l'adhésif. Lorsque l'adhésif est chargé (présence de charges ou d'insertions), Y. GILIBERT et C. COLLOT (32) ont préconisé la création de cavités superficielles dans les substrats afin de permettre aux insertions de participer à l'adhérence. Dans notre cas, le caractère fluide des adhésifs utilisés, nous a conduit à effectuer un ponçage à l'aide d'un papier abrasif ( taille de grain 220 ) suivi d'un dégraissage au trichloroétane (agent chimique dégraisseur ). La neutralité de ce produit vis à vis des parties métalliques et son pouvoir dégraissant élevé assurent ainsi une surface chimiquement propre. La colle (mélange de résine époxyde et de durcisseur) est ensuite étalée sur les surfaces de liaison. Un temps de gommage (temps s'écoulant entre l'encollage et l'assemblage des substrats) d'environ cinq minutes a été chaque fois observé afin de permettre l'évaporation des agents solvants présents dans le mélange adhésif-durcisseur.

#### **IV.4.3. - ASSEMBLAGE DES SUBSTRATS**

Deux montages similaires ( figure IV.4 ) ont été conçus afin de permettre l'alignement et le positionnement relatif des substrats. Un système vis-ressort permet d'appliquer une pression uniforme sur les films d'adhésif. Chaque montage reçoit six assemblages et permet d'assurer ainsi une bonne reproductibilité géométrique des éprouvettes.

#### **IV.4.4. - CYCLE THERMIQUE DE DURCISSEMENT**

C'est la troisième opération permettant de procurer au film de colle une résistance mécanique appropriée. L'utilisation industrielle en dépend très fortement car c'est elle qui déterminera la nature et la qualité de la liaison établie d'une part entre les substrats et l'adhésif (liaison adhésive ) et d'autre part entre les chaînes moléculaires de la

coupe A-A

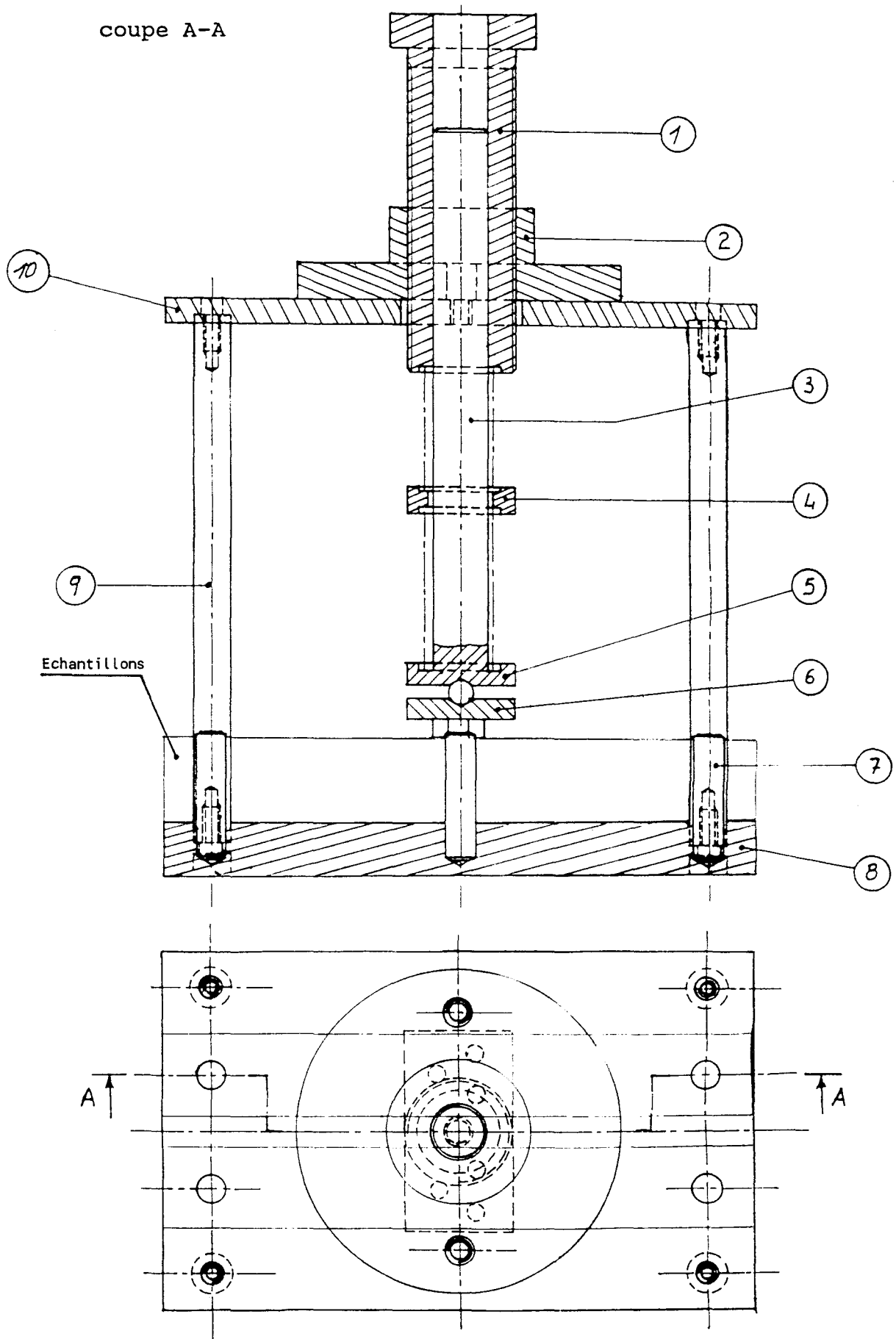


Figure IV.4 : Schéma du montage de positionnement.

colle (liaison cohésive ). Ces liaisons seront d'autant plus fortes et efficaces que le traitement de durcissement sera bien mené et adapté à la nature de l'adhésif.

Trois principaux paramètres caractérisent ce traitement de durcissement et déterminent finalement la résistance mécanique du joint d'adhésif. Ce sont:

- La pression de collage.
- La température de cuisson (T).
- Le temps de cuisson (t) à la température T.

#### IV.5. - CONCLUSION

L'étude de l'élaboration du corps d'épreuve proposée ci-dessus permet de caractériser convenablement le comportement mécanique à la rupture par cisaillement des films d'adhésifs. Le caractère symétrique de la géométrie de notre éprouvette expérimentale permet de rendre petite donc apparemment négligeable l'influence de la flexion des couvre-joints extérieurs en dehors de la zone de recouvrement et dans la zone voisine du recouvrement.

Par ailleurs, nous mettons en évidence trois paramètres ayant une influence certaine sur la tenue mécanique du joint.

En fait, c'est l'évaluation de cette tenue mécanique en fonction des paramètres de durcissement de l'adhésif qui fera l'objet de notre travail expérimental.

CHAPITRE V

TRAITEMENTS DE DURCISSEMENT DES FILMS D'ADHESIF,  
ESSAIS ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

## V.1. - INTRODUCTION

Dans cette partie de l'étude, nous nous intéressons à l'influence des paramètres prépondérants sur la tenue mécanique des deux adhésifs décrits dans le chapitre III. Les connaissances actuelles sur le comportement rhéologique des adhésifs étant peu nombreuses dans le domaine, le comportement viscoélastique linéaire (ou non linéaire) n'est pas souvent pris en compte. Cependant, les méthodes de calcul bien que fondées sur des hypothèses simplificatrices permettent d'approcher la répartition des contraintes dans les assemblages collés sous l'hypothèse de comportement élastique. La prévision des performances nécessite alors de connaître :

- la loi de comportement de l'adhésif et du substrat
- un critère de rupture de l'adhésif associé à la loi de comportement complexe de l'assemblage qui constitue une structure collée à part entière.

Bien que tous ces thèmes fassent actuellement l'objet de nombreux sujets de recherche, nous nous intéressons à l'étude expérimentale des paramètres pouvant améliorer les propriétés adhésives et cohésives des adhésifs. La démarche et la méthodologie que nous avons définies pour l'obtention des films d'adhésif, la nature des essais mécaniques préconisés ont été approuvés par les industriels du pesage ; elles intègrent très largement leurs préoccupations actuelles.

Le traitement de durcissement des deux adhésifs est obtenu par élévation de température. L'obtention d'un film très fin d'adhésif entre le corps d'épreuve du capteur et la jauge de déformation nécessite l'application d'une pression sur cette dernière. L'épaisseur du film sera d'autant plus uniforme que la pression sera également répartie sur la surface de la jauge. En l'occurrence, trois paramètres interviennent essentiellement dans l'amélioration de la qualité de la liaison établie :

- la température de cuisson

- le temps de cuisson
- la pression de collage.

L'organigramme décrit dans la figure V.1 donne les grandes lignes de la procédure utilisée pour l'obtention des films d'adhésif dans les assemblages.

Les procédures de conditionnement des surfaces à encoller et de positionnement des substrats ont déjà été décrites dans le chapitre III.

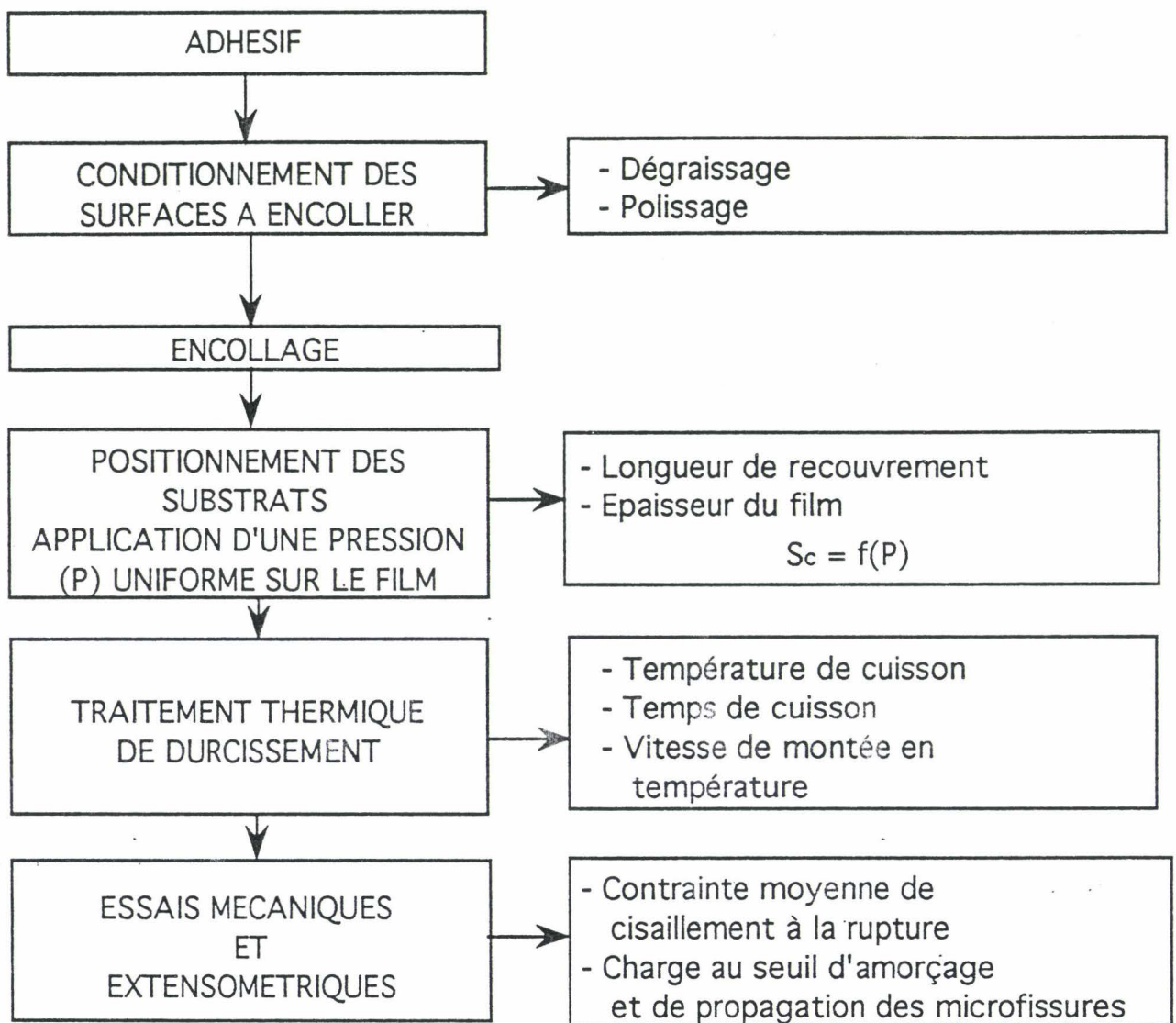


Fig. V.1: Organigramme de l'étude expérimentale.



## V.2. - CONDITIONS D'ESSAIS ET METHODE EXPERIMENTALE

Tous les films ont été éprouvés en cisaillement par traction sur les substrats. La machine utilisée est une machine de traction pilotée (INSTRON 8022). La vitesse de déplacement imposée au vérin a été fixée pour tous les essais, à la valeur de  $1 \text{ mm.mn}^{-1}$ . Le système d'amarrage (fig. V.2) que nous avons mis au point a permis de minimiser de manière très considérable les défauts géométriques induits par le manque de coaxialité entre l'axe géométrique de la machine et celui de symétrie de l'assemblage. Ainsi, ont pu être éliminées les ruptures prématurées dues à ces défauts.

L'éprouvette expérimentale (assemblage à double recouvrement), définie par la figure V.3, associée à son système d'ancrage sur la machine de traction (fig. V.2) permet de minimiser la flexion des substrats extérieurs. L'assemblage est alors sollicité en traction pure en dehors de la zone de recouvrement. Les tests, effectués à température ambiante (voisine de  $20^{\circ}\text{C}$ ) permettent la détermination des charges ultimes nécessaires pour provoquer la rupture du film d'adhésif. La contrainte moyenne de cisaillement à la rupture est ensuite obtenue après avoir déterminé la charge moyenne ultime sur une population de six assemblages élaborés suivant les mêmes procédures. Les surfaces à encoller (subjectiles) de rugosité moyenne  $R_t = 2.4 \mu\text{m}$  ont subi un dégraissage au trichloroéthane. L'obtention d'éprouvettes géométriquement reproductibles a été rendue possible à l'aide du montage décrit dans le chapitre IV (figure IV.4)

## V.3. - ESSAIS PRELIMINAIRES

Les notices relatives à chaque type d'adhésif utilisé ne spécifient pas de manière très précise les caractéristiques mécaniques (contraintes à la limite élastique et à la rupture, module de Young, coefficient de Poisson...). En fait, l'étude des caractéristiques mécaniques et celle du comportement méca-

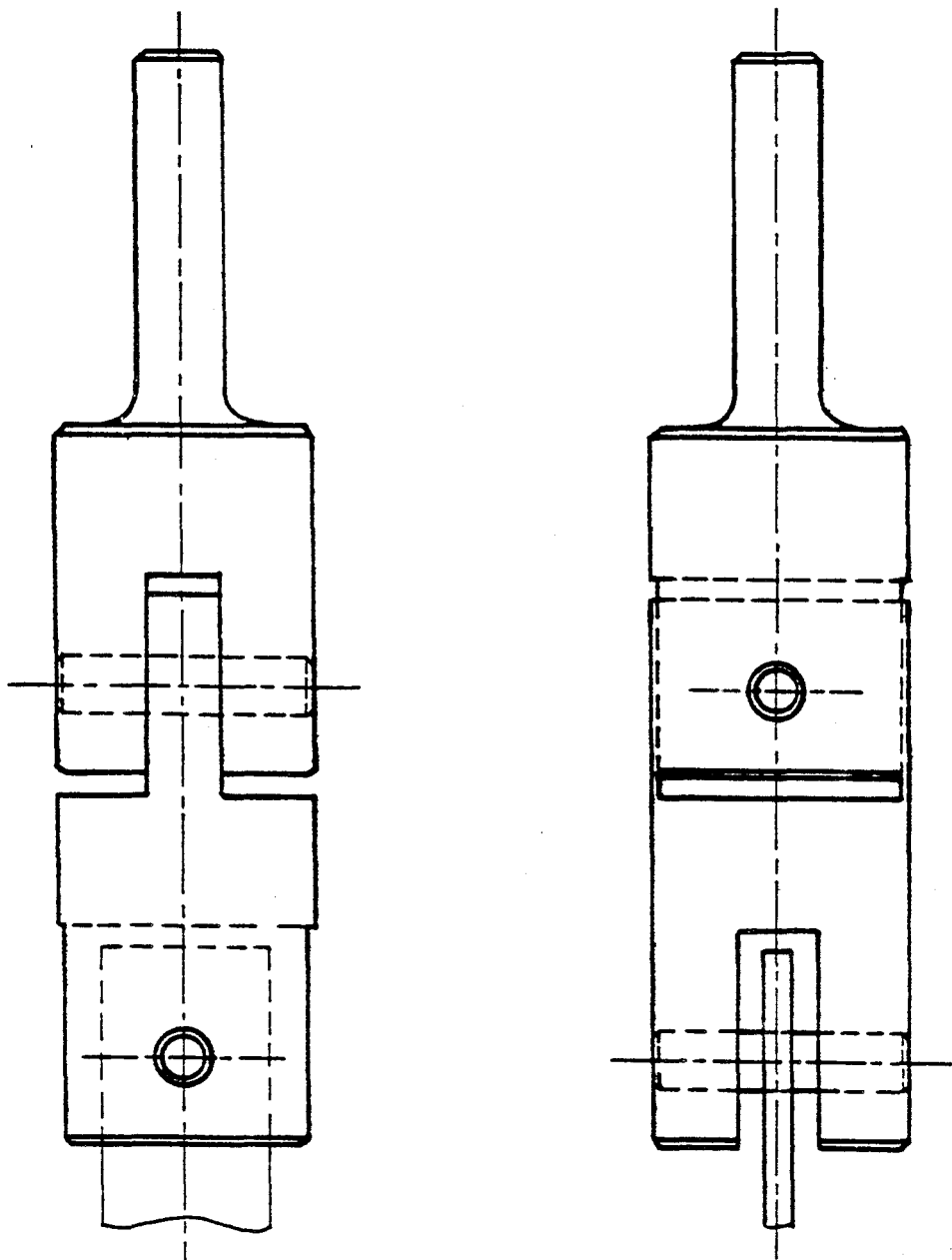


Fig V.2 : Schéma du dispositif d'amarage de l'assemblage sur la machine de traction.

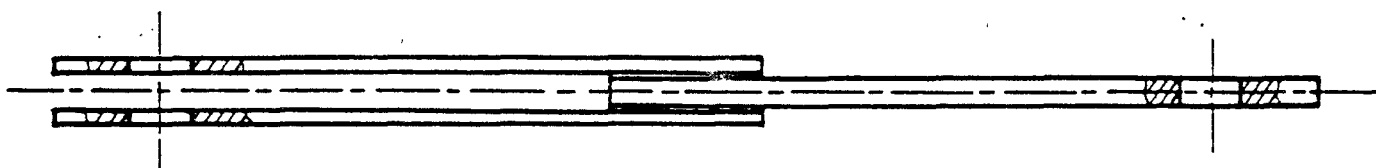


Fig V.3 : Assemblage symétrique à double recouvrement utilisé lors des essais préliminaires.  
 Epaisseur  $S$  des tôles: 1.75 mm.  
 Longueur de recouvrement  $L$ : 20 mm.

-nique vis-à-vis des sollicitations extérieures s'obtient à l'aide de tests réalisés soit sur des éprouvettes massives en colle ou sur des assemblages collés. L'obtention d'éprouvettes massives est fortement conditionnée par la nature de la formulation de l'adhésif (liquide très ou peu visqueux, rigide) ainsi qu'à la présence d'éléments volatils provoquant un dégazage lors du cycle thermique de durcissement.

En raison de la fluidité des adhésifs, toutes les tentatives d'obtention d'éprouvettes massives que nous avons menées se sont avérées longues et infructueuses. En revanche, les essais mécaniques que nous préconisons sur les assemblages collés permettent de caractériser, en fonction des paramètres de durcissement de la colle, l'intensité des charges qui entraînent la ruine du joint d'adhésif. Ainsi, dans le souci d'une meilleure adaptation expérimentale, des essais préliminaires ont été réalisés sur un corps d'épreuve dont la forme et le dispositif d'amarrage ont déjà été décrits dans la figure V.2 et V.3. L'étude expérimentale de la variation de la résistance au cisaillement en fonction de la pression de collage a été faite pour un seul adhésif. Les procédures de durcissement (cycles thermiques) retenues sont, en ce qui concerne les essais préliminaires similaires à celles retenues par le fabricant. Soit : 1 heure à 175 °C (cuisson) et 2 heures à 80 °C (post-cuisson). La mesure de la température du film d'adhésif a été réalisée à l'aide d'un thermocouple, en contact avec une surface située dans le proche voisinage de la zone de recouvrement. Afin de mieux suivre le cycle thermique de durcissement du joint d'adhésif, nous avons enregistré l'évolution de la température de cuisson du joint en fonction du temps. Les courbes représentées par les figures V.4 et V.5 indiquent les courbes représentatives de ces évolutions. Les variations de température en fonction du temps sont relatives aux traitements de cuisson et de post-cuisson préconisés par le fabricant. Les ressorts utilisés pour appliquer une pression uniforme sur le film d'adhésif ont été également testés en compression. La figure V.6 donne la variation de la force de compression en fonction de l'écrasement.

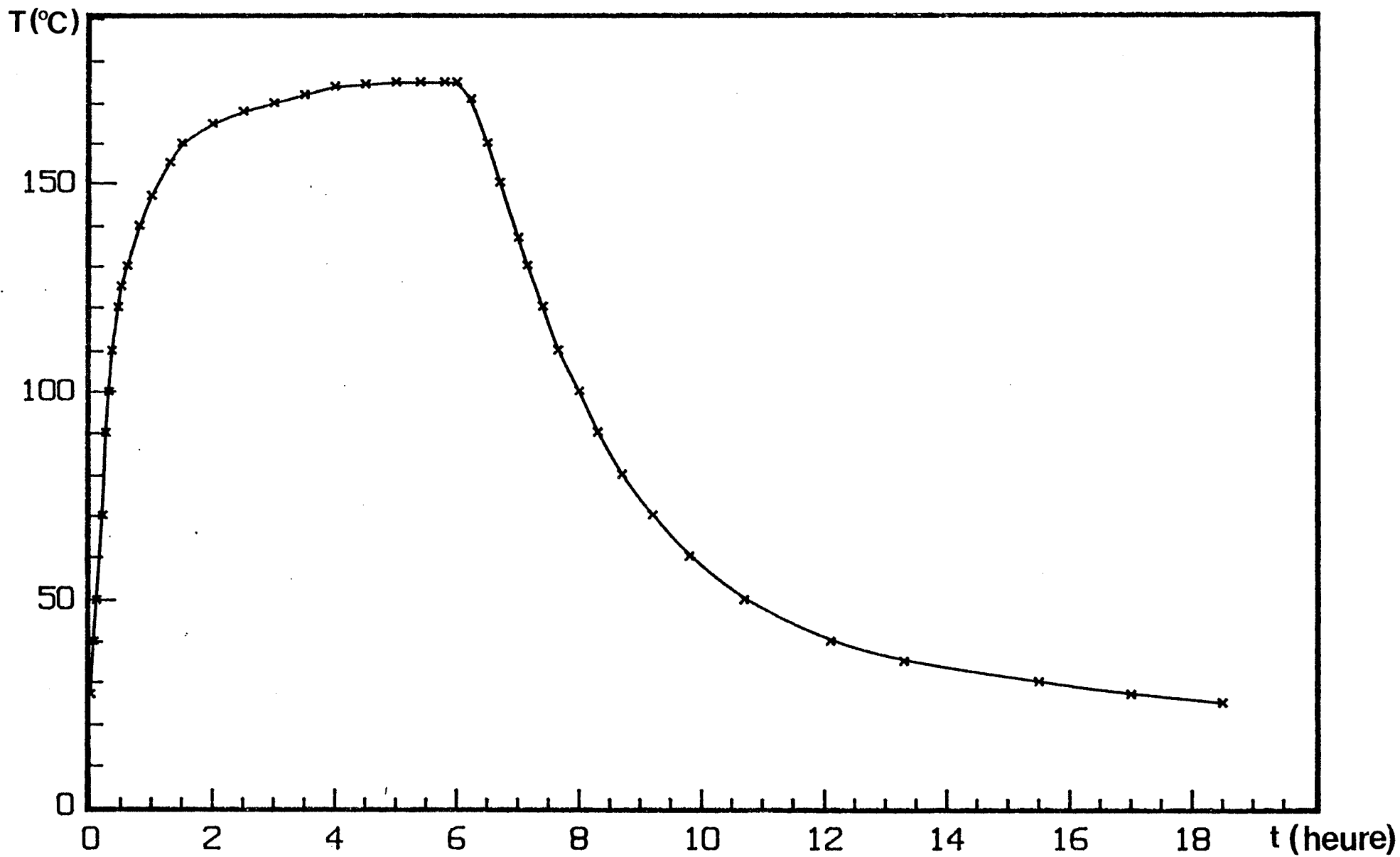


Figure V.4 : Cycle de cuisson. Variation de la température ( $T$ ) de prise à chaud en fonction du temps ( $t$ ) de cuisson.

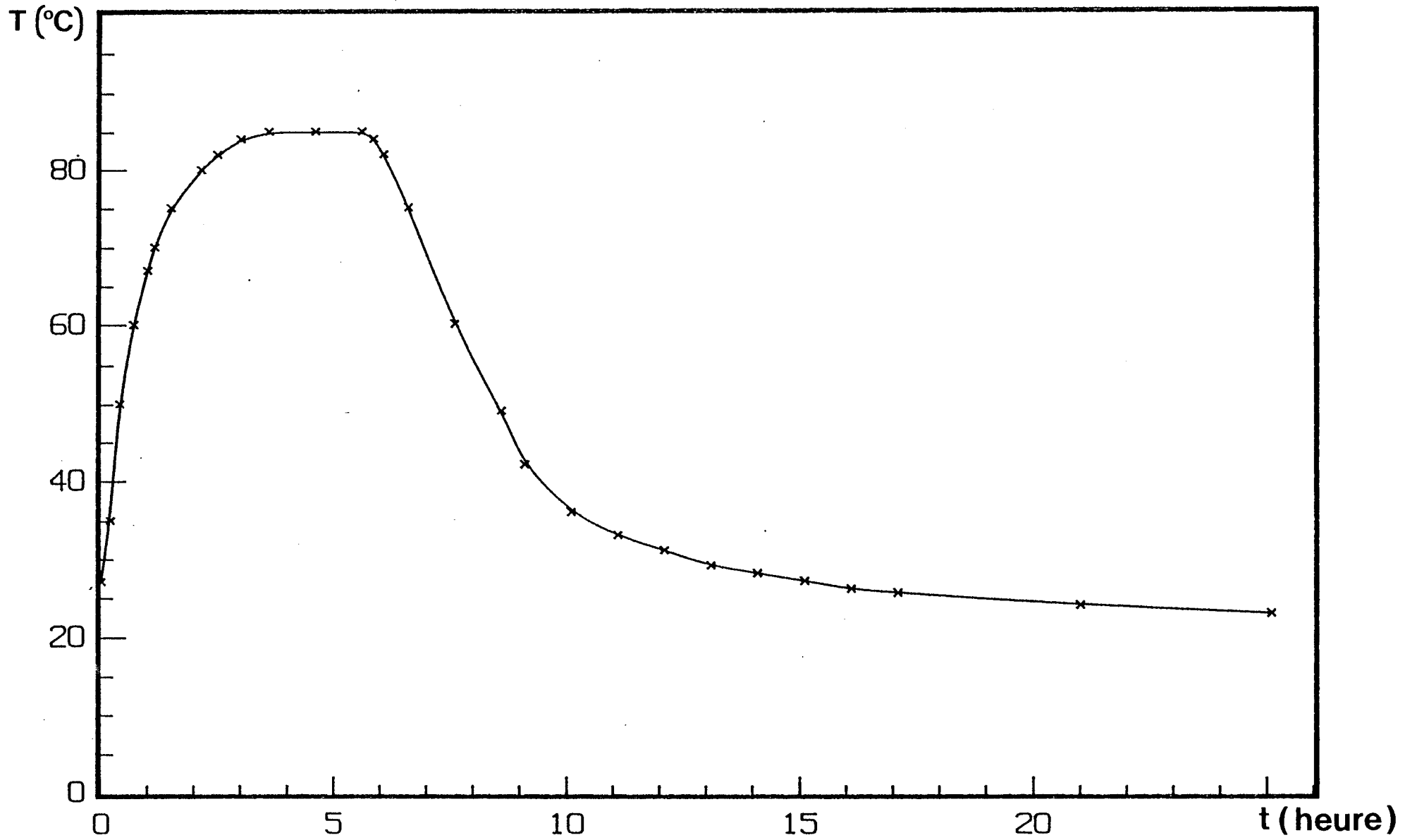
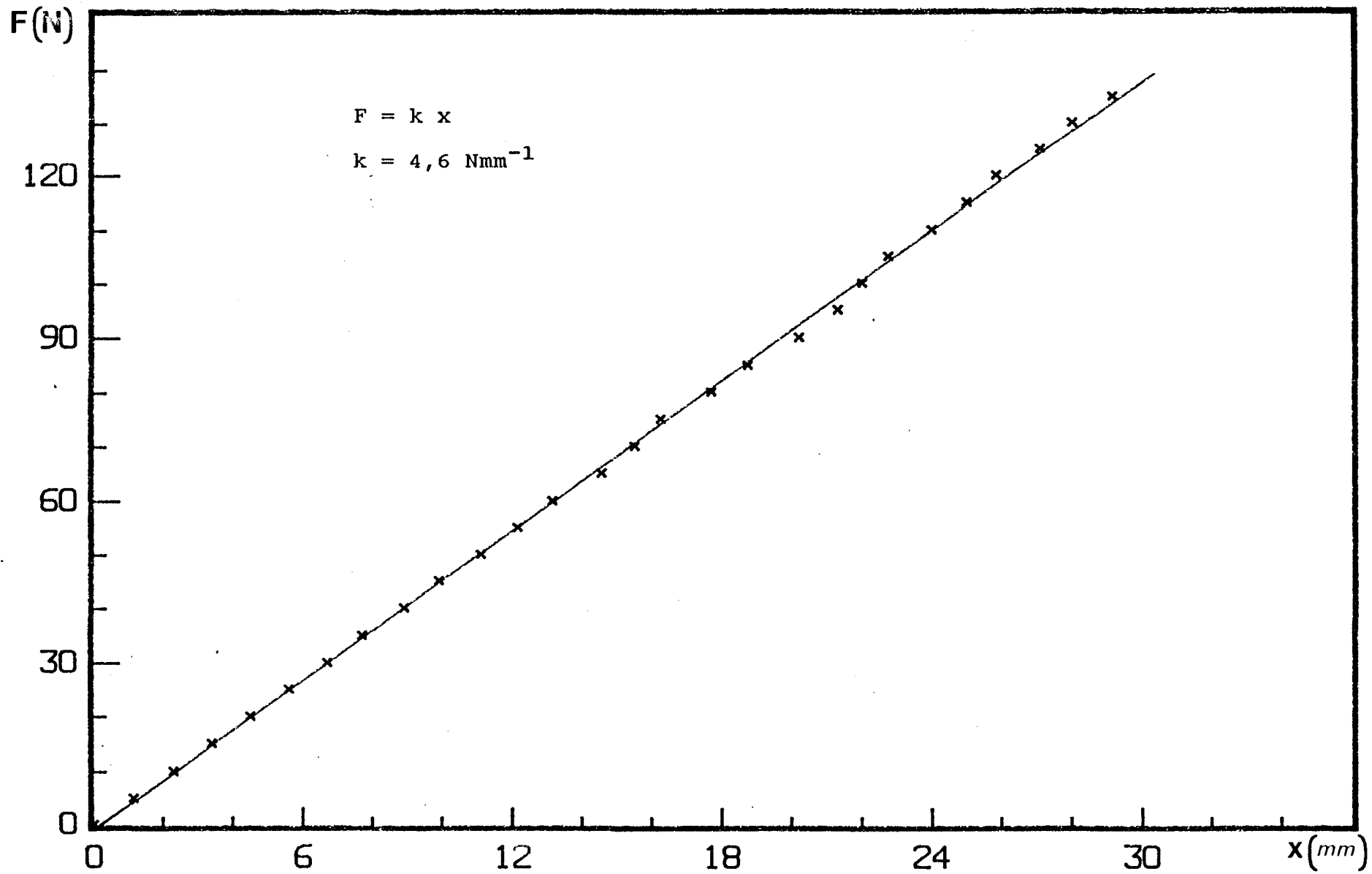


Figure V.5 : Cycle de post-cuisson. Variation de la température ( $T$ ) de prise à chaud en fonction du temps ( $t$ ) de cuisson.



ETALONNAGE DU RESSORT.

Figure V.6 : Effort (F) d'écrasement en fonction du déplacement  $x$  du ressort.

**V.3.1. - Variation de la résistance au cisaillement en fonction de la pression de collage.**

Outre la variation de la pression de collage, nous avons étudié l'influence du temps ouvert (temps s'écoulant entre l'encollage des subjectiles et l'assemblage des substrats). Deux cas ont été observés. Le premier cas (resp. le deuxième) correspond à un temps ouvert nul  $t=0$  (resp. 1 heure).

Les tableaux V.1 et V.2 donnent, pour chaque pression de collage, les valeurs moyennes des forces ultimes et des contraintes moyennes de cisaillement à la rupture.

|                   | $P_c$ (bar)         |      |      |      |      |      |      |
|-------------------|---------------------|------|------|------|------|------|------|
|                   | 0,8                 | 1    | 1,3  | 1,4  | 1,8  | 2,4  | 3    |
| $F_u$<br>(daN)    | 2400                | 2270 | 2277 | 2080 | 2300 | 2524 | 2500 |
|                   | 2498                | 2332 | 2200 | 1970 | 1969 | 2424 | 2900 |
|                   | 2839                | 2150 | 2300 | 2500 | 2208 | 2374 | 2800 |
|                   | 2300                | 2273 | 2284 | 1790 | 2640 | 2345 | 2700 |
|                   | 2900                | 2300 | 2250 | 1776 | 2300 | 2400 | 2780 |
|                   | 2600                | 2340 | 2307 | 1730 | 2400 | 2450 | -    |
|                   | $F_u$<br>moy. (daN) | 2589 | 2277 | 2269 | 1974 | 2302 | 2419 |
| $\tau_{rm}$ (MPa) | 28,1                | 24,7 | 24,6 | 21,4 | 25   | 26,2 | 29,7 |

Tableau V.1 : Forces ultimes et résistances au cisaillement en fonction de la pression de collage.

Temps ouvert = 0. Adhésif M<sub>1</sub>

|                              |      | P <sub>c</sub> (bar) |      |      |      |      |     |   |
|------------------------------|------|----------------------|------|------|------|------|-----|---|
|                              |      | 0,8                  | 1,2  | 1,6  | 2    | 2,8  | 3,8 | - |
| F <sub>u</sub><br>(daN)      | 1271 | 1505                 | 1581 | 2177 | 1800 | 1940 | -   |   |
|                              | 1292 | 1293                 |      |      |      |      |     |   |
|                              | 1641 | 1411                 | 2050 | 2718 | 1423 | 2090 | -   |   |
|                              | 1072 | 1366                 |      |      |      |      |     |   |
|                              | 1406 | 1287                 | 2499 | 2678 | 1202 | 1080 | -   |   |
|                              | 1493 | 1243                 |      |      |      |      |     |   |
|                              | 1452 | 1175                 | 1877 | 2400 | 1872 | 2202 | -   |   |
|                              | 1207 | 1072                 |      |      |      |      |     |   |
| 1365                         | 1282 | 1606                 | 2076 | 2183 | 1723 | -    |     |   |
| 1135                         | 1172 |                      |      |      |      |      |     |   |
| 1180                         | 1367 | 1482                 | -    | 1663 | 1941 | -    |     |   |
| -                            | -    |                      |      |      |      |      |     |   |
| F <sub>u</sub><br>moy. (daN) | 1319 | 1288                 | 1849 | 2410 | 1690 | 1829 | -   |   |
| T <sub>rm</sub> (MPa)        | 14,3 | 14                   | 20   | 26,2 | 18,3 | 19,8 | -   |   |

Tableau V.2 : Forces ultimes et résistances au cisaillement en fonction de la pression de collage.

Temps ouvert = 1 heure. Adhésif M<sub>1</sub>

Les courbes représentant les variations des contraintes moyennes de cisaillement à la rupture en fonction de la pression de collage sont illustrées par les figures V.7 et V.8. Les paramètres de cuisson sont donnés par:

- Température de prise à chaud : 175 °C
- Température de post-cuisson : 80 °C

Afin de faciliter toute comparaison entre les deux courbes, celle de la figure V.7 a été tracée en pointillé sur la figure V.8



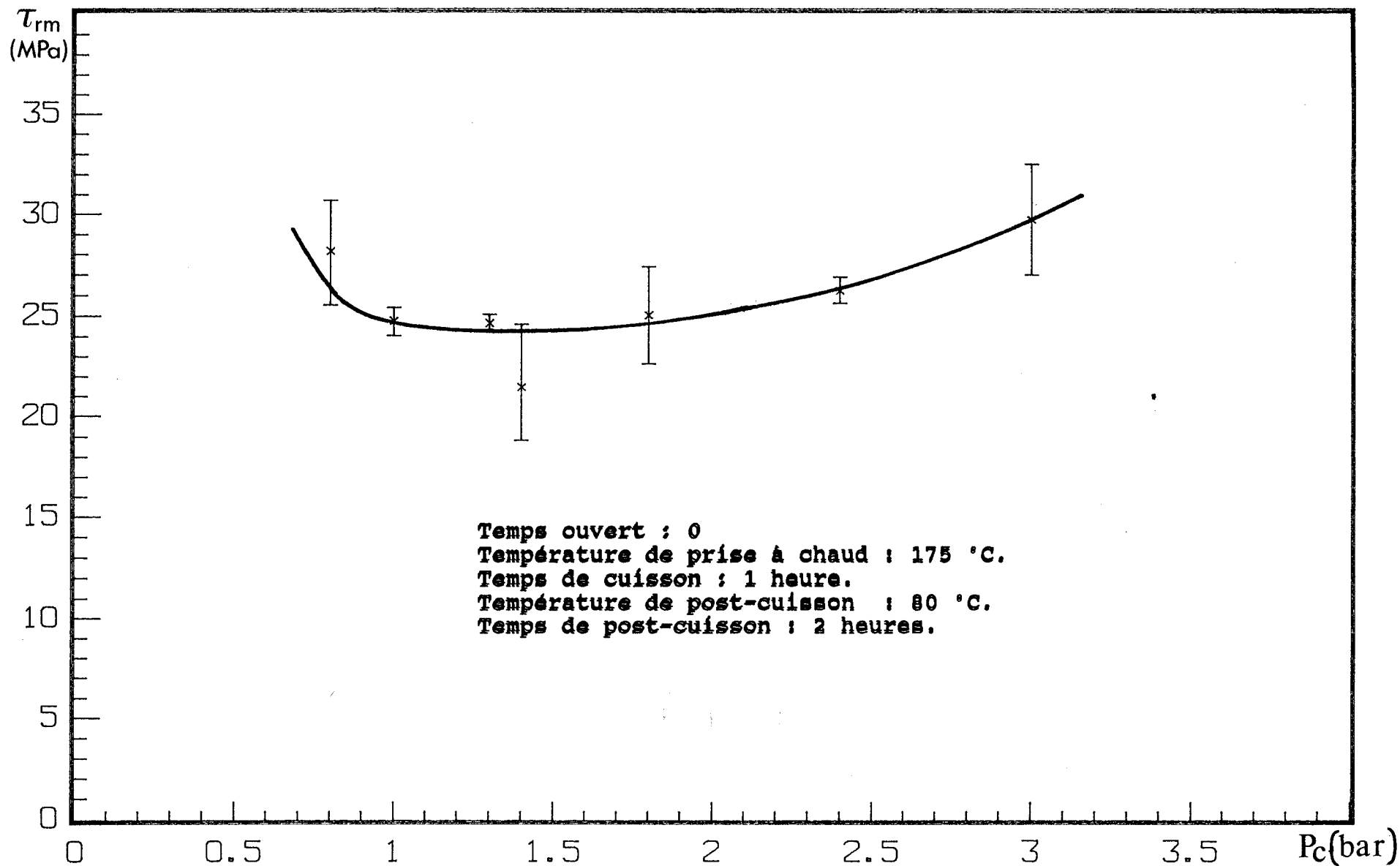


Figure V.7 : Variation de la résistance au cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction de la pression de collage  $P_c$ .

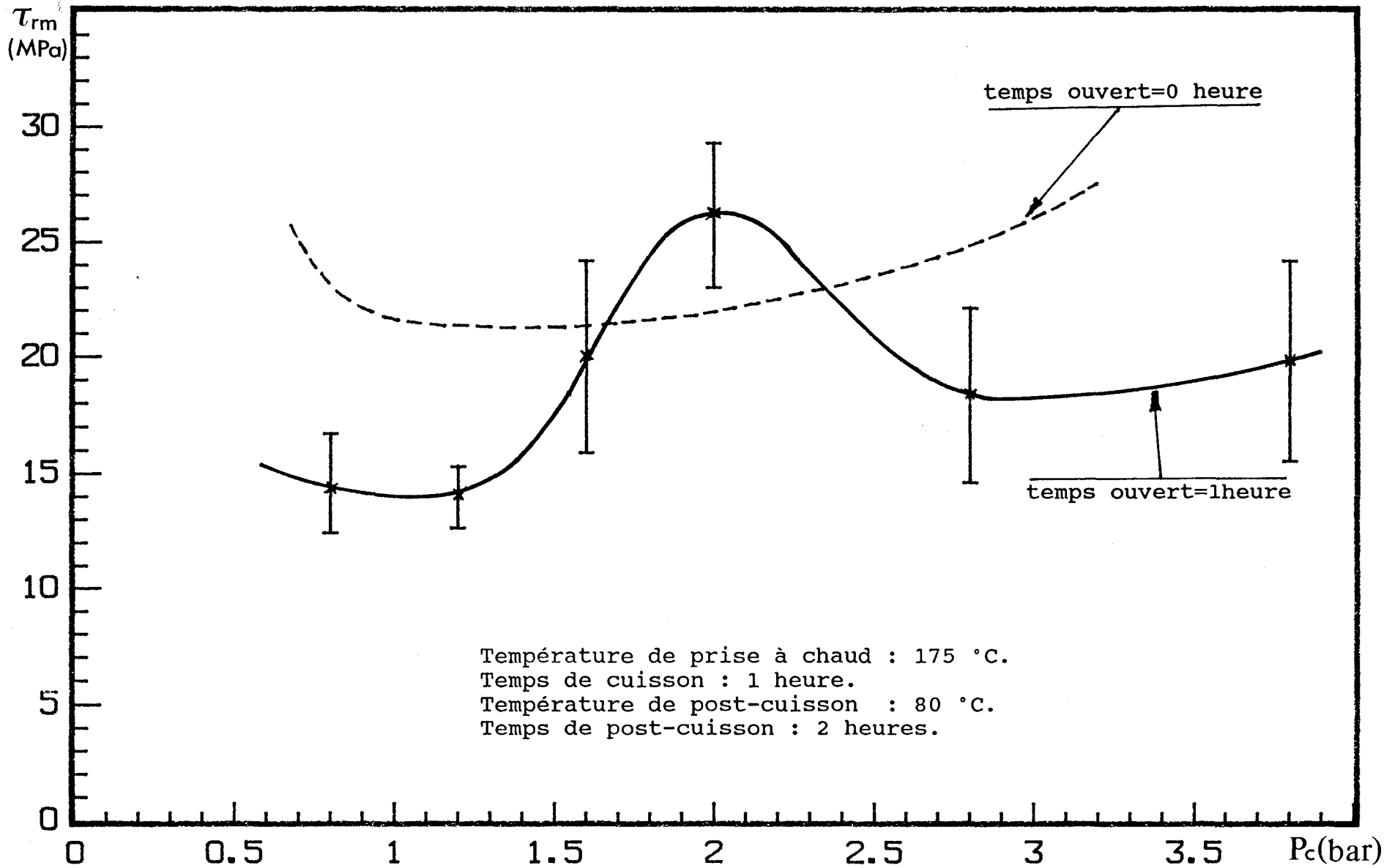


Figure V.8 : Variation de la résistance au cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction de la pression de collage  $P_c$ .

### V.3.2. - Discussion

L'élaboration d'éprouvettes à géométrie reproductible a été rendue possible grâce au montage de positionnement que nous avons spécialement conçu et réalisé à cet effet. Ainsi, ont été isolés les facteurs liés aux défauts de reproductibilité géométrique des assemblages. Le dispositif et la procédure expérimentale mis au point ont donc permis de montrer l'influence de la pression de collage et du temps ouvert sur la résistance à la rupture par cisaillement du joint.

D'ores et déjà, deux remarques importantes peuvent être faites:

#### a) Temps ouvert nul

La résistance au cisaillement diminue dans un premier temps pour ensuite croître avec l'augmentation de la pression de collage. Globalement, les variations de résistance à la rupture par cisaillement restent marquées. Nous attribuons ce type de comportement à faible variation de l'épaisseur du film. En effet, compte tenu de la fluidité de l'adhésif, les variations de pression engendrent de faibles variations de l'épaisseur du film d'adhésif.

#### b) Temps ouvert = 1 heure

La variation de la résistance à la rupture par cisaillement présente un extrêumum (cf fig. V.8). La meilleure tenue mécanique au cisaillement du joint de colle est obtenue pour une pression de collage  $P_c = 2$  bars.

D'une manière générale, on peut noter que pour l'adhésif utilisé, les résistances à la rupture par cisaillement demeurent relativement importantes:

- temps ouvert = 0

$$0,8 \text{ bar} \leq P_c \leq 3 \text{ bars}$$

$$21,4 \text{ MPa} \leq \tau_{rm} \leq 29,7 \text{ MPa}$$

- temps ouvert = 1 heure

$$P_c = 2 \text{ bars}$$

$$\tau_{rm} = 26,2 \text{ MPa} \pm 0,3 \text{ MPa}$$

Enfin, il convient de remarquer que dans cette étude expérimentale préliminaire, les résultats obtenus sont fortement tributaires des phénomènes classiques de pelage dûs à la flexion des substrats en dehors de la zone de recouvrement. La modélisation expérimentale que nous proposons par la suite a été conçue de manière à minimiser voire éliminer ce phénomène.

#### V.4.- INFLUENCE SUR LA RESISTANCE AU CISAILLEMENT DE LA TEMPERATURE DE PRISE A CHAUD, DU TEMPS DE CUISSON ET DE LA PRESSION DE COLLAGE

Dans cette partie, les procédures d'élaboration des assemblages sont identiques à celles qui ont été citées plus haut. La rugosité  $R_t$  (plus grand écart entre une crête et un creux sur une longueur totale de mesure) des surfaces à encoller est voisine de  $2,4 \mu\text{m}$ . Les figures V.9 et V.10 indiquent respectivement, le profil géométrique anamorphe d'une surface et un extrait des mesures de rugosité, effectuées sur nos subjectiles. Le dégraissage des subjectiles, a été également réalisé à l'aide du trichloroéthane (agent dégraisseur). Ce traitement assure ainsi l'obtention de surfaces chimiquement propres. Un temps ouvert voisin de cinq minutes a été observé entre l'encollage des surfaces de recouvrement et l'assemblage des substrats. Deux types d'adhésifs ont été testés. Afin de minimiser toute les sources de dispersion sur les résultats expérimentaux, les étapes successives: de traitement des surfaces à encoller, d'encollage, d'assemblage des substrats et de traitements thermiques ont été, autant que faire se peut, menées de manière identique. L'obtention d'éprouvettes géométriquement reproductibles a été réalisée à l'aide d'un montage de positionnement qui permet, en outre, d'appliquer, par l'intermédiaire de deux ressorts de compression, une pression uniforme sur les films d'adhésif. La raideur des ressorts

- Stries, sillons : écarts du 3<sup>ième</sup> ordre.
- Arrachements : écarts du 4<sup>ième</sup> ordre.

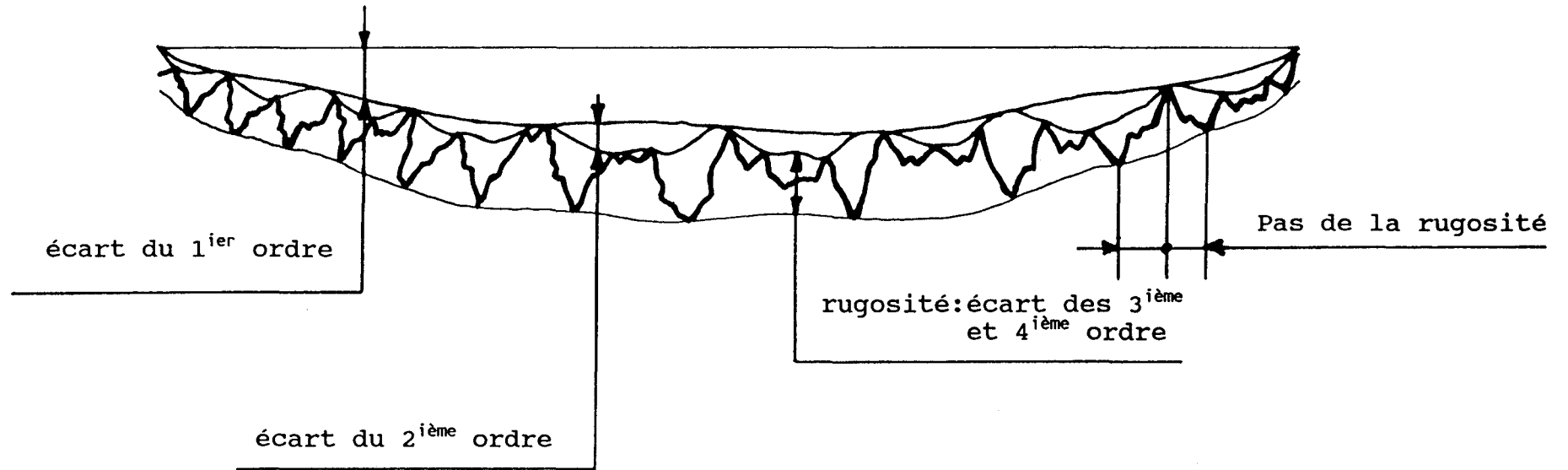
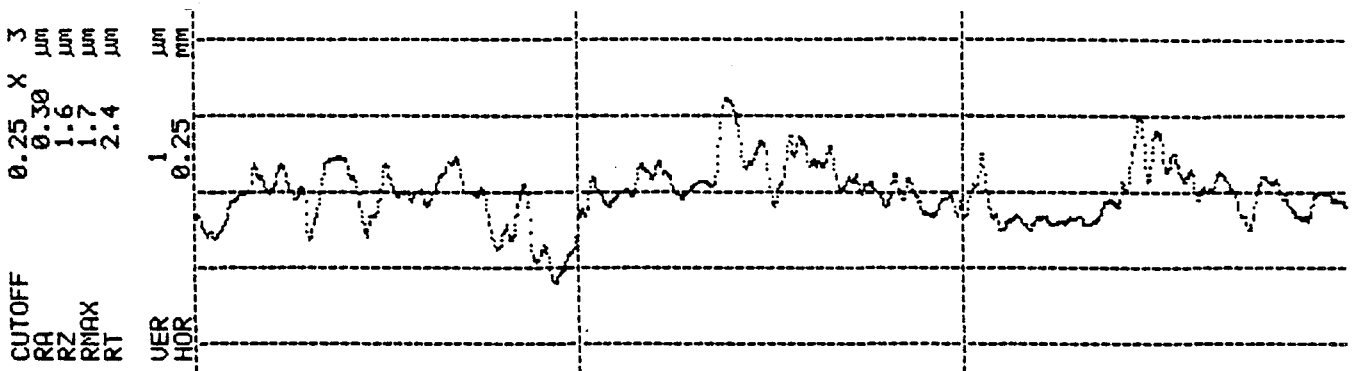


Fig. V.9 : Profil géométrique anamorphe d'une surface.



$$R_a = 0.3 \mu\text{m} , R_z = 1.6 \mu\text{m} , R_{\text{max}} = 1.17 \mu\text{m} , R_t = 2.4 \mu\text{m}$$

- $R_a$  : moyenne arithmétique des écarts de rugosité par rapport à la médiane.
- $R_z$  : valeur moyenne de l'écart entre les creux et les crêtes de cinq sections de mesure.
- $R_{\text{max}}$  : creux le plus important sur une longueur totale de mesure.
- $R_t$  : plus important écart entre une crête et un creux sur la longueur totale de mesure

Fig V.10 : Anamorphose du profil géométrique des subjectiles.

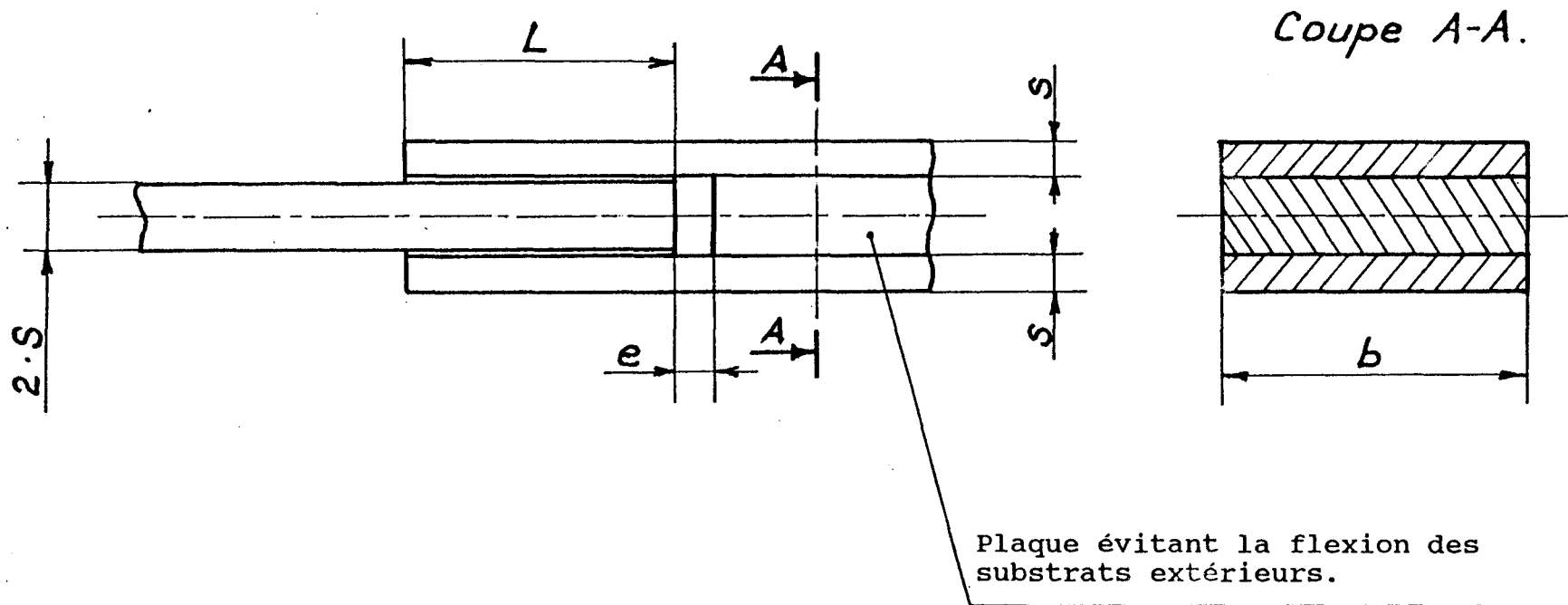
#### **V.4.1. - Modèle expérimental**

La figure V.11 décrit l'éprouvette qui a été adaptée sur une machine de traction INSTRON 8032, de capacité 100 kN. Afin d'éviter la flexion des substrats en dehors du recouvrement, une plaque de même épaisseur que le substrat médian a été insérée entre les couvre-joints extérieurs. Le système d'amarrage des éprouvettes est identique à celui qui a été utilisé lors des essais préliminaires. La vitesse de déplacement imposée au vérin a été également fixée pour tous les essais à la valeur de  $1 \text{ mm.mn}^{-1}$ .

#### **V.4.2. - Influence de la température de prise à chaud**

Les essais réalisés dans cette partie nous permettent de déterminer, expérimentalement, la tenue mécanique en cisaillement de l'adhésif en fonction de la température de prise à chaud (température de cuisson). Par ailleurs, cette étude permet de répondre à deux questions importantes qui concernent notamment: l'existence d'une température au delà de laquelle il se produirait éventuellement une dégradation des propriétés adhésives et cohésives des colles testées, le comportement mécanique à la rupture par cisaillement du joint de colle vis-à-vis de la variation de la température de prise à chaud. Deux essais ont été réalisés. Pour chaque essai, deux paramètres ont été fixés à une valeur constante. Ce sont: **le temps de cuisson ou temps de maintien en température ( $t = 0$ ), la pression de collage ( $P_c = 1,8 \text{ bar}$ ).**

Le cycle de cuisson consiste uniquement en une élévation de température sans palier. Contrairement aux essais préliminaires, les traitements de post-cuisson n'ont pas été effectués sur les deux adhésifs. Les résultats numériques sont consignés dans les tableaux V.3 et V.4. Les courbes représentatives de l'évolution des contraintes de cisaillement à la rupture en fonction de la température de prise à chaud sont illustrés par les figures V.12 et V.13.



$S = 2.6 \text{ mm} ; b = 23 \text{ mm} ; L = 20 \text{ mm} ; e = 3 \text{ mm}$

Fig. V.11 : Schéma du modèle expérimental adapté sur la machine de traction



|                         |  | Température (°C) |      |      |              |      |      |      |              |              |      |
|-------------------------|--|------------------|------|------|--------------|------|------|------|--------------|--------------|------|
|                         |  | 44               | 52   | 63   | 74           | 95   | 107  | 121  | 131          | 177          | 201  |
| $F_u$<br>(daN)          |  | 2317             | 2300 | 2450 | 2599<br>2267 | 3090 | 2900 | 3088 | 3080<br>3500 | 3293<br>2800 | 3900 |
|                         |  | 2434             | 2420 | 2300 | 2176<br>3085 | 2684 | 2875 | 3025 | 2954<br>3625 | 3700<br>3840 | 3940 |
|                         |  | 2230             | 2470 | 2420 | 2263<br>2452 | 2500 | 2535 | 2809 | 3655<br>3420 | 3800<br>3450 | 4550 |
|                         |  | 2312             | 2284 | 2350 | 2809<br>2900 | 2650 | 2650 | 3430 | 3170<br>3250 | 3550<br>3750 | 4380 |
|                         |  | 2100             | 2320 | 2484 | 2600<br>2680 | 2526 | 2700 | -    | 2514<br>-    | 4300<br>-    | -    |
|                         |  | 2150             | 1990 | 1896 | 2500<br>1927 | 2668 | -    | -    | 2689<br>3563 | -<br>-       | -    |
| $F_u$<br>(moy)<br>(daN) |  | 2257             | 2297 | 2316 | 2521         | 2686 | 2732 | 3088 | 3220         | 3619         | 4185 |
| $T_{rm}$<br>(MPa)       |  | 24,5             | 24,9 | 25,2 | 27,4         | 29,2 | 29,6 | 33,5 | 35           | 39,3         | 45,5 |

Tableau V.3 : Résistance au cisaillement en fonction de la température de prise à chaud  
Adhésif :  $M_1$  ;  $P_c = 1,8$  bar ;  $t = 0$

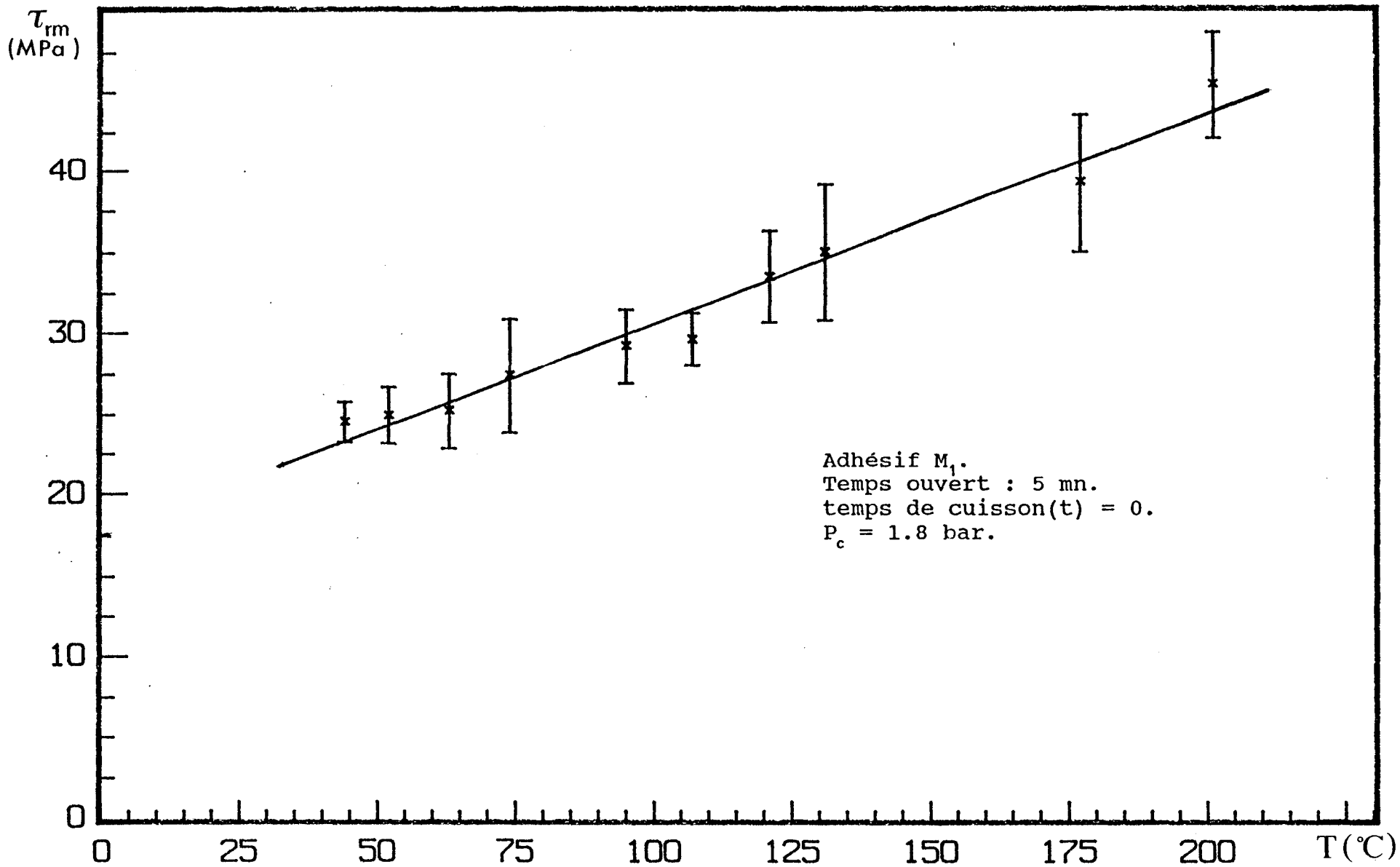


Fig. V.12 : Variation de la résistance à la rupture par cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction de la température (T) de prise à chaud.

|                         |  | Température (°C) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------|--|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                         |  | 44               | 52   | 63   | 74   | 87   | 95   | 107  | 121  | 131  | 142  | 177  | 201  |
| $F_u$<br>(daN)          |  | 1514             | 1590 | 1975 | 2487 | 2318 | 2784 | 2574 | 2519 | 2954 | 3420 | 3746 | 4680 |
|                         |  | 1915             | 1850 | 2120 | 2420 | 2389 | 3335 | 2579 | 2759 | 2859 | 3310 | 3945 | 4120 |
|                         |  | 1584             | 1900 | 1895 | 1720 | 2819 | 2700 | 2600 | 2934 | 3269 | 3350 | 3570 | 4200 |
|                         |  | 1943             | 1775 | 2025 | 2425 | 2307 | 3150 | 2674 | 2519 | 3111 | -    | 3800 | 4370 |
|                         |  | 1500             | 1670 | 1660 | 2071 | -    | 2619 | -    | 2909 | 3126 | -    | 3890 | -    |
|                         |  | 2032             | 2216 | -    | 1978 | -    | 1274 | -    | -    | 3430 | -    | -    | -    |
| $F_u$<br>(moy)<br>(daN) |  | 1748             | 1833 | 1935 | 2183 | 2458 | 2643 | 2606 | 2728 | 3124 | 3360 | 3790 | 4342 |
| $\tau_{rm}$<br>(MPa)    |  | 19               | 19,9 | 21   | 23,7 | 26,7 | 28,7 | 28,3 | 29,6 | 33,9 | 36,5 | 41,2 | 47,2 |

89

Tableau V.4 : Résistance au cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction de la température de prise à chaud  
Adhésif : M<sub>2</sub> ; P<sub>C</sub> = 1,8 bar ; t = 0

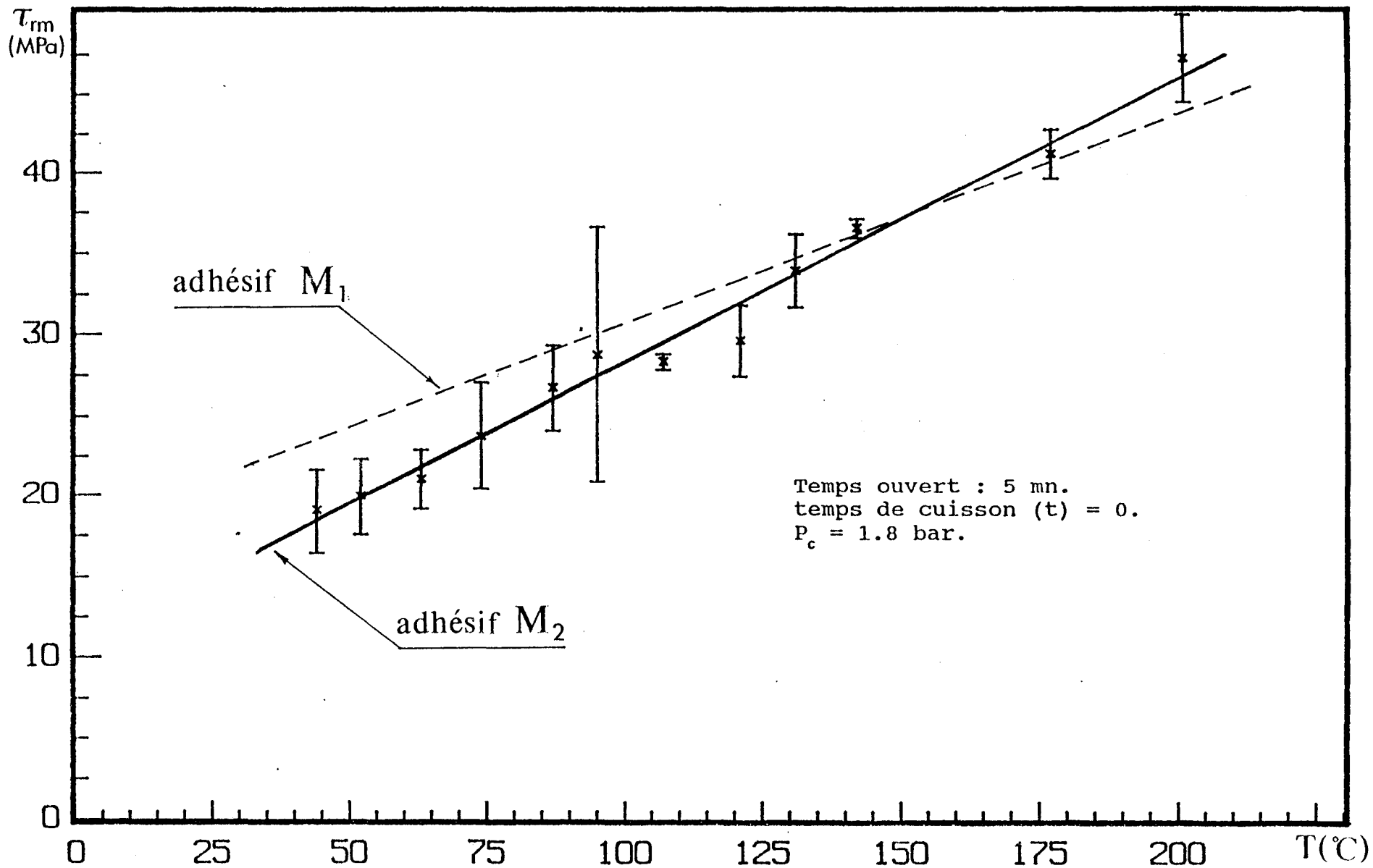


Fig. V.13 : Variation de la résistance à la rupture par cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction de la température ( $T$ ) de prise à chaud.

#### V.4.2.1. - Discussion

Pour  $P_c = 1.8$  bar et  $t = 0$ , les adhésifs présentent dans la plage de température étudiée un comportement similaire. la loi expérimentale de variation de la résistance au cisaillement en fonction de la température de prise à chaud est une fonction linéaire de la température de prise à chaud. Elle est donnée par:

$$\Delta\tau_{rm} \approx \alpha \Delta T.$$

Dans cette expression,  $\alpha$  a la dimension d'une contrainte par unité de température de prise à chaud (température de cuisson sans palier). Les valeurs de  $\alpha$  sont données par:

$$\alpha = \begin{array}{ll} 0,14 & \text{colle } M_1 \\ 0,18 & \text{colle } M_2 \end{array}$$

Lorsque la température de prise à chaud est comprise entre 44°C et 155°C, l'adhésif  $M_1$  présente une résistance à la rupture  $\tau_{rm}$  légèrement supérieure à celle de la colle  $M_2$ . Ce résultat confirme bien la rapidité de polymérisation de la colle  $M_1$  à température modérée.

#### V.4.3. - Influence du temps de cuisson de l'adhésif sur la résistance au cisaillement

L'étude expérimentale réalisée sur l'influence de la température n'est pas suffisant pour caractériser, de manière complète, la tenue mécanique du film d'adhésif en cisaillement. Deux autres paramètres relatifs au cycle thermique peuvent influencer cette tenue mécanique, ce sont: la température de cuisson et le temps de cuisson.

Ainsi, pour une pression de collage imposée ( $P_c = 1.8$  bar), nous avons déterminé expérimentalement la tenue mécanique du film d'adhésif par la mesure de la résistance à la rupture par cisaillement. Pour chaque adhésif, l'étude porte sur cinq températures de prise à chaud. A chaque température de prise à

chaud, quatre temps de cuisson ont été imposés. Les résultats expérimentaux obtenus sont donnés dans les tableaux V.5 et V.6. Les courbes représentées par les figures V.14 et V.15 illustrent, pour les deux adhésifs, les variations de la résistance au cisaillement en fonction du temps de cuisson. Toutes les valeurs de résistance déterminées ont été obtenues par la moyenne prise sur une population de six éprouvettes.

|           |     | Temps (heure) |      |      |      |       |
|-----------|-----|---------------|------|------|------|-------|
|           |     | 0,5           | 1    | 2    | 3    | 4     |
| T<br>(°C) | 100 | -             | 30   | 31,6 | 27,8 | 33,26 |
|           | 130 | -             | 37,7 | 37,7 | 38,2 | 31,1  |
|           | 155 | -             | 42,9 | 43,7 | 35,5 | 25,5  |
|           | 175 | -             | 27,8 | 29,2 | 19,9 | 18,6  |
|           | 190 | 37            | 5,5  | 0    | 0    | 0     |

Tableau V.5 : Résistances  $\tau_{rm}$  (MPa) en fonction de la température de prise à chaud et du temps de cuisson.  
 $P_c = 1.8$  bar. Adhésif:  $M_1$

|           |     | Temps (heure) |      |      |      |      |
|-----------|-----|---------------|------|------|------|------|
|           |     | 0,5           | 1    | 2    | 3    | 4    |
| T<br>(°C) | 100 | -             | 28,3 | 23,8 | 33   | 31   |
|           | 130 | -             | 37,6 | 44,6 | 41,5 | 41,5 |
|           | 155 | -             | 40,8 | 41,6 | 45,8 | 45   |
|           | 175 | -             | 41,5 | 38,2 | 44,3 | 31,8 |
|           | 190 | 32,6          | 36,2 | 41   | 42,2 | 20,3 |

Tableau V.6: Résistances  $\tau_{rm}$  (MPa) en fonction de la température de prise à chaud et du temps de cuisson.  
 $P_c = 1.8$  bar. Adhésif :  $M_2$

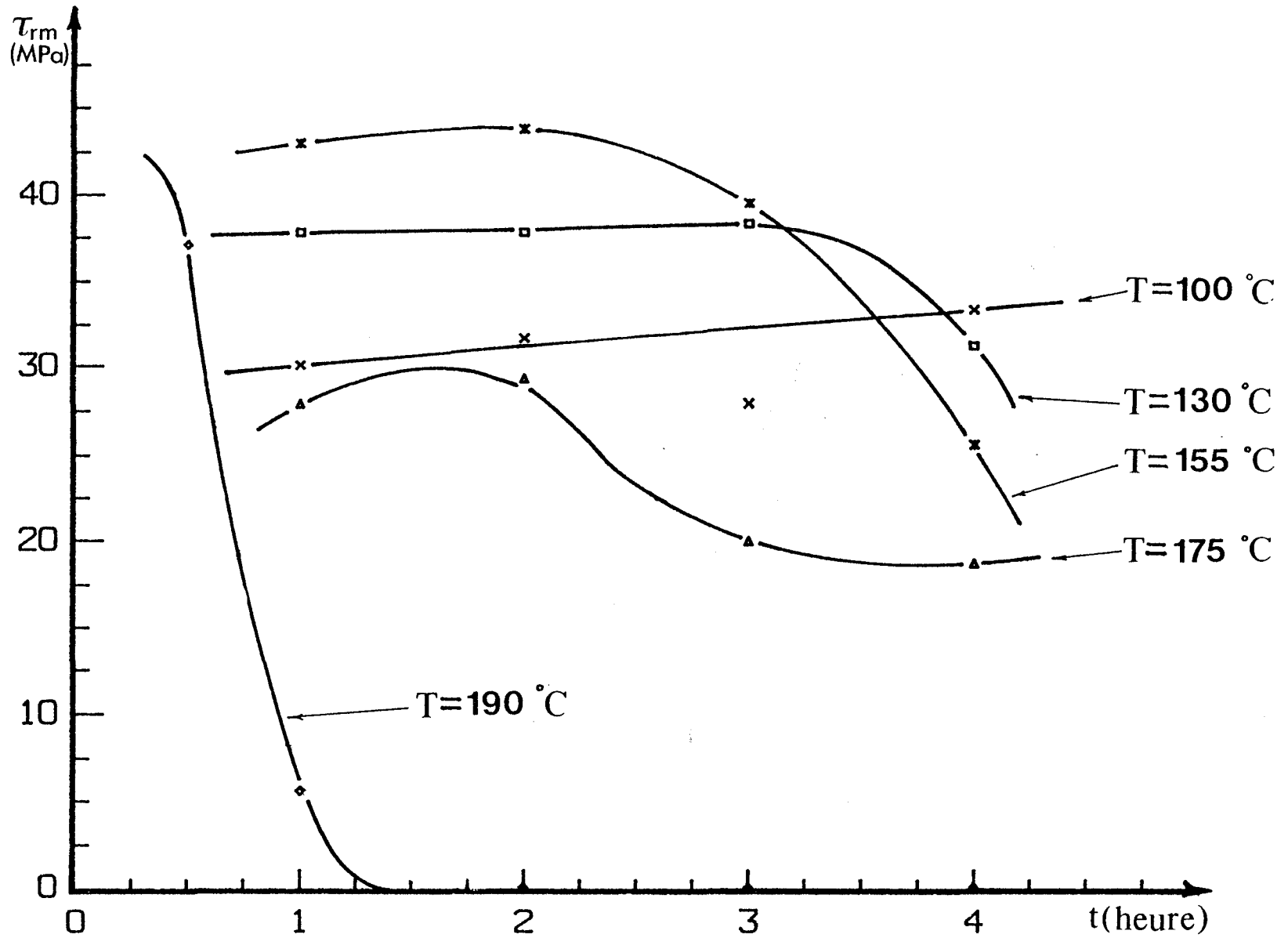


Figure. V.14 : Variation de la résistance à la rupture par cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction du temps de cuisson ( $t$ ).  $P_c=1.8$  bar. Adhésif  $M_1$

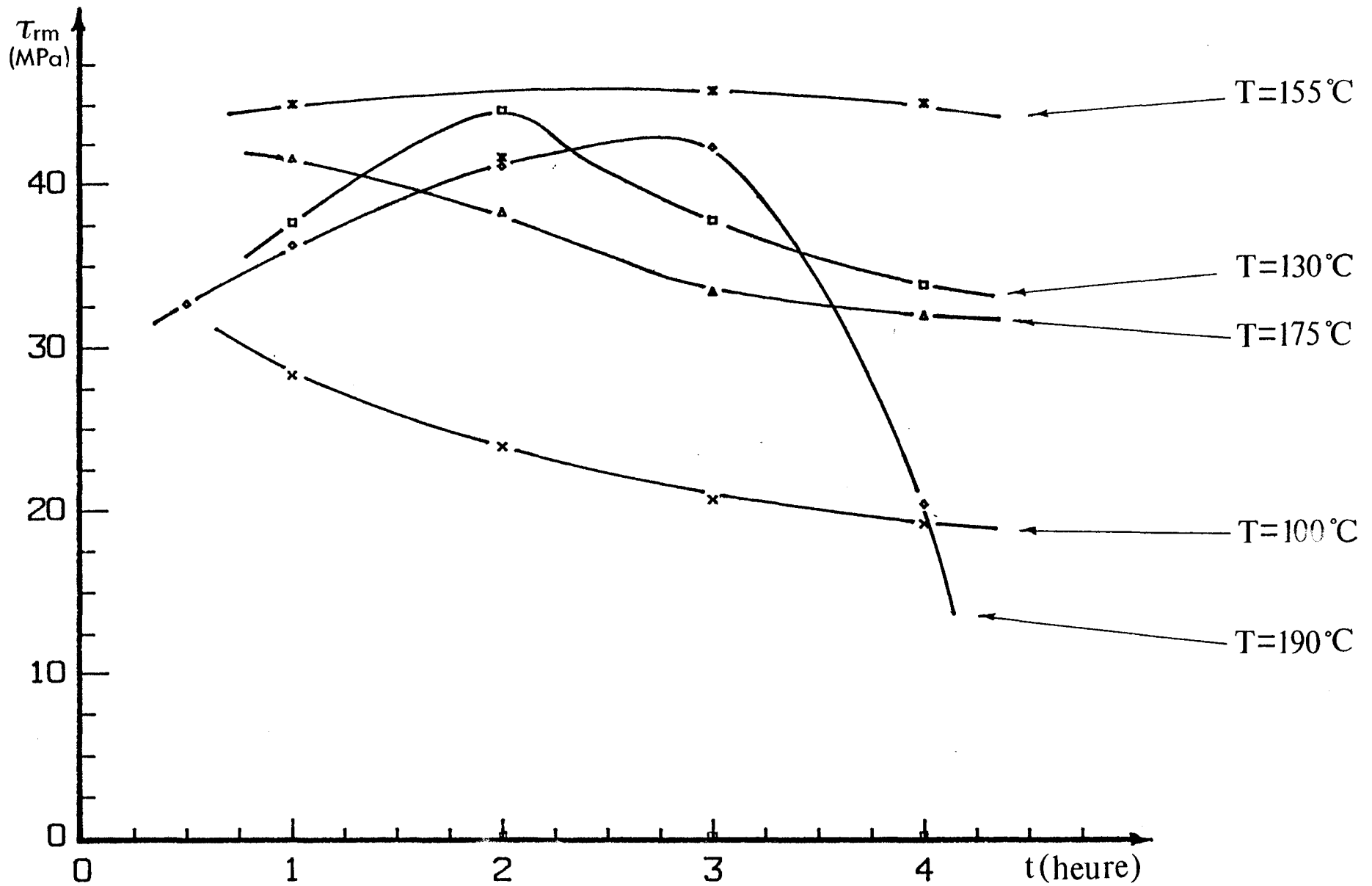


Figure. V.15 : Variation de la résistance à la rupture par cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction du temps de cuisson ( $t$ ).  $P_c=1.8$  bar. Adhésif  $M_2$



#### V.4.3.1.- Discussion

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis de caractériser la tenue mécanique en cisaillement du joint d'adhésif. A température de cuisson constante, lorsque le temps de cuisson croît, les variations de la résistance au cisaillement demeurent plus ou moins importantes suivant la température de prise à chaud et la nature de l'adhésif testé. Une température de cuisson trop élevée ( $T \approx 190^{\circ}\text{C}$ ) entraîne une dégradation des qualités adhésives et cohésives de la colle  $M_1$ . Cette dégradation reste cependant moins accentuée dans le cas de l'adhésif  $M_2$ . Lorsque le temps de cuisson est fixé à 1 heure, les températures de cuisson qui garantissent la meilleure tenue mécanique en cisaillement pour les deux types d'adhésif sont de l'ordre de  $155^{\circ}\text{C}$  pour l'adhésif  $M_1$  et  $175^{\circ}\text{C}$  pour l'adhésif  $M_2$ .

Afin de déterminer très clairement le comportement mécanique à la rupture des joints testés, nous avons adopté un mode de représentation graphique permettant de mettre en évidence, à temps de cuisson constant, les contraintes maximales à la rupture et les températures de cuisson correspondantes. Les courbes, illustrées par les figures V.16 et V.17 indiquent pour différents temps de cuisson, les variations de résistance au cisaillement en fonction de la température de cuisson. Nous montrons expérimentalement que, pour chaque temps de cuisson, il existe une température dite température optimale pour laquelle chaque adhésif acquiert sa meilleure tenue mécanique en cisaillement.

Remarque : A température modérée ( $T \approx 100^{\circ}\text{C}$ ) et pour un temps de cuisson compris entre 1 heure et 2 heures, l'adhésif  $M_1$  est beaucoup plus actif et polymérise, de ce fait, plus rapidement que l'adhésif  $M_2$ . En revanche, lorsque les températures de cuisson sont élevées ( $T \geq 175^{\circ}\text{C}$ ), la colle  $M_2$  présente de bien meilleures performances mécaniques en cisaillement que la colle  $M_1$ . En effet, une dégradation des qualités adhésives et cohésives (baisse de 85 % de la résistance à la rupture) a pu être observée sur la colle  $M_1$ , lorsque le temps de maintien varie d'une demi-heure à une heure.

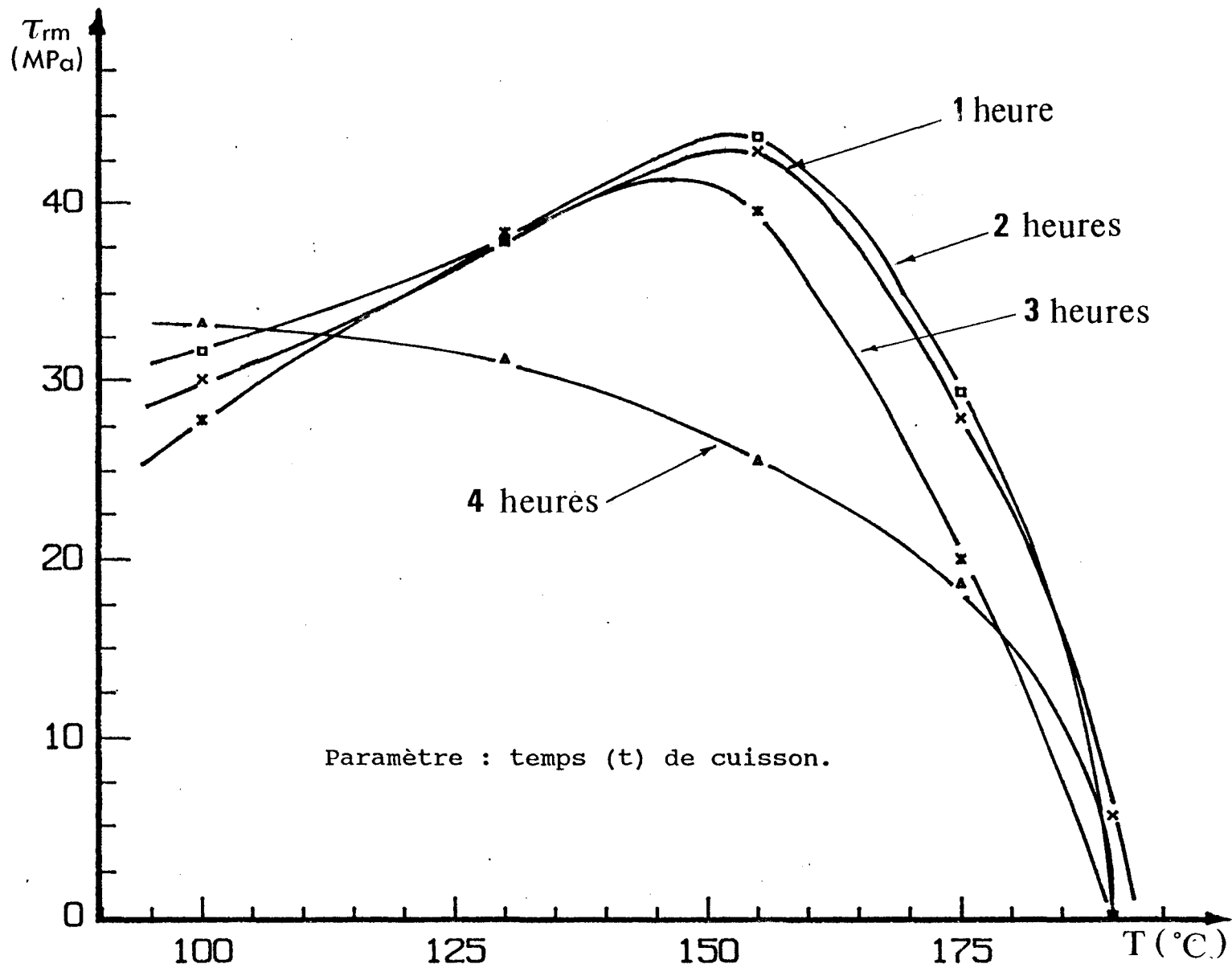


Figure. V.16 : Variation de la résistance à la rupture par cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction de la température de cuisson (T).  $P_c=1.8$  bar. Adhésif  $M_1$

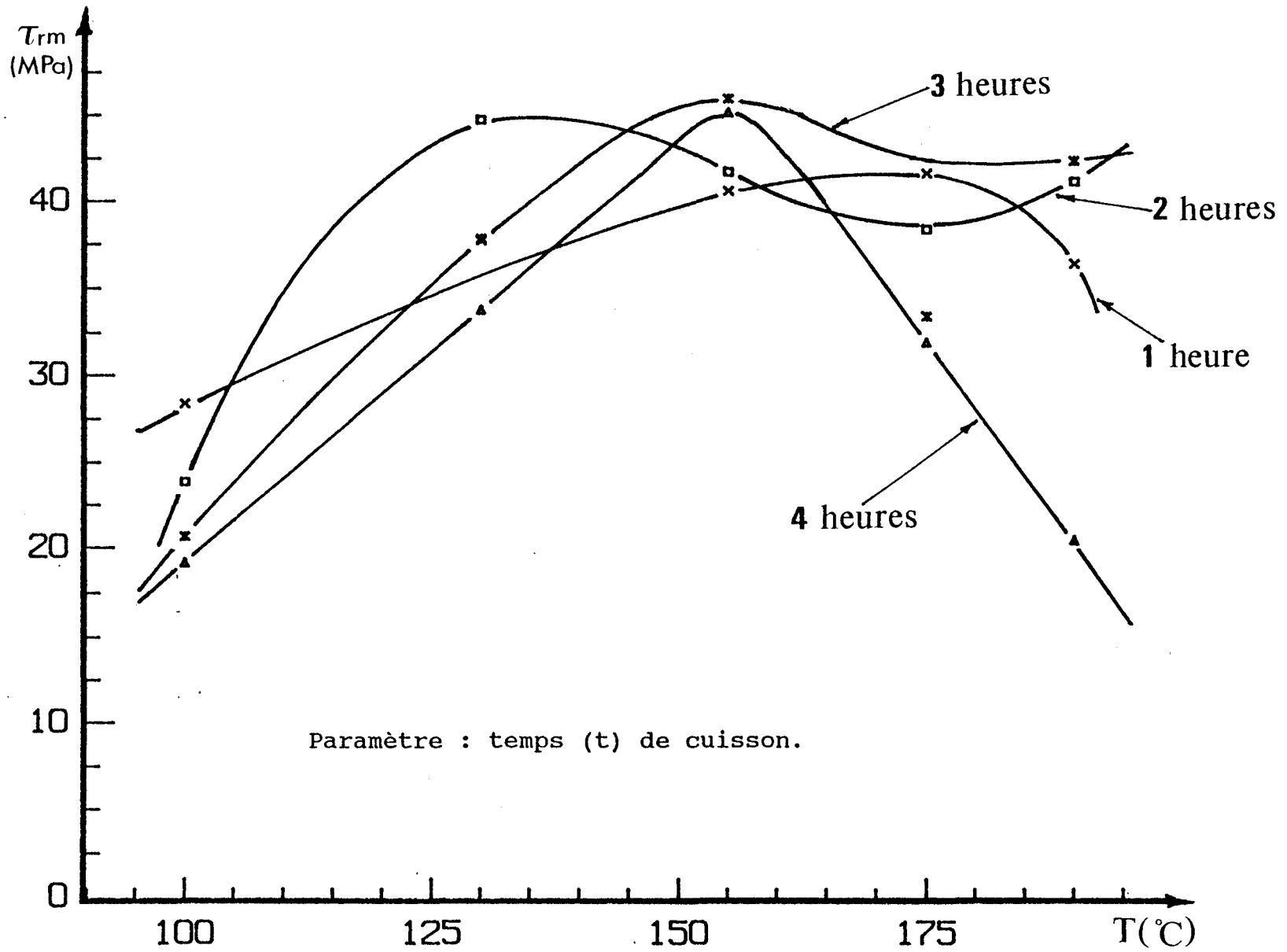


Figure. V.17 : Variation de la résistance à la rupture par cisaillement  $\tau_{rm}$  en fonction de la température de cuisson (T).  $P_c=1.8$  bar. Adhésif  $M_2$

**V.4.4. - Détermination des températures optimales associées aux temps de cuisson**

En utilisant les résultats expérimentaux précédents, nous déterminons pour chaque temps de cuisson, une température dite optimale . C'est cette température qui, associée au temps de cuisson procure au joint d'adhésif sa meilleure résistance mécanique ( contrainte maximale de cisaillement à la rupture ). Cette méthode de détermination permet donc à l'utilisateur de l'adhésif, le choix d'un couple ( température et temps de cuisson ) qui garantisse la meilleure tenue mécanique en cisaillement.

Les tableaux V.7 et V.8 indiquent, pour chaque adhésif testé et pour chaque temps de cuisson, les températures optimales de cuisson notées  $T_{op}$  et les contraintes maximales de cisaillement à la rupture déterminées (par extrapolation) à partir des courbes expérimentales consignées dans les figures V.16 et V.17.

|                      |      |      |      |      |      |
|----------------------|------|------|------|------|------|
| t<br>(heure)         | 0,5  | 1    | 2    | 3    | 4    |
| $T_{op}$<br>(°C)     | 190  | 151  | 151  | 146  | 100  |
| $\tau_{rm}$<br>(MPa) | 37,5 | 43,4 | 44,5 | 41,7 | 33,4 |

Tableau V.7 : Températures optimales et contraintes maximales associés aux temps de cuisson.  
Adhésif  $M_1$ .  $P_c = 1,8$  bar.

| t<br>(heure)         | 0,5 | 1    | 2    | 3    | 4    |
|----------------------|-----|------|------|------|------|
| $T_{op}$<br>(°C)     | -   | 175  | 130  | 165  | 165  |
| $\tau_{rm}$<br>(MPa) | -   | 41,5 | 45,1 | 46,5 | 4,55 |

Tableau V.8 : Températures optimales et contraintes maximales associés aux temps de cuisson.  
Adhésif M<sub>2</sub>. P<sub>c</sub> = 1,8 bar.

Les figures V.18 et V.19 indiquent, pour les deux adhésifs testés, les cycles thermiques de cuisson à adopter afin de garantir, suivant les conditions expérimentales adoptées, la meilleure résistance mécanique à la rupture par cisaillement des joints.

La figure V.19 illustre quant à elle, les cycles thermiques conseillés. Ces cycles sont issus de la notice d'utilisation délivrée par le fabricant ( Vishay-micromesure ) des deux adhésifs.

#### Remarque

Il convient alors de noter que ces courbes, issues de la notice d'utilisation des adhésifs ne sont données qu'à titre indicatif. De ce fait, nous nous gardons bien de faire une comparaison entre les deux cycles car nous ne sommes pas en possession, de la part du fabricant, des éléments pris en compte lors de la construction des cycles de cuisson.

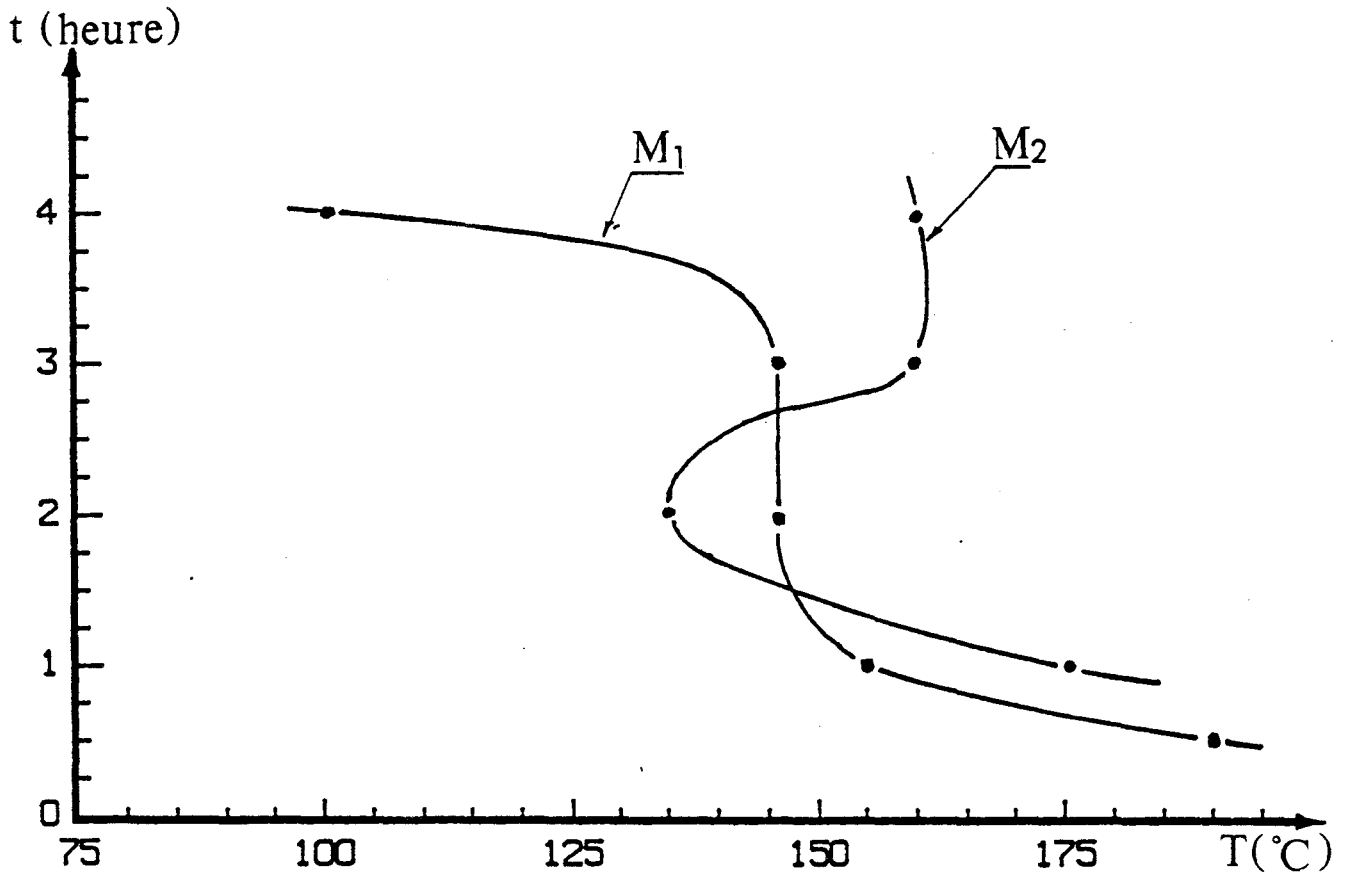


Fig V.18 : Cycles optimaux de cuisson.  
Adhésif  $M_1$  et  $M_2$ .  $P_c = 1.8$  bar.

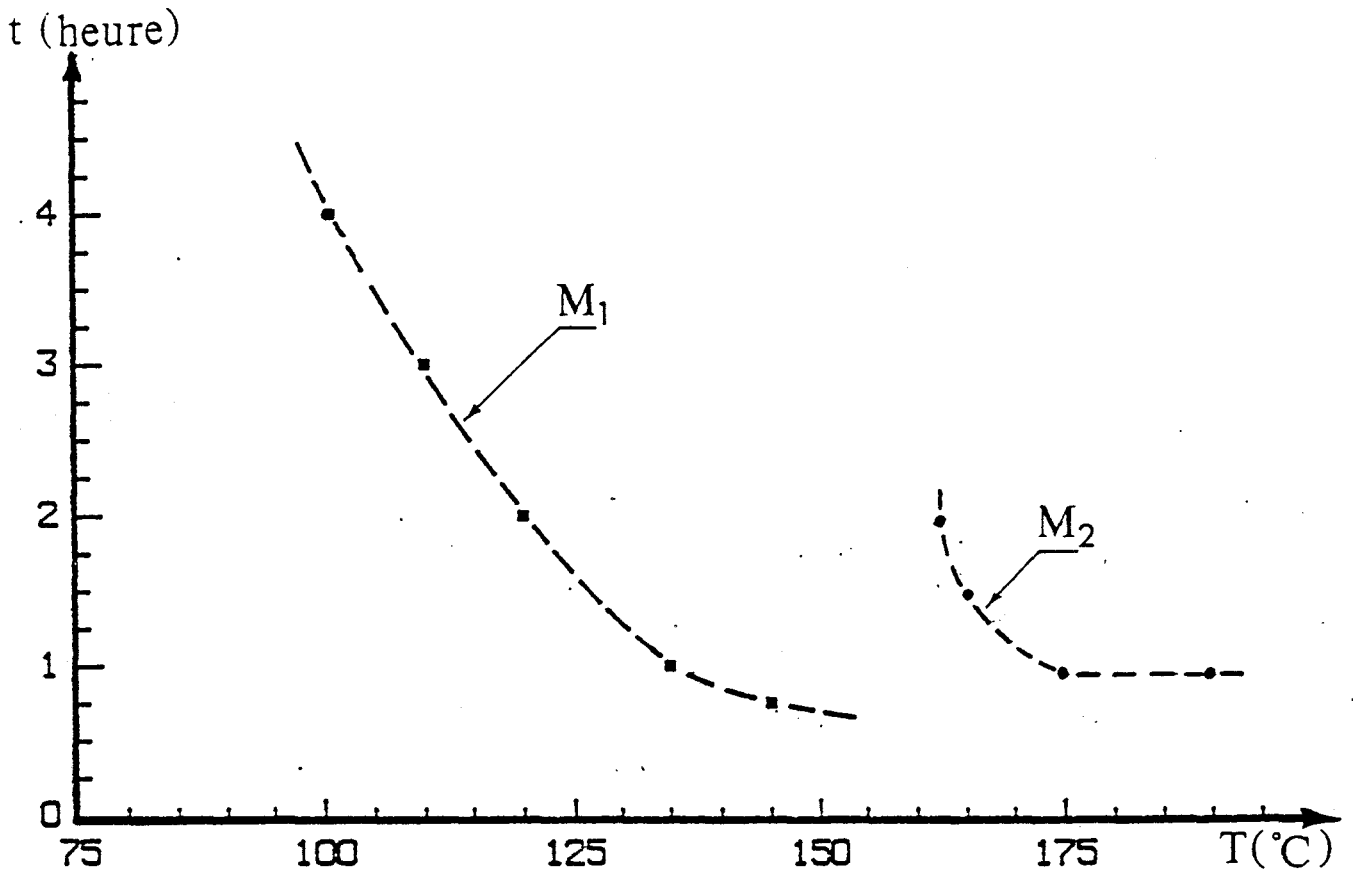


Fig V.19 : Cycle de cuisson selon le fabricant (42).  
Adhésif  $M_1$  et  $M_2$ .

#### V.4.5. - Influence de la pression de collage (épaisseur du film d'adhésif)

Les adhésifs utilisés sont spécialement conçus pour l'obtention de films très minces. De ce fait, ils conviennent parfaitement au collage des jauges sur les corps d'épreuve de capteurs.

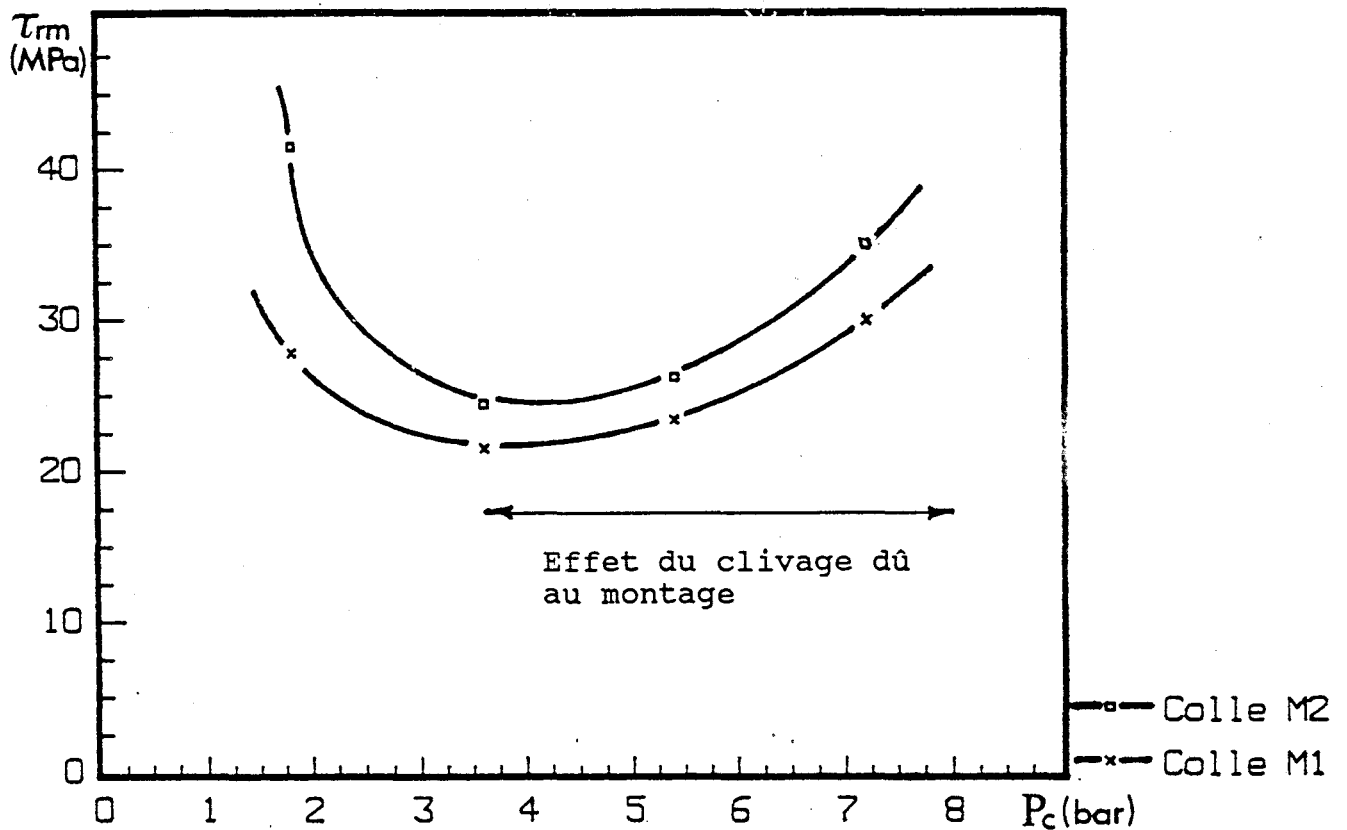
Dans l'étude expérimentale que nous avons menée jusque là, nous contrôlons l'épaisseur du film d'adhésif par l'intermédiaire de la pression de collage ( $P_c$ ) qui est appliquée d'une manière uniforme et reproductible sur les couvre-joints extérieurs.

En vue d'étudier expérimentalement l'influence de cette pression de collage sur la résistance au cisaillement, une série d'essais a été réalisée sur chaque type d'adhésif. Pour une température de prise à chaud (T) et un temps de cuisson (t) respectivement fixés à 175°C et 1 heure, nous avons déterminé expérimentalement, les variations de résistance au cisaillement en fonction de quatre valeurs de pression égales à 1.8, 3.6, 5.4, 7,2 bars.

Les valeurs numériques de  $\tau_{rm}$ , déterminées expérimentalement en fonction de la pression de collage sont données dans le tableau V.9. La figure V.20 montre l'évolution de  $\tau_{rm}$  en fonction de la pression de collage  $P_c$ .

Pour chacune des valeurs de pression précédemment citées, nous avons effectué une série de mesure d'épaisseur à l'aide d'un permascopie du type ES 8. Cet appareil est destiné à la mesure des revêtements non magnétiques (métalliques ou non) déposés sur tous matériaux ferreux ou ferro-magnétiques.

| T = 175°C               |     | M <sub>1</sub>       |                 | M <sub>2</sub>       |                 |
|-------------------------|-----|----------------------|-----------------|----------------------|-----------------|
| t = 1 heure             |     | $\tau_{rm}$<br>(MPa) | $\Delta$<br>(%) | $\tau_{rm}$<br>(MPa) | $\Delta$<br>(%) |
| P <sub>c</sub><br>(bar) | 1,8 | 27,8                 | 14              | 41,5                 | 9               |
|                         | 3,6 | 21,5                 | 4               | 24,4                 | 4               |
|                         | 5,4 | 23,4                 | 12              | 6,2                  | 2               |
|                         | 7,2 | 30                   | 16              | 35                   | 4               |

Tableau V.9 :  $\tau_{rm}$  en fonction de P<sub>c</sub> $\Delta$  : dispersion par rapport à  $\tau_{rm}$ Figure V.20 : Variation de  $\tau_{rm}$  en fonction de P<sub>c</sub>

T = 175°C , t = 1 heure



il permet, à l'aide d'un étalon d'épaisseur, d'effectuer des mesures d'épaisseur comprises entre 0 mm et 10 mm . Le tableau V.10 donne une correspondance entre échelles de mesure et étalon d'épaisseur pour une plage d'épaisseur comprise entre 0 mm et 0,5 mm.

| Echelle<br>( $\mu\text{m}$ ) | Etalon<br>( $\mu\text{m}$ ) |
|------------------------------|-----------------------------|
| 0 - 30                       | 0 - 25                      |
| 20 - 100                     | 25 - 85                     |
| 80 - 500                     | 85 - 450                    |

Tableau V.10

|                | $M_1$ et $M_2$ |      |       |      |
|----------------|----------------|------|-------|------|
| $P_c$<br>(bar) | 1,8            | 3,6  | 5,4   | 7,2  |
| $S_c$<br>(mm)  | 0,06           | 0,04 | 0,025 | 0,02 |

Tableau V.11 : Epaisseurs moyennes en fonction de la pression de collage

Les épaisseurs moyennes ont été déterminées par une série de mesures effectuées en dix points différents du faciès de rupture. La courbe représentant la variation de la résistance  $\tau_{rm}$  en fonction de l'épaisseur  $S_c$  des adhésifs est illustrée par la figure V.21.

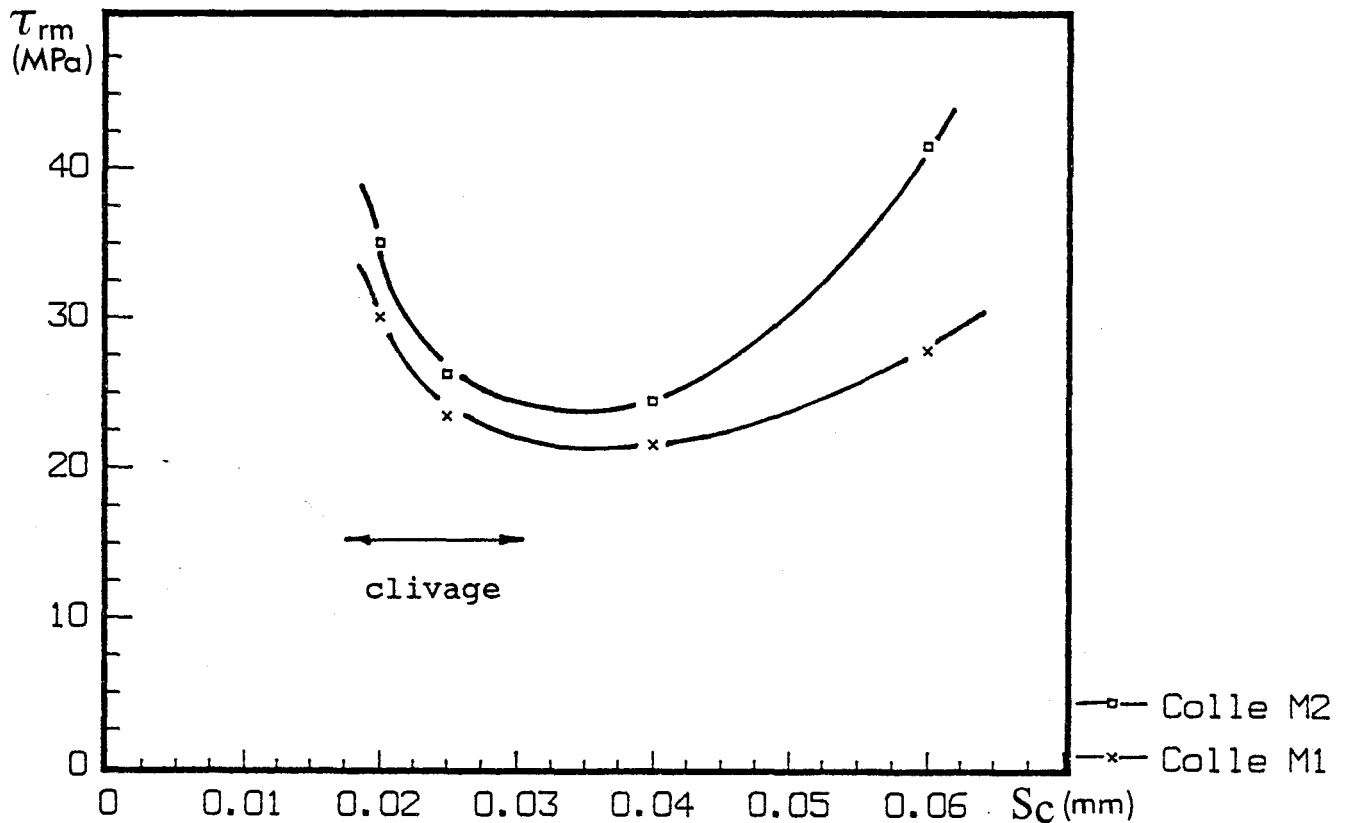


Figure V.21 : Variation de  $\tau_{rm}$  en fonction de  $S_c$ .  
 $T = 175^\circ\text{C}$  ,  $t_{rm} = 1$  heure

#### V.4.5.1 - Discussion

Les figures V.20 et V.21 montrent très clairement l'influence importante de la pression de collage et de l'épaisseur du joint sur la résistance au cisaillement et cela, aussi bien pour la colle  $M_1$  que pour la colle  $M_2$ .

Deux plages d'épaisseur caractérisent essentiellement le comportement mécanique à la rupture des deux adhésifs.

Première zone :  $0,02 \text{ mm} \leq S_c \leq 0,04 \text{ mm}$

Lorsque le joint est très mince ( $S_c$  de l'ordre de 0.02 mm), on observe les deux phénomènes suivant:

- a) clivage (vers l'intérieur) du film engendré de manière reproductible par le système mécanique (on observe des comportements identiques pour les deux adhésifs).
- b) interpénétration des pics de la rugosité au voisinage de l'extrémité où les tôles (couvre-joints) reçoivent l'effort de traction.

La conjonction de ces deux phénomènes entraîne une augmentation de la résistance à la rupture  $\tau_{rm}$  pour des couches d'adhésif de plus en plus fines. Ce même phénomène a été observé par MÜLLER (37). Celui-ci a pu montrer que la résistance à la rupture de la colle ainsi que son module d'élasticité augmentent sensiblement pour des couches très minces d'adhésif. Cette augmentation, particulièrement importante dans les assemblages sollicités en traction, est la conséquence du fait que les déplacements dans le sens des contraintes de décollement sont empêchés.

Pour être en accord avec les résultats de Y. GILIBERT (12), il convient de ne prendre en considération que le cas où l'épaisseur  $S_c$  est supérieure à 0.04 mm. Dans ce cas, (12) a pu montrer que pour des épaisseurs de l'ordre de 0.05 mm, la résistance à la rupture  $\tau_{rm}$  croît jusqu'à une valeur maximale obtenue pour une valeur optimale de l'épaisseur d'adhésif. Dans le cas présent, il n'a pas été possible d'obtenir des joints plus épais car l'adhésif polymérisé sous forme massive ou sous forme de film épais n'a aucune cohésion.

L'utilisation d'un système d'ancrage plus performant [collage d'entretoises, utilisation de rotules et de cônes de centrage (44)] permettrait de déterminer le comportement mécanique réel du joint indépendamment des effets du système d'adaptation (d'ancrage) qui relie le corps d'épreuve à la machine de traction.

Deuxième zone :  $S_c \geq 0,03$  mm

Dans cette zone, les résistances  $\tau_{rm}$  varient dans le même sens que l'épaisseur du film d'adhésif. Nous attribuons ce type de comportement au fait que les pointes de contraintes dans le joint se trouvent réduites lorsque l'épaisseur du film augmente. Il apparaît une fois de plus, que pour atteindre une bonne performance mécanique de l'assemblage, il peut être avantageux de travailler avec des films d'adhésif aussi épais que possible ( voir les travaux de GILIBERT (12) ) Par ailleurs, l'évaluation de l'épaisseur du film en fonction de la pression de collage confirme bien la diminution de l'épaisseur du joint pour des pressions de plus en plus élevées.( voir fig.V.22). C'est finalement cette pression de collage qui fixe de manière définitive (à température et temps de cuisson constants) l'épaisseur du film d'adhésif.

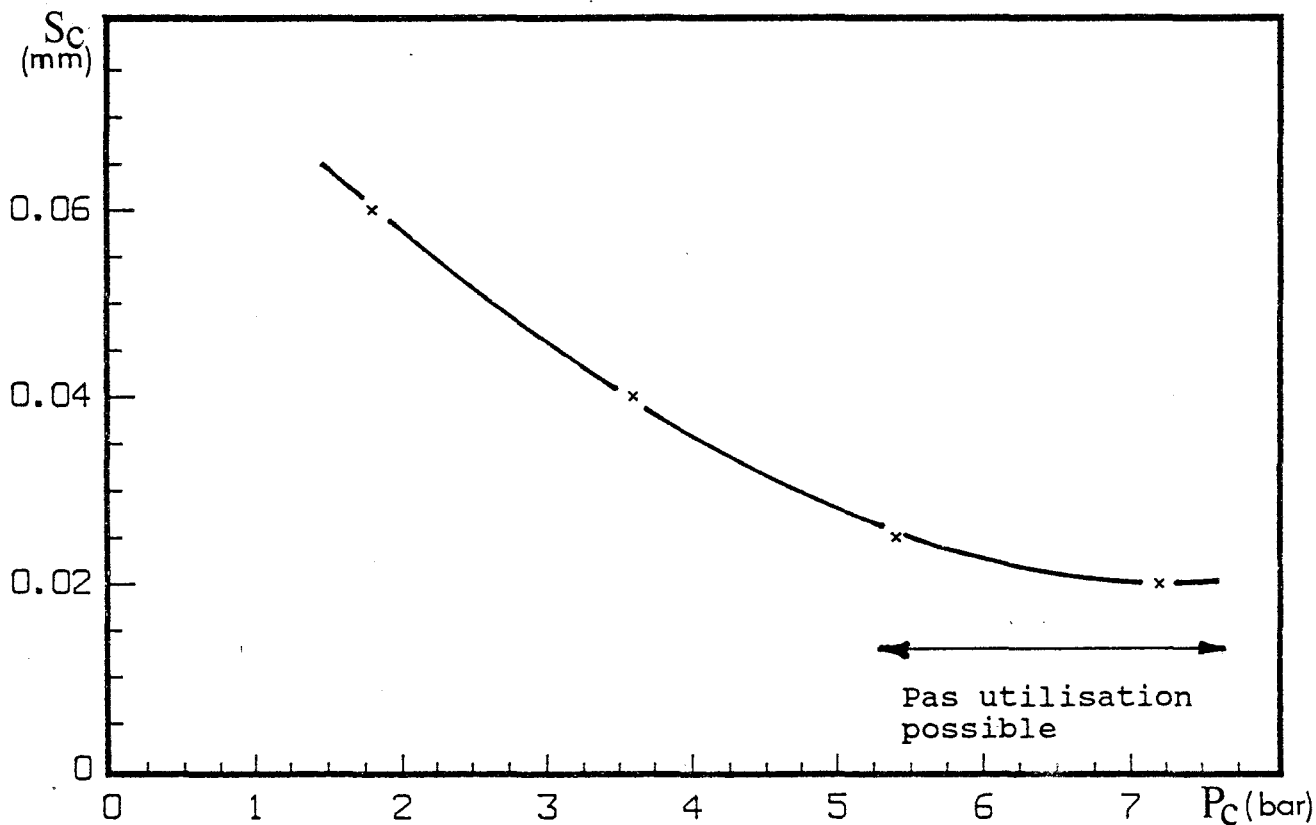


Figure V.22 : Variation de l'épaisseur  $S_c$  en fonction de la pression de collage

### V.5.- CONCLUSION.

Les essais réalisés dans cette partie expérimentale nous ont permis de mettre en évidence, l'influence des paramètres de durcissement sur la contrainte moyenne de cisaillement à la rupture des joints d'adhésifs testés.

Les résultats expérimentaux obtenus lors des essais préliminaires montrent l'influence du temps ouvert sur le comportement mécanique à la rupture par cisaillement des joints. En effet, pour un temps ouvert fixé à 1 heure, la courbe représentative de  $\tau_{rm}$  en fonction de la pression de collage passe par un extrêumum (maximum).

Dans une plage de température comprise entre 44 °C et 200 °C, et, pour un temps de cuisson nul, la résistance à la rupture par cisaillement  $\tau_{rm}$  des deux adhésifs varie linéairement en fonction de la température de cuisson (température de prise à chaud).

Les tests réalisés par la suite révèlent, à pression de collage constante et, pour chaque temps de cuisson fixé respectivement à 1 heure, 2 heures, 3 heures et 4 heures, l'existence d'une température optimale de cuisson qui confère au joint sa meilleure tenue mécanique en cisaillement. Au delà de cette température, il se produit une diminution des caractéristiques adhésives et cohésives et, par voie de conséquence, une diminution de  $\tau_{rm}$ .

Sur les deux adhésifs, l'étude de l'influence de la pression de collage a été présentée. Celle-ci montre qu'à température de cuisson fixée et à temps de cuisson constant, la variation de  $\tau_{rm}$  en fonction de  $P_c$  présente un extremum (minima). Les mesures d'épaisseur de film, effectuées lors de ces essais, montrent bien que celles-ci diminuent quand la pression de collage  $P_c$  augmente.

CHAPITRE VI

DETERMINATION DES SEUILS D'APPARITION  
ET DE PROPAGATION DES MICROFISSURES

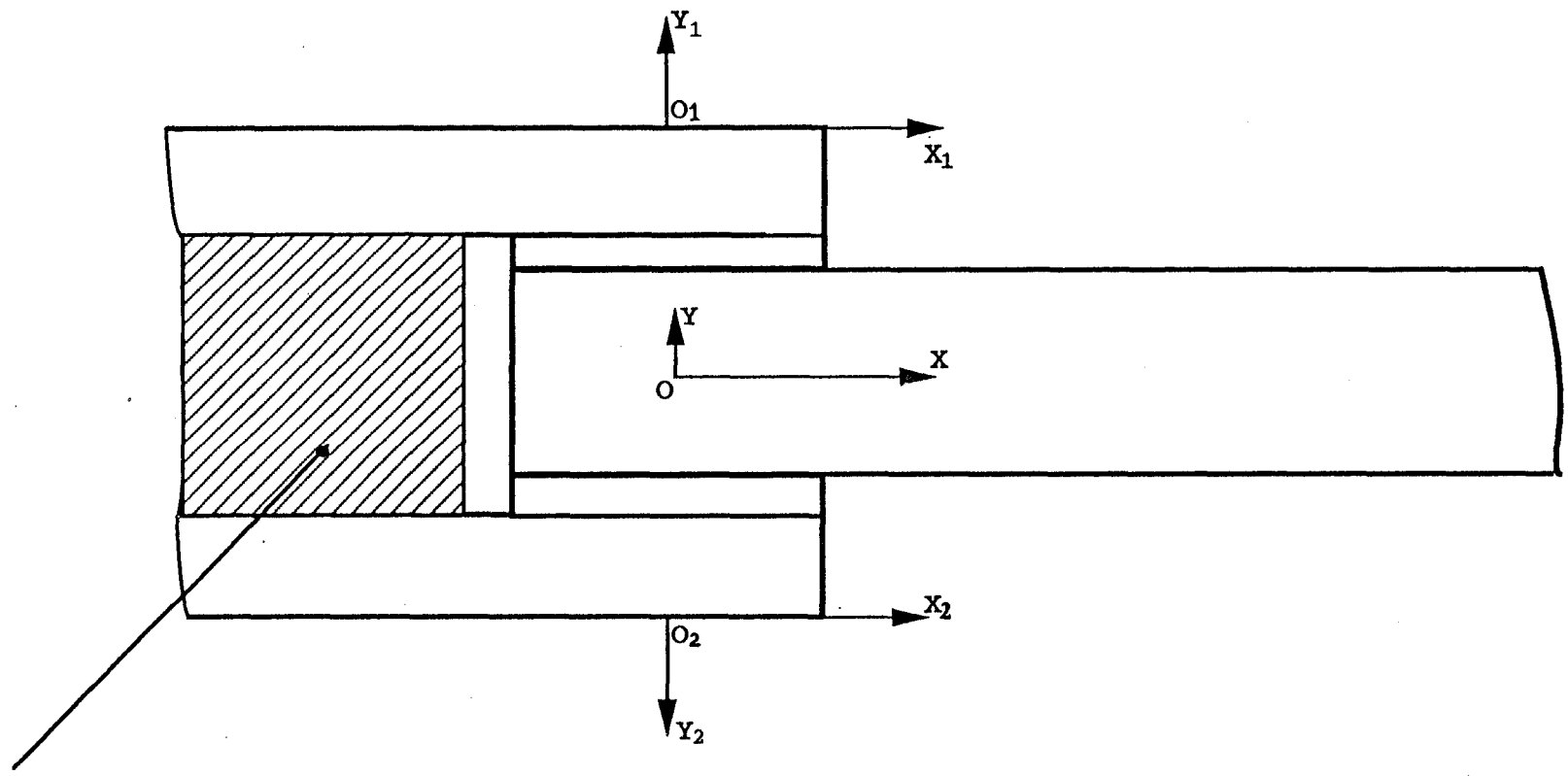
## VI.1. - INTRODUCTION

Dans le chapitre précédent, les différents résultats expérimentaux ont été obtenus par l'évaluation d'une grandeur macroscopique : la force de rupture par cisaillement du joint. La méthodologie expérimentale ainsi exploitée nous a permis de décrire globalement le comportement mécanique de l'assemblage vis à vis des différents paramètres.

En revanche, cette méthode ne permet pas de rendre compte des phénomènes locaux d'initiation et de propagation des microfissures dans la couche d'adhésif [cf. GILIBERT Y. (12) ]. Afin de mettre en évidence ces phénomènes, une étude expérimentale fine de l'assemblage s'avère nécessaire. Cette étude, fondée sur la technique d'extensométrie par jauges de déformation permet de suivre, de manière indirecte et locale, le long du recouvrement, le comportement mécanique du film d'adhésif.

## VI.2. - MODELISATION EXPERIMENTALE

La modélisation utilisée dans cette partie de l'étude est comparable tant du point de vue géométrique qu'expérimental à celle utilisée dans le chapitre précédent. La figure VI.1 décrit l'instrumentation de l'éprouvette expérimentale. Les assemblages ont été obtenus avec les deux types d'adhésif précédemment utilisés. Trois repères parallèles sont solidaires des substrats :  $(0, X, Y, Z)$ ,  $(0_1, X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $(0_2, X_2, Y_2, Z_2)$ . Le repère d'origine 0 est situé au centre de l'éprouvette. En revanche, ceux d'origine  $0_1$  et  $0_2$  sont situés respectivement en



Plaque évitant la flexion  
des couvre-joints extérieurs

Figure VI.1 : Repère d'instrumentation en jauges de l'assemblage



peau supérieure et inférieure, centrés sur la longueur de recouvrement. Des jauges de déformation unidirectionnelles sont collées suivant les axes  $0_1 X_1$  et  $0_2 X_2$ . Les tableaux VI.1 et VI.2 décrivent les positionnements des jauges sur les faces des deux assemblages.

Les paramètres de durcissement fixés pour les deux types d'adhésif sont les suivants :

- Température de prise à chaud : 175°C.
- Temps de cuisson à la température de prise à chaud : 1 heure.
- Pression de collage : 1,8 bar.

|          | Face 1<br>$X_1$ (mm) | Face 2<br>$X_2$ (mm) |
|----------|----------------------|----------------------|
| $J_1$    | 9                    | 8,8                  |
| $J_2$    | 7                    | 6,8                  |
| $J_3$    | 5                    | 4,8                  |
| $J_4$    | 3                    | 2,8                  |
| $J_5$    | 1                    | 0,8                  |
| $J_6$    | -1,8                 | -1,5                 |
| $J_7$    | -3,8                 | -3,5                 |
| $J_8$    | -5,8                 | -5,5                 |
| $J_9$    | -7,8                 | -7,5                 |
| $J_{10}$ | -9,8                 | -9,5                 |

Tableau VI.1 : Disposition des jauges  $J_i$  sur les faces de l'éprouvette. Adhésif  $M_1$ .  
 $Y_1 = Z_1 = 0, Y_2 = Z_2 = 0.$

|       | Face 1<br>$X_1$ (mm) | Face 2<br>$X_2$ (mm) |
|-------|----------------------|----------------------|
| $J_1$ | 8,7                  | 8,8                  |
| $J_2$ | 6,7                  | 6,8                  |
| $J_3$ | 4,7                  | 4,8                  |
| $J_4$ | 2,7                  | 2,8                  |
| $J_5$ | 0,7                  | 0,8                  |

Tableau VI.2 : Disposition des jauges  $J_i$  sur les faces de l'éprouvette .Adhésif  $M_2$ .  
 $Y_1 = Z_1 = 0, Y_2 = Z_2 = 0.$

Les photographies illustrées par les figures VI.2a à VI.3b montrent les détails de l'emplacement des jauges (cf. tableau VI.2) et l'amarrage de l'assemblage sur la machine de traction.

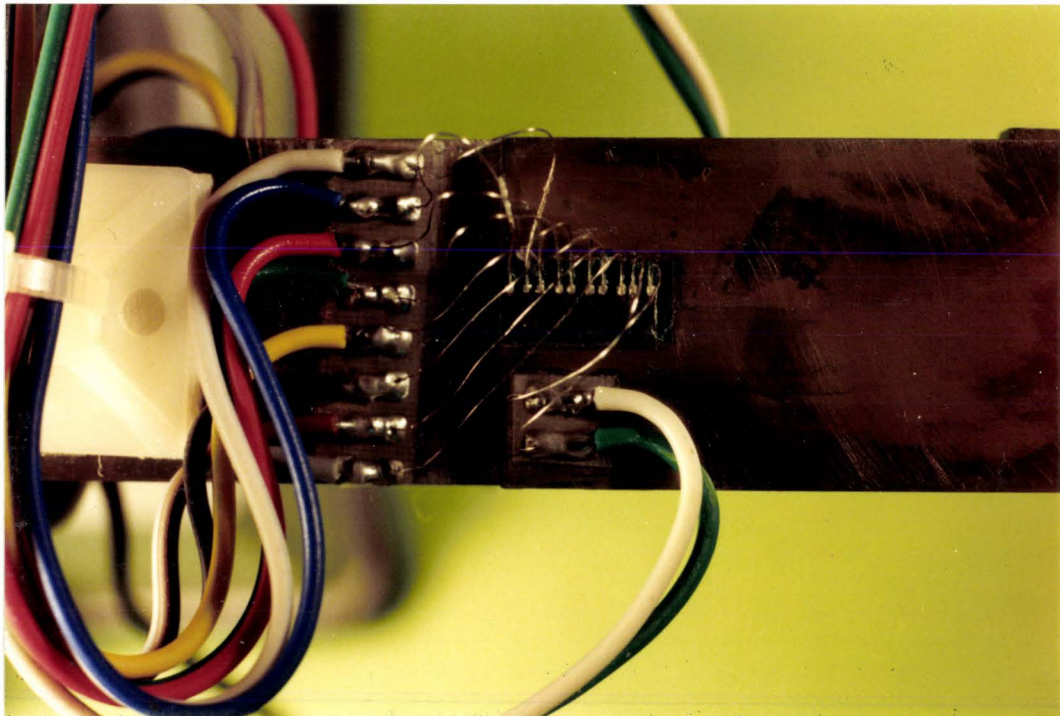


Figure VI.2a : Disposition des jauges sur une face de l'assemblage.

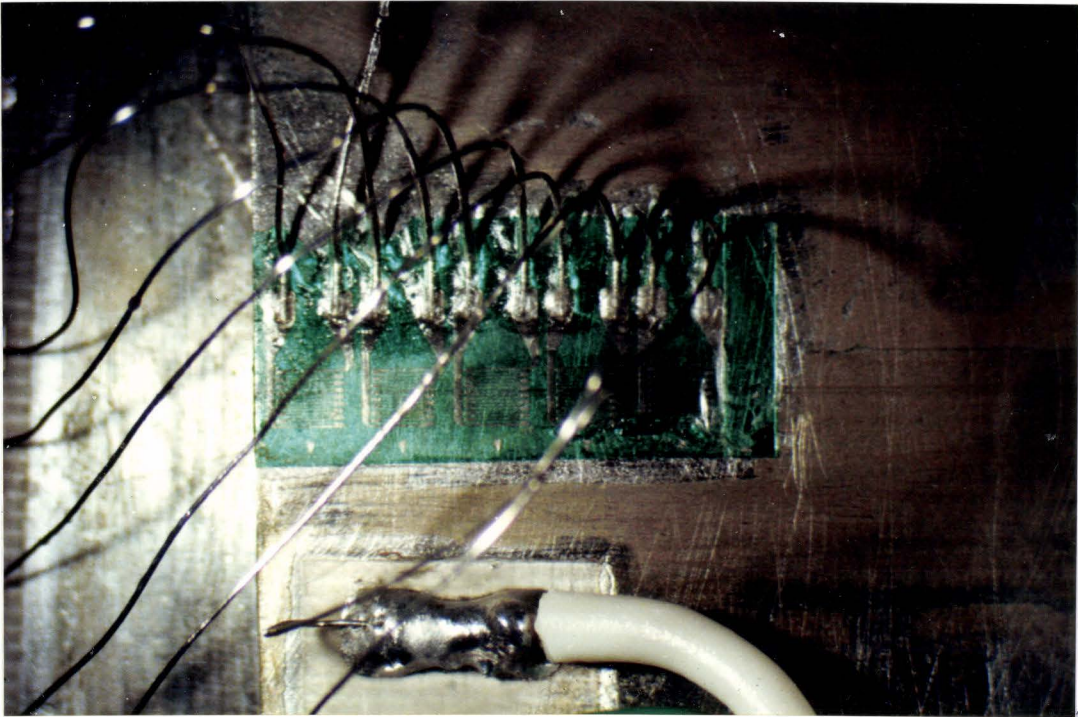


Figure VI.2b : Détail agrandi de la figure VI.2a.



Toutes les jauges, de résistance initiale 120 ohm et de facteur de jauge 2,1 ont été branchées en quart de pont deux fils sur une centrale HBM (CUHP 3200) à haute stabilité. Son système de mesure comprend 100 voies balayées automatiquement à l'aide d'un scrutateur. Les caractéristiques principales sont :

- Etendue de mesure :  $\pm 12000$  points
- Résolution : 1 point
- Tension d'alimentation : 5 Volts
- Fréquence : 1 KHz

### **VI.3.- ESSAIS MECANIQUES ET RESULTATS EXPERIMENTAUX**

Tous les essais mécaniques ont été réalisés à température ambiante sur une machine de traction INSTRON 8032. La vitesse de montée en charge imposée a été fixée à 0,01 kN/S. Sur chacune des faces de chaque assemblage, nous avons mesuré les déformations intégrées par chaque jauge. Les tableaux VI.3a, VI.3b et VI.4 décrivent sur chaque face les déformations superficielles des couvre-joints extérieurs.



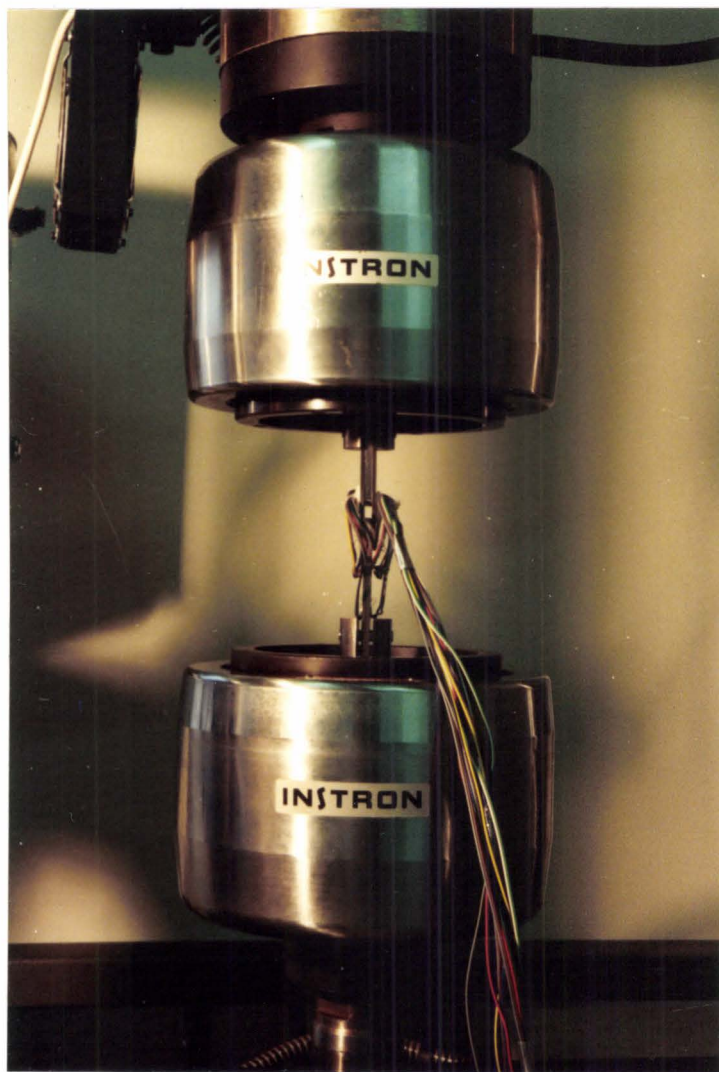


Fig. VI.3a : VUE DE FACE

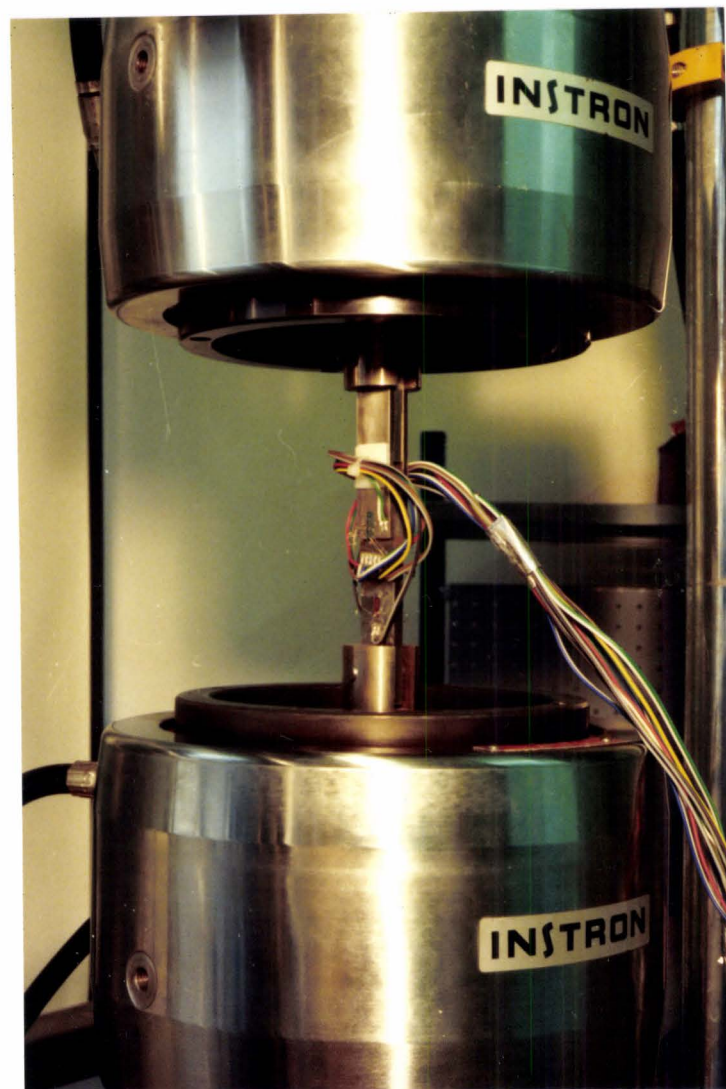


Fig. VI.3b : VUE DE DROITE.



Fig VI.3 : Photographies de l'amarage de l'éprouvette

| FORCE<br>(daN) | j <sub>1</sub> | j <sub>2</sub> | j <sub>3</sub> | j <sub>4</sub> | j <sub>5</sub> | j <sub>6</sub> | j <sub>7</sub> | j <sub>8</sub> | j <sub>9</sub> | j <sub>10</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0               |
| 52             | 0              | 9              | 18             | 22             | 23             | 25             | 26             | 22             | 33             | 30              |
| 101            | 0              | 19             | 35             | 43             | 46             | 49             | 51             | 45             | 40             | 50              |
| 150            | -1             | 25             | 49             | 60             | 65             | 69             | 73             | 65             | 51             | 60              |
| 201            | -1             | 29             | 58             | 73             | 80             | 85             | 91             | 86             | 72             | 94              |
| 223            | -1             | 30             | 62             | 77             | 85             | 91             | 99             | 94             | 81             | 103             |
| 250            | -1             | 32             | 66             | 84             | 93             | 100            | 108            | 105            | 93             | 113             |
| 301            | -1             | 35             | 74             | 95             | 105            | 114            | 124            | 124            | 115            | 134             |
| 350            | -1             | 38             | 81             | 105            | 117            | 128            | 140            | 142            | 135            | 155             |
| 400            | -3             | 40             | 89             | 115            | 130            | 143            | 157            | 163            | 159            | 180             |
| 451            | -4             | 42             | 95             | 125            | 142            | 156            | 173            | 181            | 180            | 201             |
| 500            | -5             | 44             | 102            | 134            | 153            | 169            | 188            | 199            | 200            | 220             |
| 552            | -5             | 46             | 108            | 143            | 165            | 183            | 205            | 218            | 221            | 240             |
| 600            | -6             | 48             | 114            | 153            | 175            | 196            | 219            | 235            | 240            | 259             |
| 651            | -7             | 49             | 120            | 161            | 186            | 209            | 235            | 253            | 259            | 277             |
| 700            | -8             | 50             | 126            | 170            | 197            | 221            | 250            | 270            | 278            | 296             |
| 750            | -9             | 52             | 131            | 178            | 208            | 235            | 265            | 287            | 297            | 314             |
| 800            | -9             | 54             | 138            | 187            | 219            | 247            | 280            | 305            | 317            | 333             |
| 846            | -10            | 55             | 143            | 195            | 229            | 259            | 294            | 321            | 335            | 350             |
| 901            | -11            | 56             | 148            | 204            | 240            | 273            | 310            | 340            | 355            | 370             |
| 950            | -12            | 57             | 154            | 213            | 250            | 286            | 326            | 357            | 374            | 388             |
| 1000           | -12            | 58             | 159            | 221            | 261            | 299            | 341            | 374            | 393            | 406             |
| 1051           | -14            | 56             | 162            | 228            | 271            | 312            | 357            | 393            | 412            | 424             |
| 1101           | -16            | 50             | 162            | 234            | 281            | 324            | 371            | 409            | 430            | 442             |
| 1151           | -17            | 48             | 165            | 240            | 290            | 337            | 386            | 427            | 448            | 460             |
| 1201           | -19            | 45             | 167            | 247            | 300            | 349            | 401            | 443            | 466            | 476             |
| 1253           | -22            | 41             | 168            | 253            | 309            | 362            | 417            | 462            | 486            | 496             |
| 1302           | -22            | 40             | 172            | 260            | 319            | 375            | 431            | 479            | 504            | 513             |
| 1351           | -23            | 39             | 175            | 267            | 328            | 387            | 446            | 495            | 522            | 531             |
| 1400           | -25            | 37             | 177            | 272            | 337            | 399            | 462            | 513            | 541            | 550             |
| 1450           | -26            | 34             | 179            | 279            | 345            | 412            | 477            | 530            | 559            | 568             |
| 1500           | -28            | 32             | 181            | 284            | 354            | 423            | 492            | 547            | 578            | 587             |
| 1550           | -29            | 29             | 183            | 290            | 364            | 436            | 508            | 565            | 598            | 606             |
| 1601           | -30            | 24             | 183            | 295            | 372            | 449            | 523            | 582            | 618            | 626             |
| 1652           | -31            | 21             | 184            | 301            | 380            | 461            | 539            | 600            | 637            | 645             |
| 1701           | -32            | 18             | 185            | 306            | 388            | 473            | 553            | 617            | 656            | 664             |
| 1801           | -34            | 5              | 180            | 313            | 403            | 497            | 585            | 652            | 697            | 705             |

Tableau VI.3a : Déformations relatives ( $10^{-6}$ ) associées aux charges. Adhésif M<sub>1</sub>. Face 1.

| FORCE<br>(daN) | $j_1$ | $j_2$ | $j_3$ | $j_4$ | $j_5$ | $j_6$ | $j_7$ | $j_8$ | $j_9$ | $j_{10}$ |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0              | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0     | 0        |
| 52             | -4    | -2    | -7    | -3    | -4    | -1    | 1     | 3     | 12    | 19       |
| 101            | -5    | -8    | -16   | -9    | -8    | -4    | 1     | 12    | 35    | 54       |
| 150            | -6    | -12   | -20   | -12   | -9    | -1    | 5     | 23    | 57    | 83       |
| 201            | -6    | -14   | -19   | -7    | -3    | 5     | 16    | 37    | 76    | 102      |
| 223            | -7    | -15   | -19   | -5    | -1    | 8     | 20    | 43    | 83    | 109      |
| 250            | -7    | -14   | -17   | -2    | 2     | 14    | 27    | 51    | 93    | 118      |
| 301            | -7    | -14   | -14   | 4     | 9     | 24    | 39    | 67    | 110   | 134      |
| 350            | -8    | -14   | -11   | 8     | 17    | 34    | 52    | 83    | 128   | 151      |
| 400            | -10   | -13   | -8    | 13    | 25    | 44    | 65    | 100   | 149   | 173      |
| 451            | -9    | -11   | -3    | 20    | 34    | 56    | 79    | 116   | 168   | 191      |
| 500            | -15   | -11   | 0     | 26    | 43    | 67    | 92    | 133   | 187   | 209      |
| 552            | -16   | -10   | 3     | 33    | 51    | 78    | 106   | 150   | 207   | 228      |
| 600            | -20   | -8    | 8     | 41    | 61    | 90    | 120   | 167   | 226   | 246      |
| 651            | -28   | -7    | 12    | 47    | 69    | 101   | 134   | 184   | 246   | 266      |
| 700            | -36   | -6    | 16    | 55    | 79    | 114   | 148   | 202   | 266   | 285      |
| 750            | -40   | -4    | 22    | 62    | 89    | 126   | 163   | 220   | 287   | 306      |
| 800            | -48   | -3    | 26    | 69    | 98    | 138   | 177   | 238   | 308   | 326      |
| 846            | -52   | -2    | 30    | 76    | 107   | 149   | 192   | 255   | 327   | 345      |
| 901            | -56   | -1    | 34    | 83    | 117   | 162   | 207   | 274   | 349   | 366      |
| 950            | -60   | -2    | 38    | 91    | 126   | 174   | 221   | 291   | 369   | 386      |
| 1000           | -64   | 1     | 43    | 97    | 135   | 187   | 236   | 309   | 390   | 406      |
| 1051           | -68   | 2     | 47    | 104   | 145   | 199   | 252   | 328   | 411   | 427      |
| 1101           | -70   | 1     | 49    | 110   | 154   | 211   | 266   | 346   | 431   | 446      |
| 1151           | -65   | 2     | 52    | 116   | 163   | 223   | 281   | 364   | 452   | 466      |
| 1201           | -62   | 2     | 55    | 123   | 171   | 235   | 295   | 381   | 473   | 486      |
| 1253           | -60   | 2     | 58    | 130   | 181   | 248   | 311   | 401   | 494   | 507      |
| 1302           | -58   | 2     | 61    | 135   | 190   | 260   | 326   | 419   | 515   | 528      |
| 1351           | -58   | 2     | 65    | 141   | 199   | 273   | 342   | 438   | 537   | 549      |
| 1400           | -49   | 2     | 68    | 148   | 208   | 285   | 357   | 456   | 558   | 570      |
| 1450           | -40   | 2     | 70    | 154   | 216   | 298   | 372   | 475   | 580   | 590      |
| 1500           | -33   | 2     | 73    | 159   | 225   | 310   | 387   | 494   | 601   | 612      |
| 1550           | -31   | 2     | 75    | 165   | 233   | 322   | 402   | 512   | 623   | 633      |
| 1601           | -27   | 2     | 76    | 169   | 241   | 335   | 418   | 532   | 646   | 655      |
| 1652           | -23   | -1    | 79    | 175   | 250   | 347   | 434   | 552   | 668   | 677      |
| 1701           | -21   | -2    | 80    | 179   | 258   | 360   | 449   | 571   | 689   | 698      |
| 1801           | -21   | -2    | 81    | 187   | 273   | 385   | 481   | 610   | 734   | 742      |

Tableau VI.3b : Déformations relatives ( $10^{-6}$ ) associées aux charges. Adhésif M<sub>1</sub>. Face 2.

| FORCE<br>(daN) | Face 1         |                |                |                |                | Face 2         |                |                |                |                |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                | J <sub>1</sub> | J <sub>2</sub> | J <sub>3</sub> | J <sub>4</sub> | J <sub>5</sub> | J <sub>1</sub> | J <sub>2</sub> | J <sub>3</sub> | J <sub>4</sub> | J <sub>5</sub> |
| 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 0              | 1              | 0              | 0              | 0              |
| 54             | 0              | 0              | 2              | 4              | 6              | 1              | 7              | 11             | 14             | 17             |
| 203            | 0              | -5             | -2             | 4              | 12             | 4              | 29             | 52             | 66             | 75             |
| 504            | -1             | 5              | 30             | 54             | 74             | -1             | 31             | 80             | 115            | 139            |
| 594            | -1             | 8              | 38             | 68             | 93             | -4             | 28             | 86             | 129            | 157            |
| 702            | -1             | 11             | 49             | 86             | 115            | -5             | 30             | 97             | 147            | 181            |
| 803            | -2             | 21             | 66             | 110            | 145            | -4             | 13             | 98             | 166            | 208            |
| 905            | -2             | 23             | 74             | 125            | 165            | -5             | 10             | 103            | 181            | 229            |
| 1003           | -3             | 22             | 82             | 139            | 184            | -5             | 6              | 108            | 196            | 250            |
| 1102           | -5             | 14             | 83             | 150            | 202            | -6             | -5             | 109            | 207            | 268            |
| 1204           | -8             | -22            | 55             | 142            | 206            | -21            | -21            | 102            | 209            | 278            |
| 1304           | -8             | -23            | 61             | 154            | 225            | -23            | -22            | 108            | 223            | 299            |
| 1354           | -8             | -43            | 20             | 117            | 203            | -23            | -114           | -111           | 15             | 101            |
| 1404           | 8              | -142           | -155           | -113           | -142           | -1             | -113           | -142           | -103           | -87            |

Tableau VI.4 : Déformations relatives ( $10^{-6}$ ) associées aux charges. Adhésif M<sub>2</sub>.

Par ailleurs, deux jauges symétriques ,collées dans la section droite du substrat médian permettent de vérifier l'alignement de l'éprouvette dans l'axe géométrique de la machine de traction. Les indications données par ces jauges (cf tableau VI.5 ) confirment bien que notre système d'ancrage expérimental basé sur une double articulation permet de minimiser l'influence des efforts parasites de flexion due aux défauts d'alignement.

| FORCE<br>(daN) | Jauge J'<br>déformations<br>$10^{-6}$ | Jauge J''<br>déformations<br>$10^{-6}$ |
|----------------|---------------------------------------|--|
| 0              | 0                                     | 0                                      |
| 54             | 30                                    | 23                                     |
| 203            | 88                                    | 80                                     |
| 504            | 213                                   | 210                                    |
| 594            | 254                                   | 245                                    |
| 702            | 303                                   | 290                                    |
| 803            | 353                                   | 349                                    |
| 905            | 398                                   | 380                                    |
| 1003           | 441                                   | 435                                    |
| 1102           | 484                                   | 479                                    |
| 1204           | 522                                   | 515                                    |
| 1304           | 565                                   | 559                                    |
| 1354           | 602                                   | 590                                    |
| 1404           | 0                                     | 0                                      |

Tableau VI.5 : Déformations relatives des jauges J'et J'' collées sur les deux faces du substrat médian.



L'exploitation graphique des mesures expérimentales tient compte de deux types de courbe :  $F = f(\epsilon)$  et  $\epsilon = g(X_i)$ . L'une exprime la variation de l'effort de traction en fonction de la déformation moyenne calculée sur les deux faces tandis que l'autre tient compte de la variation de la déformation moyenne en fonction de la position moyenne des jauges collées sur les faces symétriques. Les courbes illustrées sur les figures VI.4 à VI.7 montrent les variations des charges en fonction des déformations et celles des déformations en fonction de la position des jauges.

#### VI.4. - INTERPRETATION

Les courbes de type  $F = f(\epsilon)$  mettent en évidence, de manière claire les seuils d'apparition et de propagation des microfissures dans le joint de l'adhésif. Les décrochements (changement significatif de pente) observés sur chaque courbe traduisent qu'aux points de collage correspondants des jauges :

- Le couvre-joint ne s'allonge plus ou se contracte.
- Entre deux substrats, il y a, par l'intermédiaire du joint d'adhésif, une modification du mode de transmission de l'effort de traction.

Alors, il se produit localement, soit :

- Une rupture de type adhésif correspondant à la destruction de la liaison interfaciale adhésif-substrat.
- Une rupture de type cohésif due à la destruction des liaisons macromoléculaires de l'adhésif.

En revanche, les courbes de type  $\epsilon = f(X_i)$  précisent, à charge constante, les zones du couvre-joint qui, sous les efforts de cisaillement et de décollement, sont soumises à des sollicitations de compression ou de traction.

Sur les figures VI.4 et VI.5, nous avons adopté la notation suivante :

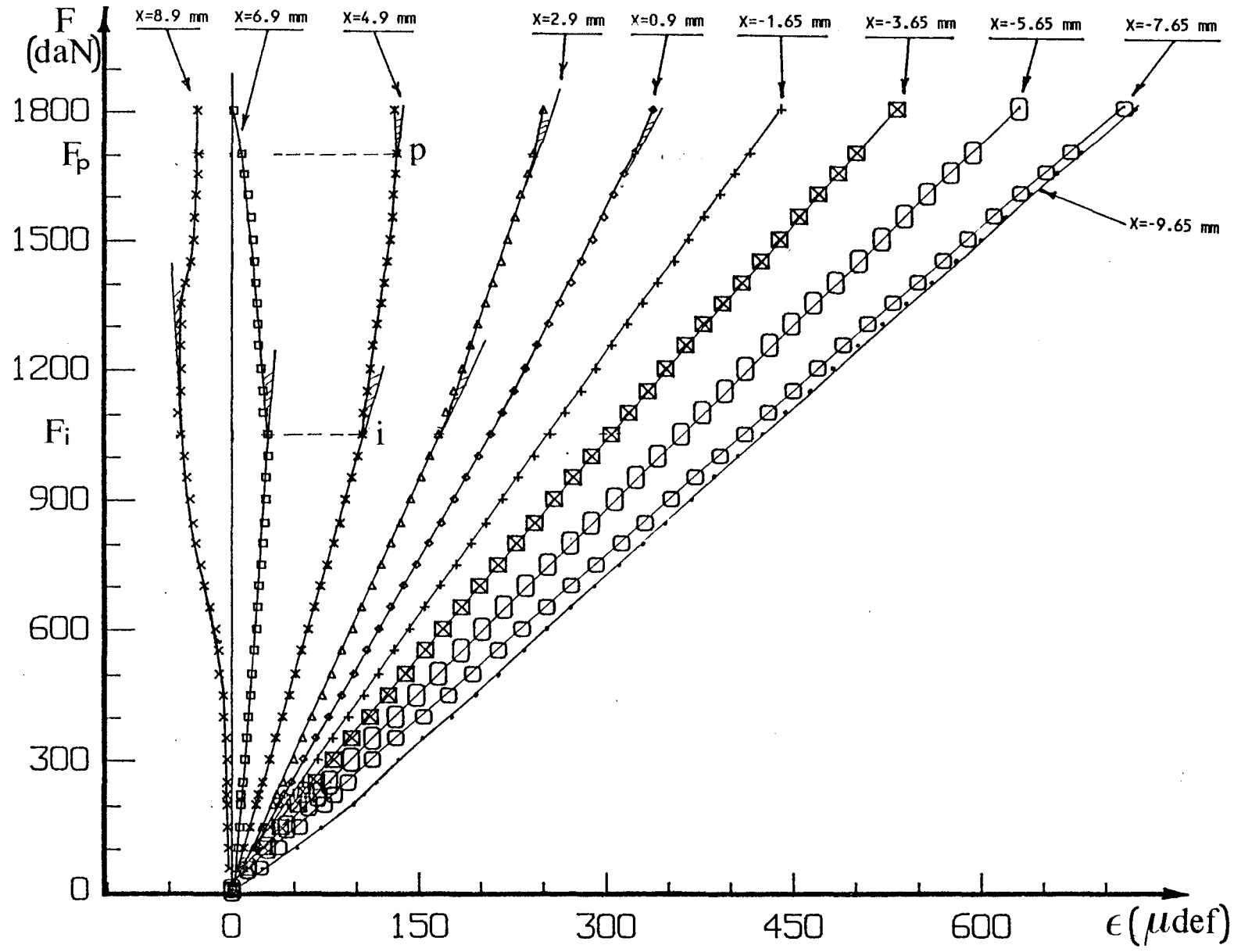


Figure VI.4 : Charge (F) de traction associée aux déformations moyennes superficielles des couvre-joints extérieurs. Adhésif M<sub>1</sub>.

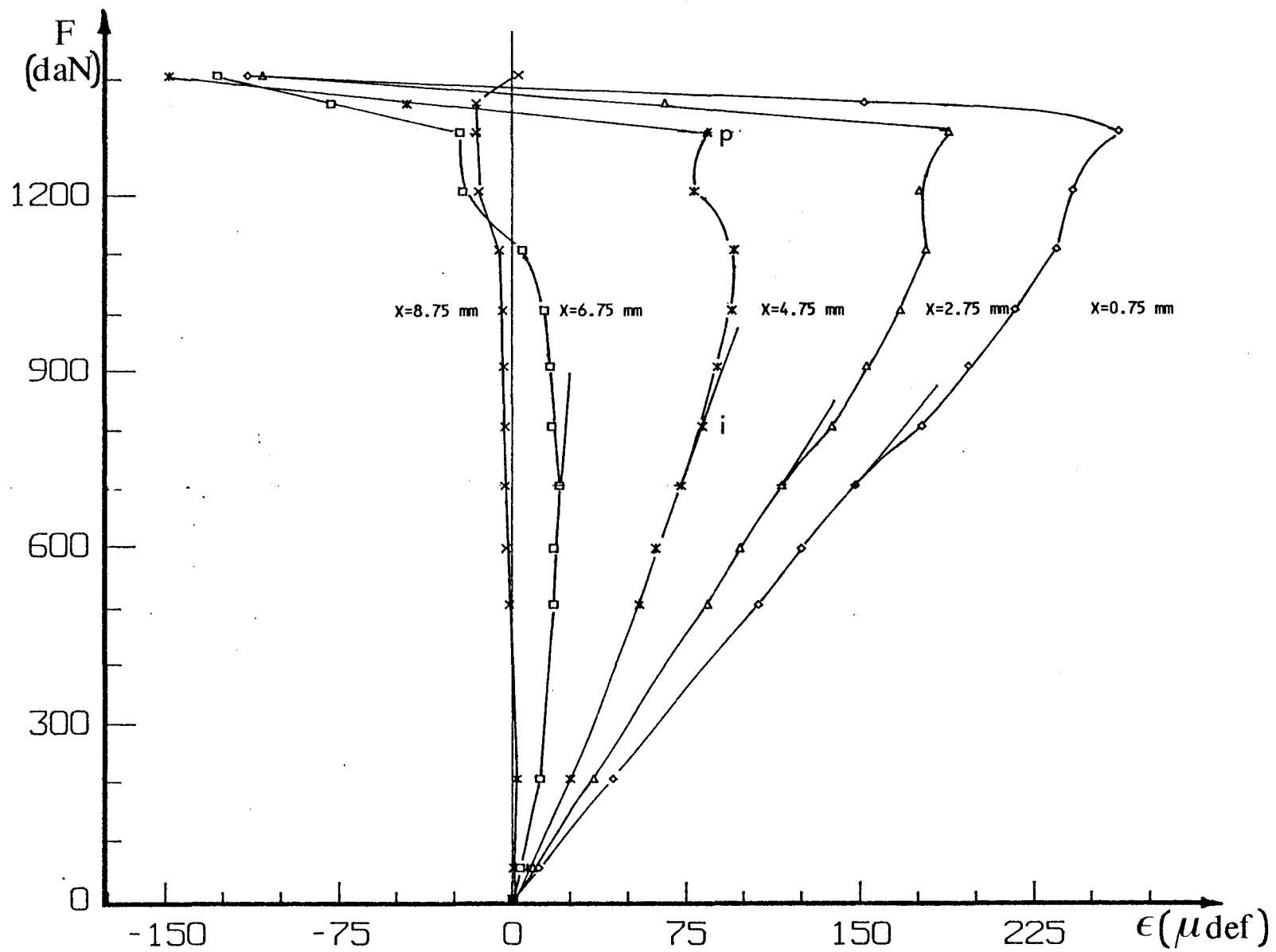


Figure VI.5 : Charge (F) de traction associée aux déformations moyennes superficielles des couvre-joints extérieurs. Adhésif M<sub>2</sub>.

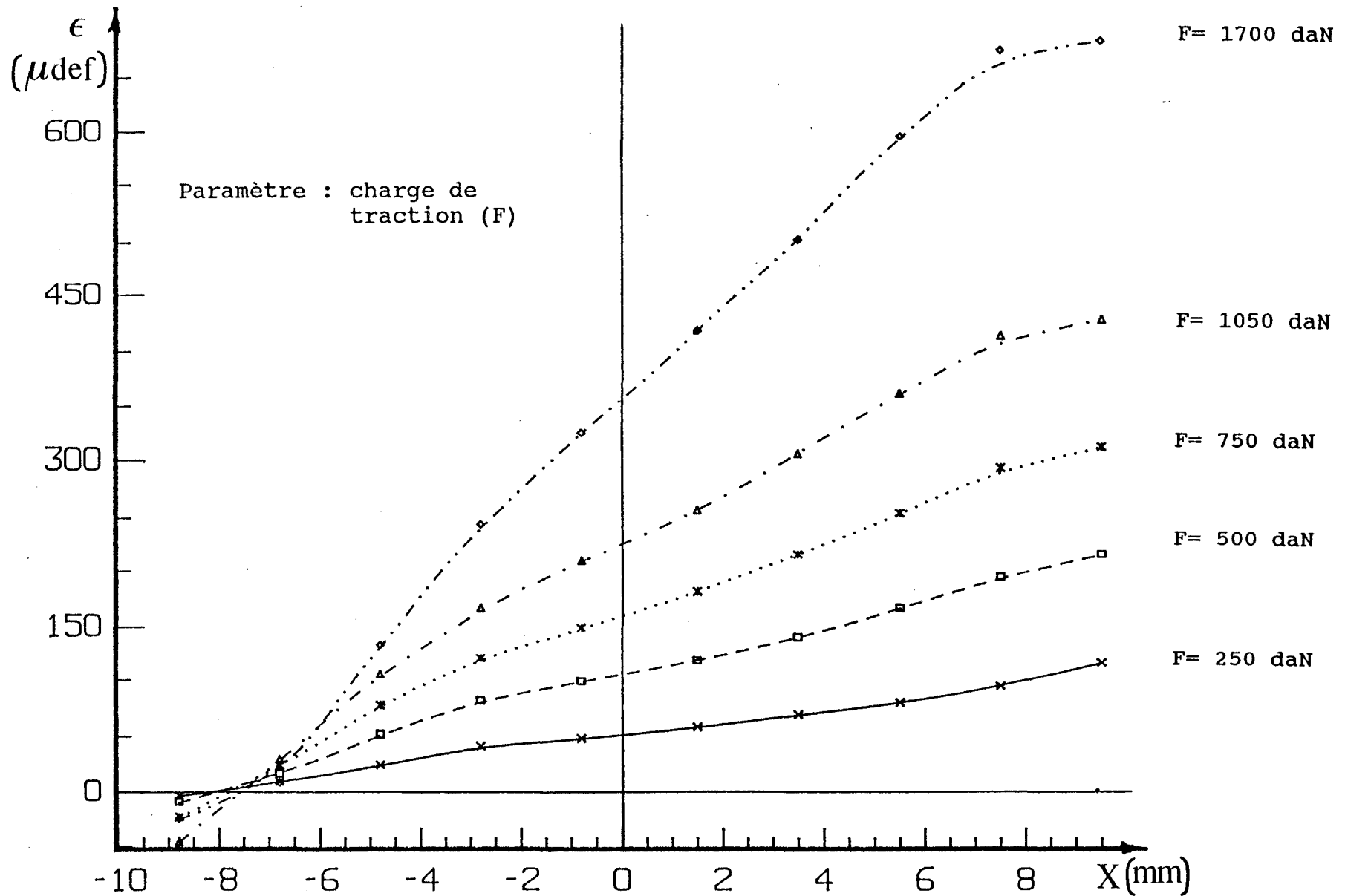


Figure VI.6 : Variation de la déformation superficielle moyenne des couvre-joints extérieurs en fonction de la position des jauges. Adhésif M<sub>1</sub>.

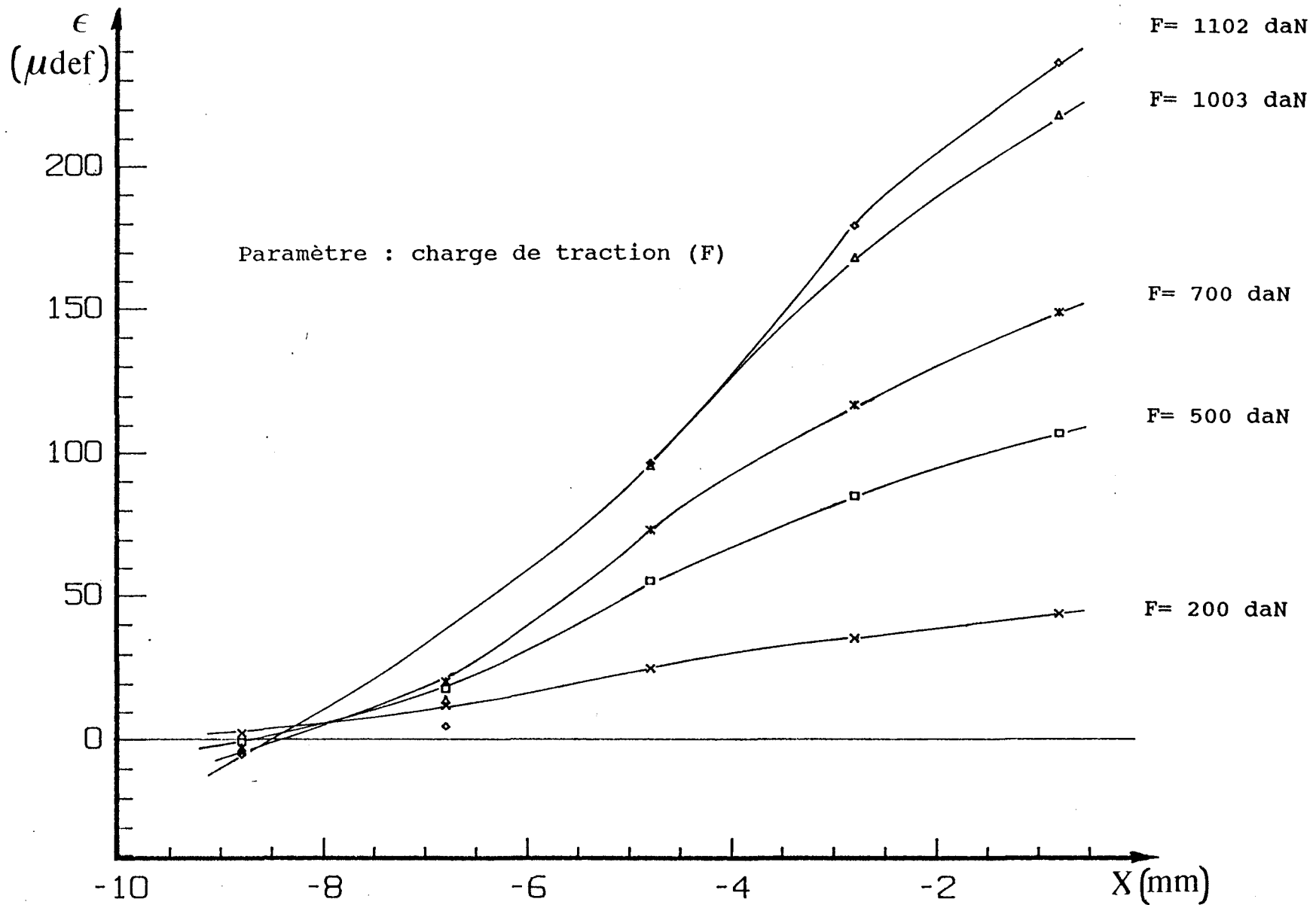


Figure VI.7 : Variation de la déformation superficielle moyenne des couvre-joints extérieurs en fonction de la position des jauges. Adhésif M<sub>2</sub>.

$F_i$  : force au seuil d'initiation des microfissures.

$F_p$  : force au seuil de propagation des microfissures.

Pour les deux adhésifs testés, l'exploitation des courbes du type  $F=f(\epsilon)$  donne les efforts  $F_i$  et  $F_p$  en fonction de la position moyenne des jauges situées sur les deux faces des couvre-joints extérieurs:

a) Adhésif M<sub>1</sub>.

|            |                    |                    |
|------------|--------------------|--------------------|
| X= 8.9 mm  | $F_i = 600$ daN    | $F_p = 1700.6$ daN |
| X= 6.9 mm  | $F_i = 1000$ daN   | $F_p = 1550.3$ daN |
| X= 4.9 mm  | $F_i = 1051.2$ daN | $F_p = 1700.6$ daN |
| X= 2.9 mm  | $F_i = 1101.2$ daN | $F_p = 1700.6$ daN |
| X= 0.9 mm  | $F_i = 1450.3$ daN | $F_p = 1700.6$ daN |
| X=-1.65 mm | $F_i = 1750.8$ daN |                    |
| X=-3.65 mm | $F_i = 1351.2$ daN |                    |
| X=-5.65 mm | $F_i = 1450.3$ daN |                    |
| X=-7.65 mm | $F_i = 1601.4$ daN |                    |
| X=-9.65 mm | $F_i = 1700.6$ daN |                    |

$F_r = 1801$  daN

b) Adhésif M<sub>2</sub>.

|            |                  |                  |
|------------|------------------|------------------|
| X= 8.75 mm | $F_i = 1054$ daN | $F_p = 1354$ daN |
| X= 6.75 mm | $F_i = 702$ daN  | $F_p = 1304$ daN |
| X= 4.75 mm | $F_i = 803$ daN  | $F_p = 1304$ daN |
| X= 2.75 mm | $F_i = 905$ daN  | $F_p = 1304$ daN |
| X= 0.75 mm | $F_i = 1003$ daN | $F_p = 1304$ daN |

$F_r = 1404$  daN

La micrographie effectuée dans un plan perpendiculaire au plan du film d'adhésif (cf. fig VI.8) montrent localement l'épaisseur du joint.

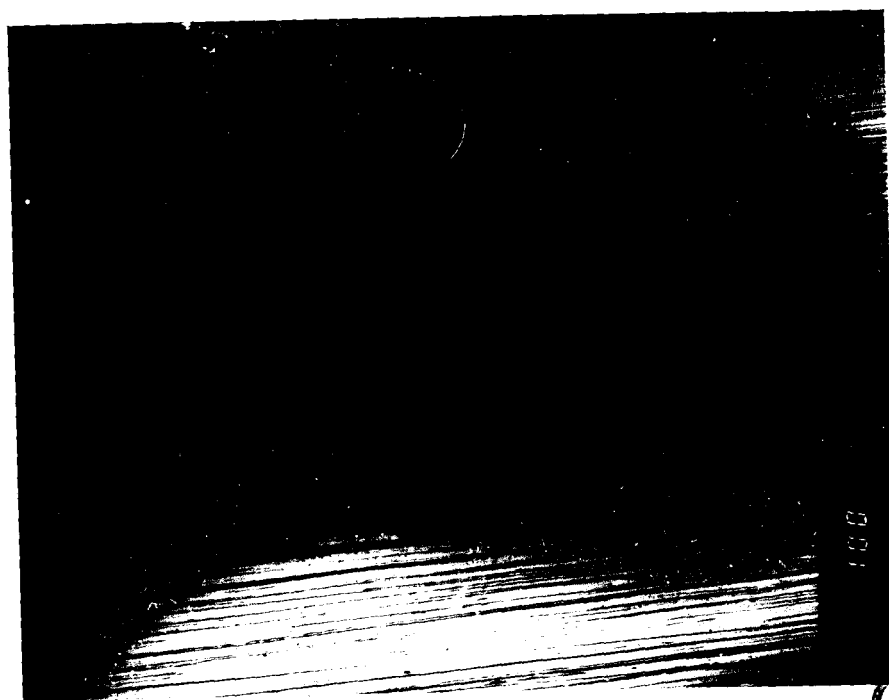


Fig VI.8 : Mise en évidence de l'épaisseur du film d'adhésif

Un examen des faciès de rupture du joint cisailé a été effectué à l'aide d'un microscope électronique à balayage. Il laisse apparaître dans certains cas, une faible présence de poches d'air dont l'existence est pratiquement impossible à éliminer.

Ainsi nous avons pu mettre en évidence sur les deux types d'adhésif testés l'existence de deux zones distinctes de rupture: zone à larges plage de rupture et à petites plages de rupture (cf fig.VI.9 et VI.10). Il semble à priori que la présence de ces zones ne soit liée ni à la nature des adhésifs, ni à la pression de collage.

**a) ZONES A LARGES PLAGES DE RUPTURE**

Elles se manifestent particulièrement au voisinage du contour extérieur du joint d'adhésif. L'examen micrographique effectué sur les surfaces de rupture révèle:

- Des zones de rupture adhésive induites par les sollicitations de décollement à l'interface adhésif-substrat. L'examen des facettes complémentaires de liaison illustre très clairement le décollement de la couche de colle (fig VI.11).

- Des zones de rupture cohésive par cisaillement du joint. Dans ces zones, on observe des fissurations perpendiculaires à la direction d'application de l'effort avec, en outre des fragments cisailés à orientation transverse (fig VI.12 et VI.13).

L'ensemble des zones à larges plages de rupture constitue à notre sens des zones de rupture mixte c'est à dire des zones caractérisées par des ruptures de type adhésive et cohésive résultant des sollicitations de décollement et cisaillement du joint.

**b) ZONES A PETITES PLAGES DE RUPTURE**

Ces zones présentent sous l'action des contraintes de cisaillement des fissurations perpendiculaires à la direction de l'effort de traction. Elles se caractérisent donc par des sollicitation de cisaillement préférentiel. Les figures VI.14 et VI.15 montrent l'aspect des faciès de rupture des deux adhésifs pour deux pressions de collage différentes.



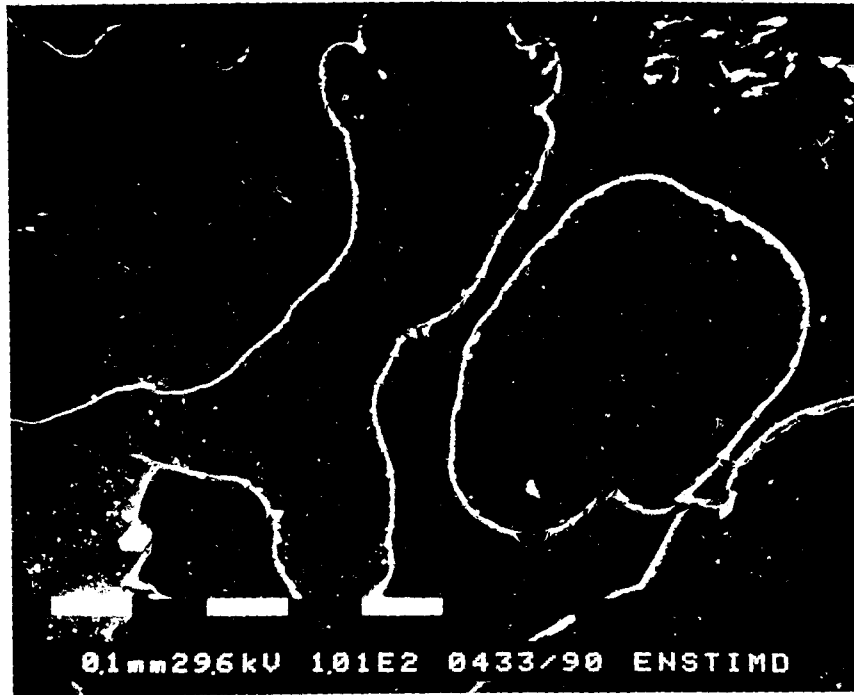
Fig VI.11a : Adhésif M<sub>1</sub>

Fig VI.11b : Facette complémentaire de la figure VI.11a.

Fig VI.11 : Zones complémentaires à larges plages de rupture adhésive.  $P = 3,6$  bars,  $T = 175$  °C,  $t = 1$  heure.

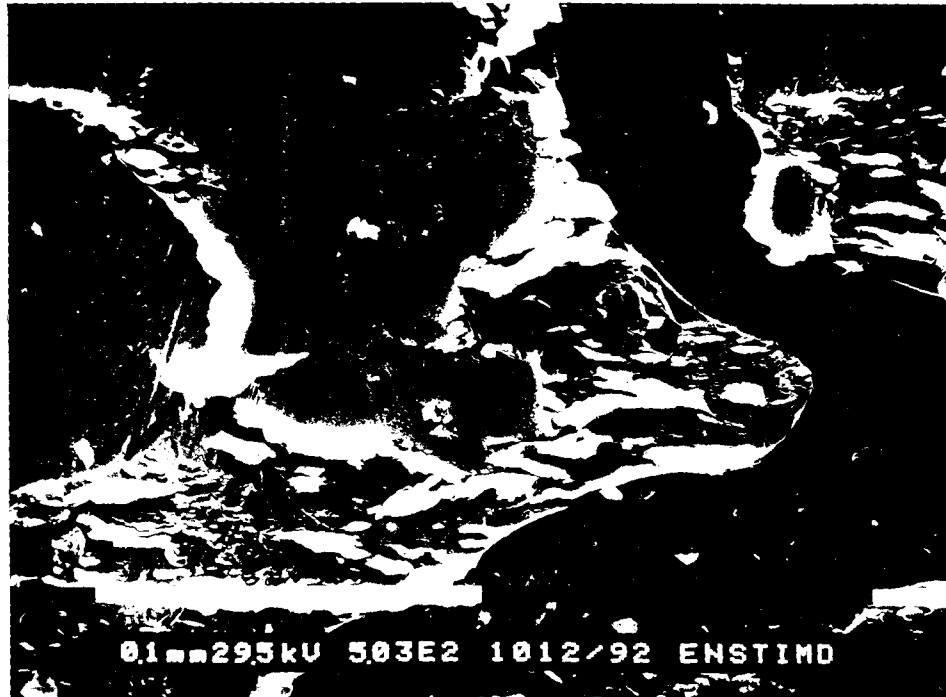


Fig VI.12 : Mise en évidence des fissurations et des fragmentations dans le joint.



Fig VI.13 : Vue d'un bord fissuré et décollé.

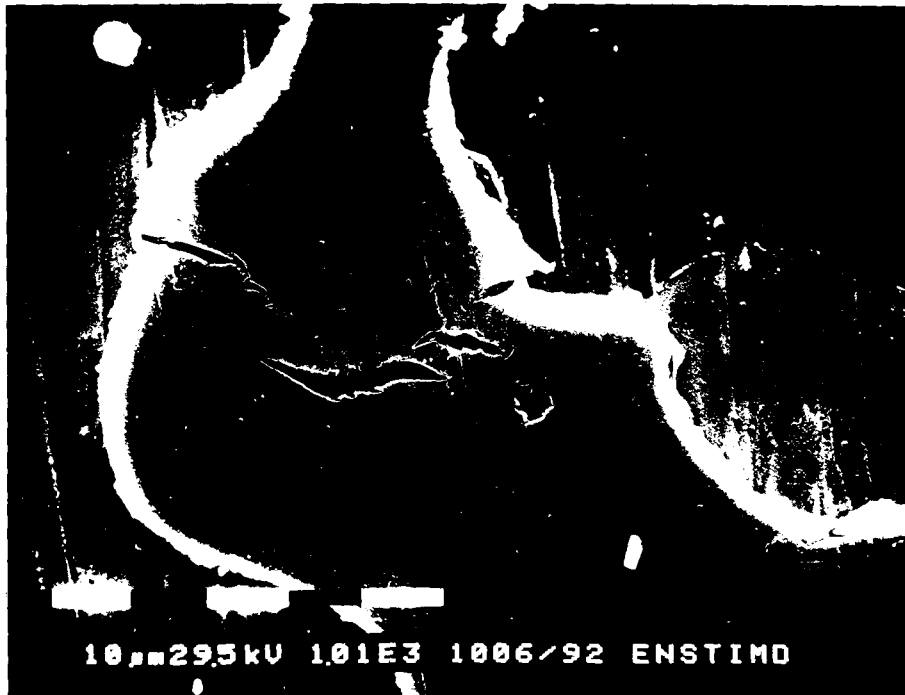
Fig VI.14a :Adhésif M<sub>1</sub>.Fig VI.14b :Adhésif M<sub>2</sub>.

Fig VI.14 : Fissurations et fragmentations dans la zone cis-  
saillée. P = 3,6 bars, T = 175 °C, t = 1 heure.

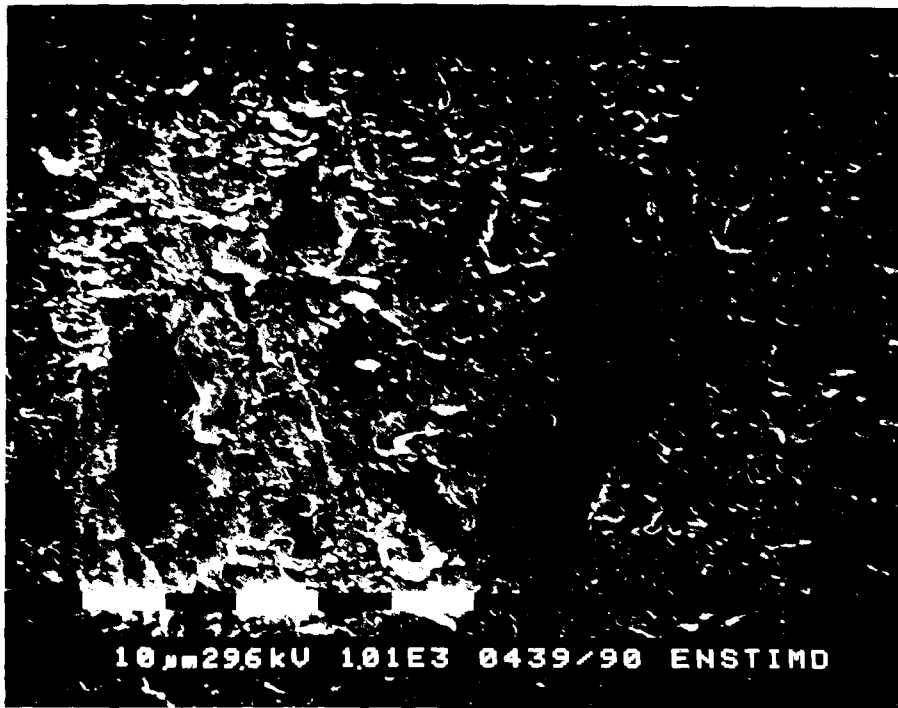
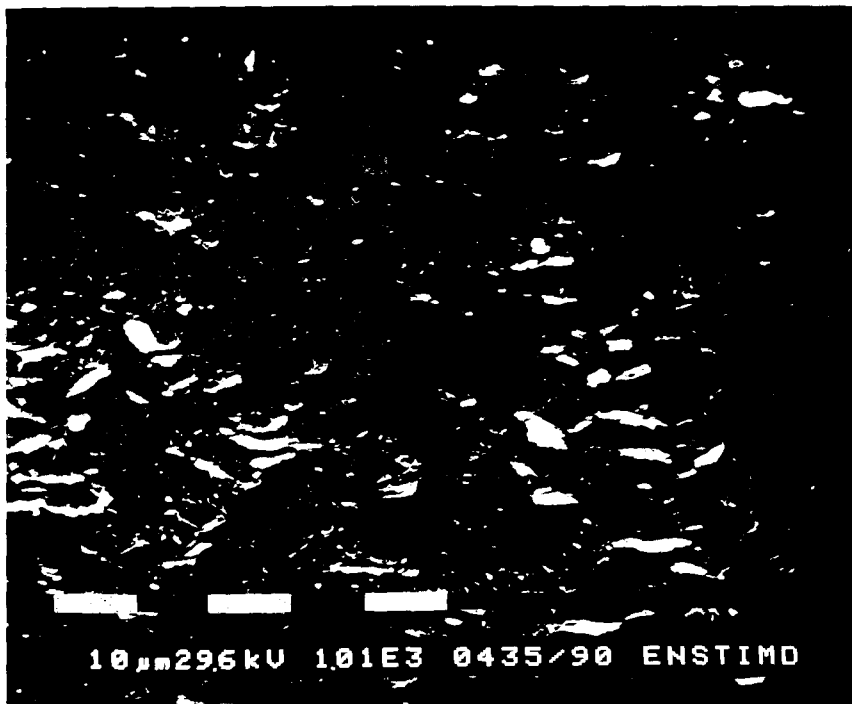
Fig VI.15a : Adhésif M<sub>1</sub>.Fig VI.15b : Adhésif M<sub>2</sub>

Fig VI.15 : Fissurations dans la zone cisailée  
 P = 7,6 bars, T = 175 °C, t = 1 heure.

### VI.5. - CONFRONTATION THEORIE-EXPERIENCE

Dans cette partie, nous vérifions l'adéquation de nos résultats expérimentaux avec les résultats théoriques de Y.GILIBERT et A.RIGOLOT (15). En appliquant la technique des développements asymptotiques raccordés au voisinage des extrémités de l'assemblage, ces auteurs ont déterminé les déformations longitudinales et transversales des tôles (couvre-joints). Dans notre cas, nous ne prendrons en compte que les déformations longitudinales superficielles des tôles. L'expression de ces déformations déterminées par (15) à l'abscisse (X) le long du recouvrement est donnée par:

$$\epsilon_L = A \left[ 1 - \frac{\text{sh}\omega\bar{X}}{\text{sh}\omega/2} + \omega B (S/L) \text{cth } \omega/2 \right] \quad (\text{VI.1})$$

avec:  $\bar{X} = X/L$

$$A = 2 \tau_m S / EL \quad , \quad \omega^2 = 2 G_c L^2 / E S S_c$$

$$B = C \left( - \frac{(X+1/2)L}{2S} \right) + C \left( \frac{(X-1/2)L}{2S} \right)$$

Dans ces relations, (E) est le module de Young des substrats; (S) l'épaisseur des couvre-joints extérieurs; ( $G_c$ ) le module de cisaillement de l'adhésif; (L) la longueur de recouvrement et ( $S_c$ ) l'épaisseur du joint de colle.  $\tau_m$  représente la contrainte moyenne de cisaillement déterminée à partir de l'effort de traction.

$E = 219000 \text{ MPa}$  ;  $S = 2,6 \text{ mm}$  ;  $S_c = 0,2 \text{ mm}$  ;  $L = 20 \text{ mm}$ .

La fonction (C) est définie par :

$$C(x) = \frac{e^{px}}{5,7} ( 0,89 \text{ COS}(j_1 x) - 17,4 \text{ SIN}(j_1 x) ).$$

avec :  $p = 2,106$  et  $j_1 = 1,125$ .

Dans l'équations VI.1, toutes les quantités sont connues à l'exception du module de cisaillement de l'adhésif. Pour déterminer ce module, nous avons exploité la relation VI.1 dans la partie centrale de l'assemblage. En effet, compte tenu de la faible longueur de recouvrement de l'assemblage, seul le comportement mécanique de la partie centrale est élastique. Dans les zones situées au voisinage des extrémités et aux extrémités, le comportement est élastique non linéaire. Elles sont par conséquent inadaptées à la détermination des caractéristiques mécaniques de l'adhésif. Ensuite, l'application de la technique des approximations successives permet le calcul de  $G_c$  dans le domaine élastique de la courbe  $F=f(\epsilon)$  (voir figure VI.16 ). L'évaluation de  $G_c$  a été obtenue sur la jauge située dans la partie centrale du recouvrement.

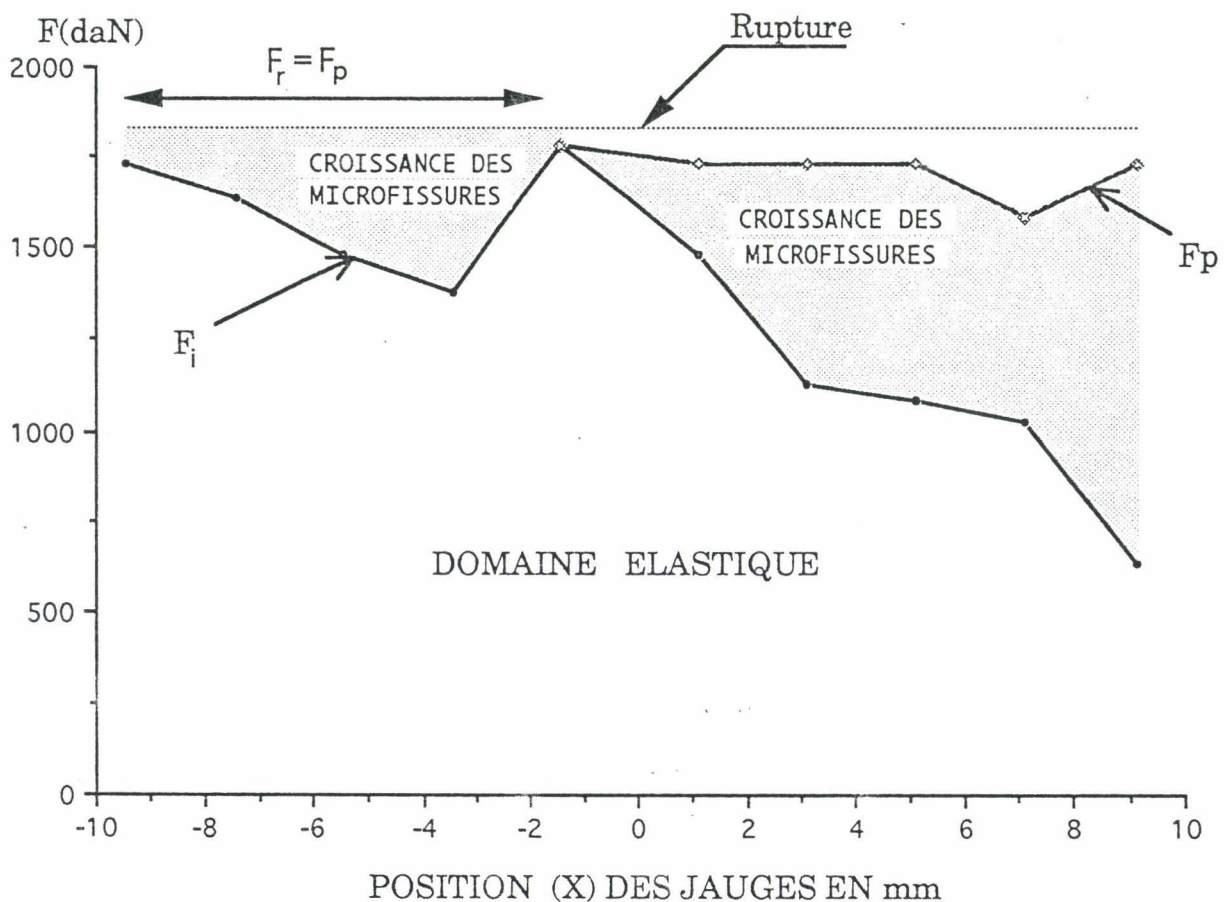


Figure VI.16

Dans le cas de l'adhésif  $M_2$  (voir les courbes de la figure VI.17), la détermination de  $G_c$  n'a pas été effectuée car l'instrumentation de l'assemblage en jauges de déformation ne se prête pas à une telle détermination.

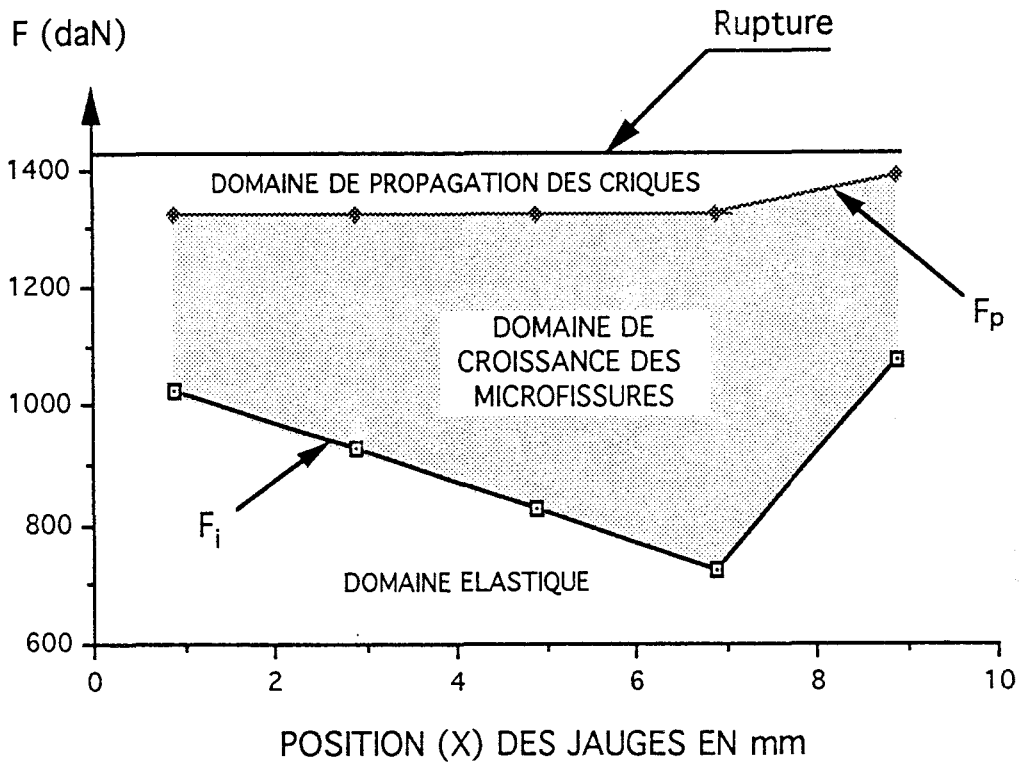


Figure VI.17

La valeur moyenne semi-expérimentale de  $G_c$ , déterminée en 7 points de mesure sur la jauge collée dans la partie centrale du recouvrement est donnée par :

$$G_c = 2701 \text{ MPa} , \quad \Delta G_c / G_c = 6 \% .$$

Les courbes illustrées par la figure VI.18 décrivent les variations théoriques (15) et expérimentales des déformations superficielles des couvre-joints extérieurs, le long du recouvrement.

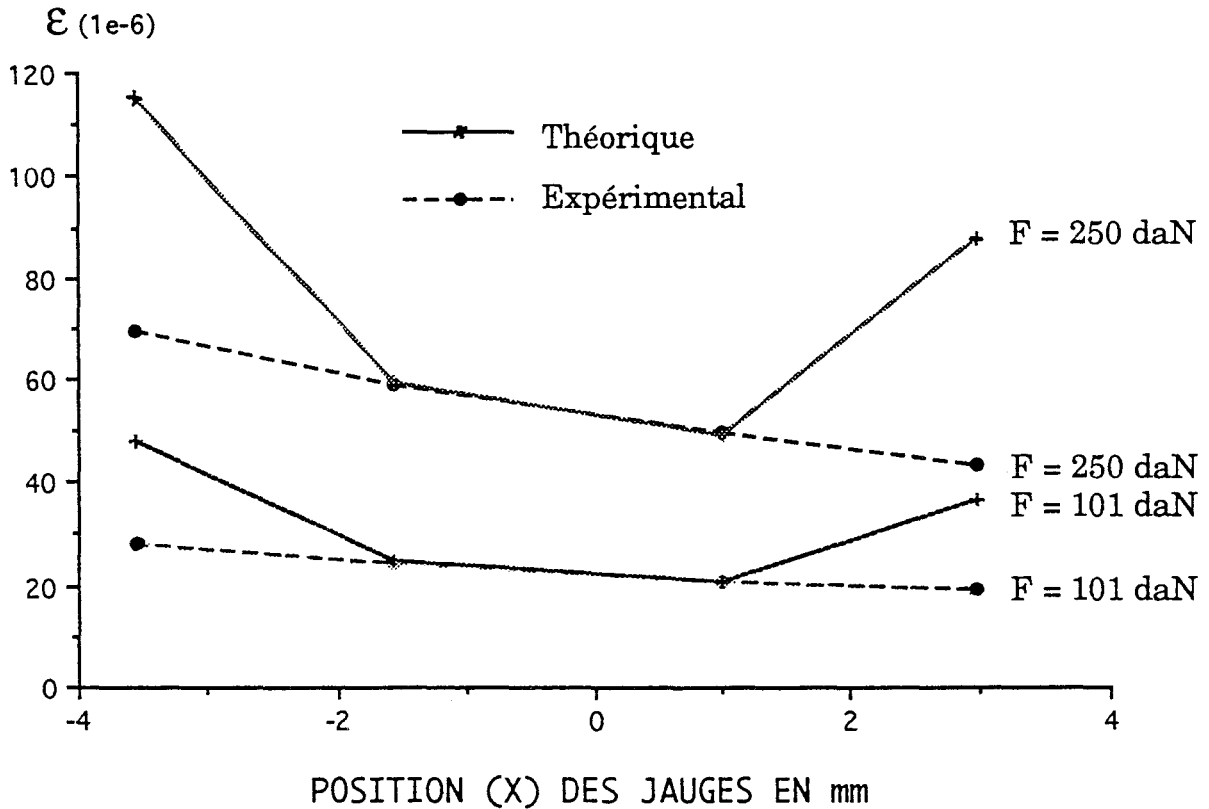


Figure VI.18 : Variations théoriques (15) et expérimentales des déformations superficielles des couvre-joints.

Lors des essais de cisaillement par traction effectués à température ambiante, nous avons observé, à température de cuisson relativement élevée ( $T > 100$  °C), un comportement à la rupture de type fragile sur tous les films d'adhésif testés. Pour de tels comportements, les valeurs du coefficient de Poisson de l'adhésif sont de l'ordre de  $0,33 \pm 0,02$ . Dans ce cas, la valeur du module de Young  $E_c$  déterminée à l'aide de la relation  $E_c = G_c / (2 * (1 + \nu_c))$ . En tenant compte de  $\Delta G_c / G_c = 6$  % on trouve:

$$E_c = 7184 \text{ MPa} \pm 539 \text{ MPa}$$



## VI.6. - CONCLUSION

Cette étude s'intègre parfaitement à nos travaux sur la détermination des paramètres optimaux de durcissement des adhésifs. Sur les deux types d'adhésif testés, nous avons mis en évidence grâce à la technique d'analyse extensométrique par jauges mise au point par Y. GILIBERT (12) : les seuils d'amorçage des microfissures en régime stable, leur croissance et propagation en régime stable, l'amorçage du début de propagation des criques en régime stable et la propagation rapide de ces criques en régime instable ( voir comportement de l'adhésif  $M_2$  ) jusqu'à la rupture ultime du joint.

Une comparaison entre les déformations relatives superficielles des couvre-joints extérieurs a été faite. Au centre du recouvrement, nous observons une bonne adéquation entre nos résultats expérimentaux et les résultats théoriques issues des travaux de Y. GILIBERT et A. RIGOLOT (15). En dehors de la partie centrale du recouvrement, l'adéquation est moins bonne en raison de la géométrie de notre modèle expérimentale (faible longueur de recouvrement ( $L = 20$  mm)).

Par ailleurs, l'examen micrographique révèle que la ruine du joint est caractérisée par deux types de rupture: les ruptures de type mixte au voisinage des bords libres et les ruptures de type cohésif dans la partie médiane du joint. Il convient de noter que les fissurations transverses semblent très marquées lorsque la pression de collage est faible (environ 1.8 bar); en revanche, lorsqu'elle est élevée, les fissurations disparaissent. On observe alors des fragmentations transverses induites par les ruptures de type cohésif par cisaillement.

CHAPITRE VII

ETUDE THEORIQUE

## VII.1. - INTRODUCTION

Dans cette partie de l'étude, nous faisons une analyse de quelques méthodes utilisées dans le calcul de joints sollicités en cisaillement. Plusieurs modèles théoriques ont été proposés ou développés sur ce sujet. Ils sont en fait pour la plupart basés sur des hypothèses simplificatrices. La première étude théorique sur les assemblages collés ( à simple recouvrement ) a été faite par ARNOVLJEVIC (8); elle repose sur les hypothèses suivantes:

- Les pièces à assembler sont supposées être des poutres.
- Le joint d'adhésif est en état de cisaillement pur.
- La contrainte de cisaillement dans le joint est proportionnelle au glissement relatif des substrats.

Le modèle théorique proposé par la suite par O.VOLKERSEN (10) a apporté une amélioration dans l'analyse physique et mécanique du modèle précédent. Son étude prend en compte les contraintes de cisaillement et de décollement (contraintes normales au plan de collage) résultant de la flexion des substrats due à l'excentrement des charges appliquées. Ces contraintes, variables suivant la longueur de recouvrement ont été supposées invariables suivant la coordonnée d'épaisseur du film d'adhésif. Ces mêmes phénomènes ont été mis en évidence par GOLAND et REISSNER (9).

Les solutions analytiques proposées, basées sur la résolution d'équations différentielles, coïncident généralement avec les observations expérimentales sauf au voisinage des bords libres du recouvrement.

La modélisation d'assemblages à double recouvrement trouve son origine dans les travaux de O.VOLKERSEN (10). Ses résultats analytiques, basés sur l'élasticité linéaire, expriment également les contraintes de cisaillement et de

décollement en fonction des caractéristiques mécaniques et géométriques des substrats et de l'adhésif. << Loin >> des extrémités du recouvrement, le modèle de VOLKERSEN reste en accord avec les résultats expérimentaux de Y.GILIBERT (12). En revanche, au voisinage des bords libres du recouvrement ce modèle ne satisfait pas les conditions aux limites. Dans cette zone, Y.GILIBERT et A.RIGOLOT (13) utilisent la technique des développements asymptotiques pour mettre en évidence les phénomènes suivants :

- L'influence des singularités.
- La comparaison des ordres de grandeur des contraintes de traction et de cisaillement.
- La nature des contraintes de cisaillement et de décollement.

En fait quel que soit le type de l'assemblage (simple recouvrement ou double recouvrement), la plastification ou la ruine sont généralement initiées au voisinage des bords libres du recouvrement. C'est la conséquence des sollicitations de type :

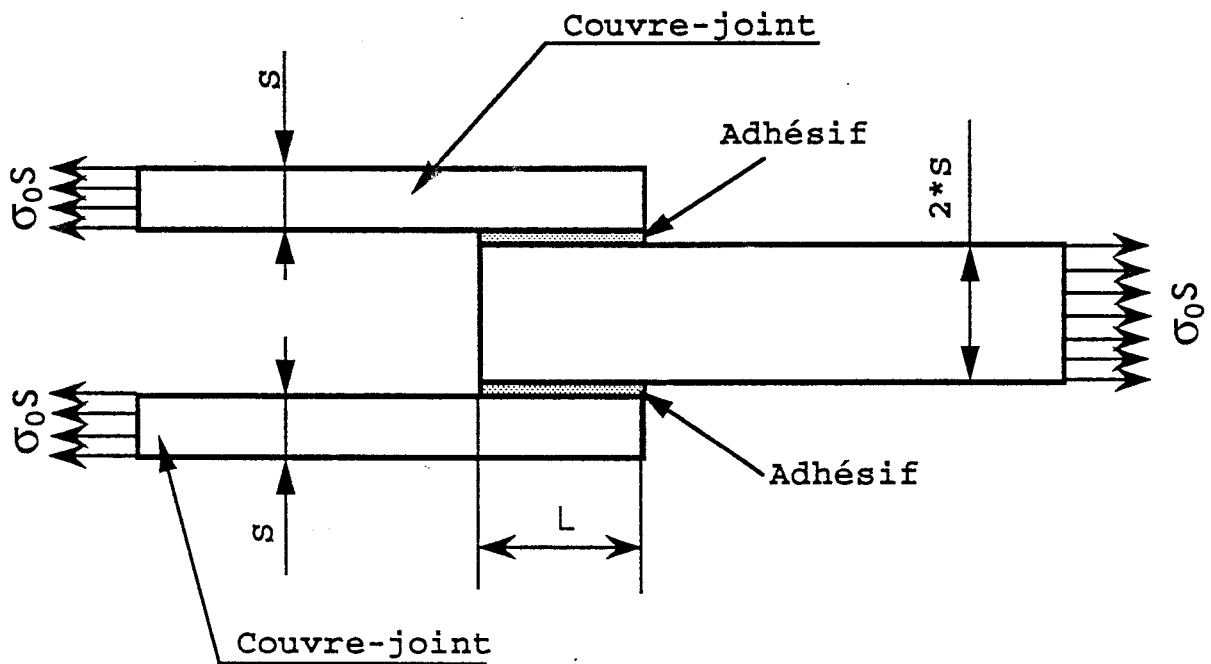
- cisaillement préférentiel du joint.
- décollement à l'extrémité du joint.
- mixte (combinant cisaillement et décollement).

Sans pour autant offrir une analyse complète de tous les phénomènes, le modèle de VOLKERSEN (10) que nous avons développé n'induit aucune singularité de contraintes dans le joint. De même, il permet de vérifier les conditions aux limites sur les bords libres du recouvrement. Quoique ne permettant pas d'évaluer les contraintes uniaxiales suivant l'axe longitudinal de l'assemblage, il permet en revanche de mettre en évidence les contraintes de cisaillement, de

décollement et les phénomènes de couche limite observés par GILIBERT et RIGOLOT (15) dans leur étude.

## VII.2. - POSITION DU PROBLEME

Il s'agit d'étudier l'équilibre de l'assemblage expérimental représenté par la figure VII.1. Cet assemblage, semblable à celui étudié par O.VOLKERSEN (10) et Y.GILIBERT (12), est sollicité en traction pure en dehors de la zone de recouvrement. Dans l'étude expérimentale menée par la suite, un montage permet de minimiser de manière importante le pelage dû à la flexion des couvre-joints extérieurs.



$\sigma_0$  : contrainte uniaxiale dans les substrats.

$L$  : longueur de recouvrement.

$S$  : épaisseur des substrats.

Figure VII.1 : Equilibre global de l'assemblage.

### VII.2.1. - HYPOTHESES

Il convient avant toute chose de faire un certain nombre d'hypothèses sur le comportement et la nature des matériaux, la nature des contraintes et des sollicitations extérieures.

On supposera de ce fait que :

- les substrats sont constitués par le même matériau.
- les matériaux constitutifs des substrats et de l'adhésif sont élastiques linéaires, homogènes et isotropes.
- dans le film d'adhésif, il y a prépondérance des contraintes de cisaillement et de décollement vis-à-vis de la contrainte normale.
- Les sollicitations extérieures sont quasi-statiques.

### VII.2.2.- EQUILIBRE D'UNE SECTION SITUEE AU MILIEU DU FILM D'ADHESIF SUIVANT L'APPROXIMATION DE LA RESISTANCE DES MATERIAUX

Dans l'assemblage à double recouvrement sollicité en traction, les éléments assemblés par collage transmettent les efforts de cisaillement au joint d'adhésif. Dans les zones de recouvrement, sous l'action excentrée des contraintes de cisaillement par rapport aux substrats extérieurs, il y a flexion de ceux-ci et par conséquent naissance de contraintes de décollement dans le joint. La figure VII.2 donne l'équilibre de l'assemblage à double recouvrement dont le film d'adhésif est soumis à des contraintes de cisaillement par traction sur les substrats.

Ainsi, pour une coupe transversale, parallèle à la surface de recouvrement et située au milieu du film d'adhésif, cette figure (VII.2) montre l'équilibre du couvre-joint supérieur.

a) Equilibre des forces

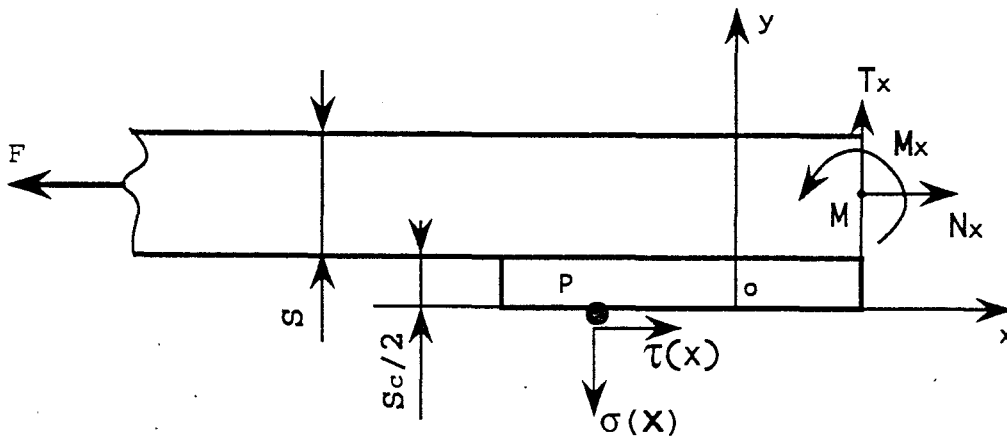
L'équilibre des forces selon les axes  $ox$  et  $oy$  se traduit par les équations :

$$-F + N_x + \int_{-1/2}^x \tau(x) dx = 0 \quad (\text{VII.1})$$

$$T_x - \int_{-1/2}^x \sigma(x) dx = 0 \quad (\text{VII.2})$$

b) Equilibre des moments

On notera par :  $M(x, \frac{1}{2}(S+S_c))$  le point courant de la ligne moyenne du substrat supérieur et  $P(x, 0)$  le point courant du milieu de la couche de colle. ( voir figure VII.2 ).



$$F = \sigma_0 S \quad , \quad S_c : \text{épaisseur du joint d'adhésif.}$$

Figure VII.2: Equilibre élémentaire dans la section de coupe.

L'équilibre des moments s'exprime par :

$$M_X = \frac{1}{2} (S+S_c) \int_{-L/2}^X \tau(x) dx - \int_{-L/2}^X (x-X) \sigma(x) dx \quad (\text{VII.3})$$

En intégrant par parties le second terme de l'égalité, il vient:

$$M_X = \frac{1}{2} (S+S_c) \int_{-L/2}^X \tau(x) dx - (X-x) \int_{-L/2}^X \sigma(t) dt + \int_{-L/2}^X \left[ \int_{-L/2}^X \sigma(t) dt \right] dx \quad (\text{VII.4})$$

### VII.3. - SOLUTION SELON LA METHODE DE VOLKERSEN (10).

#### VII.3.1. - Equations constitutives.

Dans le cadre de la théorie des poutres droites et suivant l'hypothèse des petites déformations dans le domaine élastique, l'équation de la ligne élastique déformée du substrat supérieur est donnée par:

$$\frac{1}{2}(S+S_c) \int_{-L/2}^X \tau(x) dx + \int_{-L/2}^X \left[ \int_{-L/2}^X \sigma(t) dt \right] dx = E I \frac{d^2 y_s}{dx^2} \quad (\text{VII.5})$$



Par double dérivation de l'équation précédente, on obtient :

$$\frac{1}{2} (S+S_c) \frac{d\tau(X)}{dX} + \sigma(X) = - E I \frac{d^4 y_s}{dX^4} \quad (\text{VII.6})$$

Compte tenu de l'hypothèse de continuité de la contrainte normale à la traversée de l'interface " substrat-adhésif ", le déplacement  $y_c(X)$  de la colle dans le sens des contraintes de décollement est égal à la flèche  $y_s$  du substrat supérieur.

$$Y_c = Y_s \quad (\text{VII.7})$$

L'expression de la loi de HOOKE pour le déplacement de la couche d'adhésif dans la direction des contraintes de décollement permet d'écrire :

$$Y_c = \frac{S_c}{E_c} \sigma \quad (\text{VII.8})$$

Par suite, l'équation différentielle des contraintes de décollement est donnée par :

$$\frac{d^4 \sigma}{dX^4} + 12 \frac{E_c}{E S^3 S_c} \sigma = - \frac{6(S+S_c)}{E S^3 S_c} \frac{d\tau}{dX} \quad (\text{VII.9})$$

(compte tenu de  $I=S^3/12$ , moment d'inertie par unité de largeur du couvre-joint supérieur).

Dans la zone de recouvrement, le déplacement relatif à la cote  $X$  peut être exprimé par :

$$\delta(X) = \delta_0 - \int_{-L/2}^X \epsilon_1(\alpha) d\alpha + \int_{-L/2}^X \epsilon_2(\alpha) d\alpha \quad (\text{VII.10})$$

où  $\delta_0$ ,  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  représentent respectivement le déplacement à l'extrémité gauche du recouvrement, les déformations du substrat supérieur et inférieur. La loi de d'élasticité appliquée au cisaillement du film de colle d'épaisseur  $S_c$  permet d'écrire :

$$\delta(X) = \frac{S_c}{G_c} \tau(X) \quad (\text{VII.11})$$

Par dérivation, on obtient:

$$\frac{d\tau}{dX} = \frac{G_c}{S_c} (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (\text{VII.12})$$

où:

$$\epsilon_1(X) = \frac{\sigma_0}{E} - \frac{1}{E S} \int_{-L/2}^X \tau(\alpha) d\alpha - \frac{6 M_x}{E S^2} \quad (\text{VII.13})$$

$$\epsilon_2(X) = \frac{1}{E S} \int_{-L/2}^X \tau(\alpha) d\alpha \quad (\text{VII.14})$$

L'équation des contraintes de cisaillement s'écrit alors :

$$\frac{d^3\tau}{dX^3} - \frac{(5+3(S_c/S))}{E S S_c} \frac{d\tau}{dX} = 6 \frac{G_c}{E S^3 S_c} \sigma \quad (\text{VII.15})$$

Après introduction des grandeurs adimensionnelles suivantes :

$$\begin{aligned}\bar{X} &= \frac{X}{L} : \text{coordonnée spécifique} \\ \bar{\tau} &= \frac{\tau}{\tau_m} : \text{contrainte de cisaillement spécifique} \\ \bar{\sigma} &= \frac{\sigma}{\sigma_0} : \text{contrainte de décollement spécifique} \\ \psi &= \frac{S_c}{S} : \text{épaisseur spécifique}\end{aligned}\tag{VII.16}$$

les équations différentielles des contraintes de décollement et de cisaillement deviennent (compte tenu de l'égalité  $\sigma_0 S = \tau_m L$ ):

$$\frac{d^4 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^4} + 12 \frac{E_c L^4}{E S^3 S_c} \bar{\sigma} = - 6(1+\psi) \frac{E_c L^2}{E S S_c} \frac{d\bar{\tau}}{d\bar{X}}\tag{VII.17}$$

$$\frac{d^3 \bar{\tau}}{d\bar{X}^3} - (5+3\psi) \frac{G_c L^2}{E S S_c} \frac{d\bar{\tau}}{d\bar{X}} = 6 \frac{G_c L^4}{E S^3 S_c} \bar{\sigma}$$

Bien que correspondant à peu près à la méthode utilisée par GOLAND et REISSNER (9) pour le calcul des contraintes dans le cas d'assemblages métalliques à simple recouvrement, la méthode de VOLKERSEN (10) permet de déterminer les contraintes avec une précision relativement satisfaisante; en revanche, les modèles théoriques utilisés dans les deux cas ne permettent pas d'assurer les conditions élémentaires d'équilibre dans le cadre de l'élasticité plane (avec  $\sigma_{11}$  négligeable par rapport à  $\tau = \sigma_{12}$  et  $\sigma = \sigma_{22}$  )

$$\frac{\partial \tau}{\partial y} = 0$$

(VII.18)

$$\frac{\partial \tau}{\partial x} + \frac{\partial \sigma}{\partial y} = 0$$

En adoptant l'hypothèse des contraintes de décollement variables linéairement suivant la coordonnée d'épaisseur du joint, et ayant pour valeurs  $\sigma + \sigma_r$  (respectivement  $\sigma - \sigma_r$ ) à l'interface supérieur (resp inférieur) VOLKERSEN (10) a pu montrer que l'équation d'équilibre élémentaire et celle des moments s'avéraient satisfaisantes. La partie non uniforme de la contrainte de décollement  $\sigma_r$  s'exprime alors par la relation suivante :

$$\sigma_r = \frac{S_c}{2} \frac{d\tau}{dx} \quad (\text{VII.19})$$

soit en variables adimensionnelles :

$$\sigma_r = \frac{S_c S}{2 L^2} \frac{d\tau}{dx} \quad (\text{VII.20})$$

Les allongements dus à  $\sigma_r$  dans la moitié inférieure de la couche d'adhésif (figure VII.3) donnent un déplacement  $\eta$  telle que :

$$\begin{aligned} \eta &= \int_0^{-S_c/2} \epsilon_y dy \\ &= \frac{S_c}{4 E_c} \sigma_r \end{aligned} \quad (\text{VII.21})$$

L'angle apparent de glissement  $\gamma_2$  de la couche d'adhésif inférieure est donné par :

$$\gamma_2 = - \frac{d\eta}{dx}$$

$$= - \frac{S_c}{4 E_c} \frac{d\sigma_r}{dx} \quad (\text{VII.22})$$

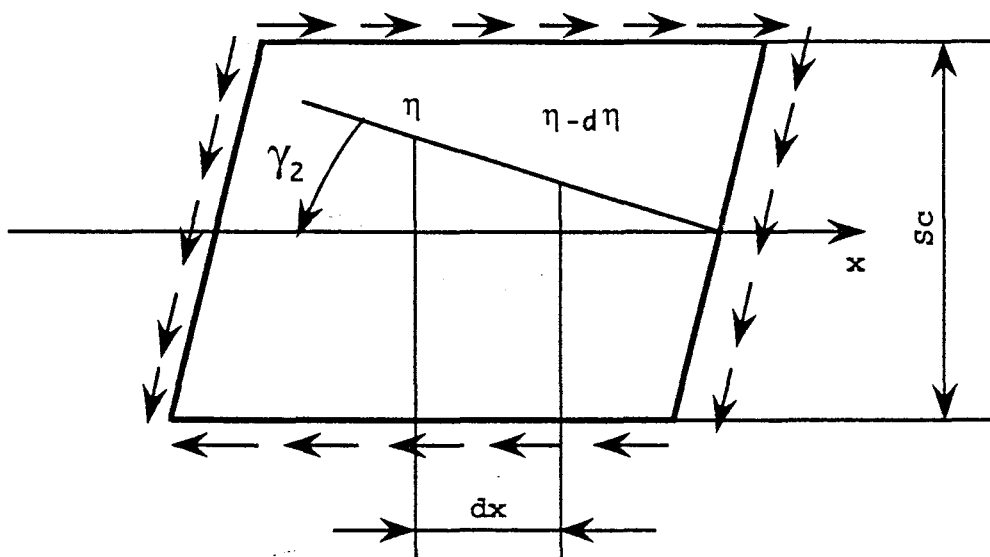


Figure VII.3 : déformation d'une couche d'adhésif d'épaisseur  $S_c$ .

En tenant compte de l'équation VII.19,  $\gamma_2$  s'exprime par :

$$\gamma_2(X) = - \frac{S_c^2}{8 E_c} \frac{d^2\tau(X)}{dx^2} \quad (\text{VII.23})$$

Si  $\gamma_1$  est l'angle de glissement calculé à partir de la déformation de cisaillement, alors il s'exprime par :

$$\gamma_1(X) = \frac{\tau(X)}{G_c} \quad (\text{VII.24})$$

Les déplacements relatifs des couvre-joints s'écrivent alors :

$$\begin{aligned}\delta(X) &= S_c(\gamma_1 + \gamma_2) \\ &= \frac{S_c}{G_c} \tau(X) - \frac{S_c^2 G_c}{8 E_c} \frac{d^2 \tau}{dX}\end{aligned}\quad (\text{VII.25})$$

Une autre expression de  $\delta(X)$  est donnée par :

$$\frac{d\delta(X)}{dX} = \epsilon_2 - \epsilon_1 \quad (\text{VII.26})$$

où  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  sont définies par les relations VII.13 et VII.14. Par double dérivation de la relation VII.26 et après introduction des variables adimensionnelles, on obtient à l'aide des relations VII.14 et VII.25, l'équation différentielle des contraintes de cisaillement et de décollement.

$$\begin{aligned}\frac{d^5 \bar{\tau}}{d\bar{X}^5} - 8 \frac{E_c L^2}{G_c S_c^2} \frac{d^3 \bar{\tau}}{d\bar{X}^3} + 40(1 + 0.6\psi) \frac{E_c L^4}{E S S_c^3} \frac{d\bar{\tau}}{d\bar{X}} = \\ = -48 \frac{E_c L^6}{E S^3 S_c^3} \bar{\sigma}\end{aligned}\quad (\text{VII.27})$$

$$\begin{aligned}\frac{d^8 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^8} - 8 \frac{E_c L^2}{G_c S_c^2} \frac{d^6 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^6} + 40(1 + 0.6\psi + 0.3\psi^2) \frac{E_c L^4}{E S S_c^3} \frac{d^4 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^4} - \\ - 96 \frac{E_c^2 L^6}{E G_c S^3 S_c^3} \frac{d^2 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^2} + 192 \frac{E_c^2 L^8}{E^2 S^4 S_c^4} \bar{\sigma} = 0\end{aligned}$$

**VII.3.2.- Expression des contraintes de cisaillement et de décollement.**

Les solutions des équations différentielles des contraintes de décollement et de cisaillement obtenues par VOLKERSEN (10) sont données par les relations suivantes :

$$\bar{\sigma} = C_1 \operatorname{sh}\lambda_1\bar{x} + C_2 \operatorname{sh}\lambda_2\bar{x} + C_3 \operatorname{sh}\lambda_3\bar{x} \cos\lambda_3\bar{x} + C_4 \operatorname{ch}\lambda_3\bar{x} \sin\lambda_3\bar{x} \quad (\text{VII.28})$$

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_h + \bar{\tau}_p \quad (\text{VII.29})$$

$$\bar{\tau}_h = D_1 + D_2 \operatorname{ch}\omega_1\bar{x} + D_3 \operatorname{ch}\omega_2\bar{x}$$

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_p = & \frac{K_1}{\lambda_1} \operatorname{ch}\lambda_1\bar{x} + \frac{K_2}{\lambda_2} \operatorname{ch}\lambda_2\bar{x} + \frac{K_3}{2\lambda_3} ( \operatorname{ch}\lambda_3\bar{x} \cos\lambda_3\bar{x} + \operatorname{sh}\lambda_3\bar{x} \sin\lambda_3\bar{x} ) + \\ & + \frac{K_4}{2\lambda_3} ( \operatorname{sh}\lambda_3\bar{x} \sin\lambda_3\bar{x} + \operatorname{ch}\lambda_3\bar{x} \cos\lambda_3\bar{x} ) \end{aligned}$$

où :

$$\lambda_1 = \sqrt{\frac{4+3\psi^2}{2} \frac{G_c L^2}{E S S_c}}, \quad \lambda_2 = \sqrt{8 \frac{E_c L^2}{G_c S_c^2}}, \quad \lambda_3 = \sqrt[4]{3\psi^2 \frac{E_c L^4}{E S S_c^3}}$$

$$\omega_1 = \sqrt{8 \frac{E_c L^2}{G_c S_c^2}}, \quad \omega_2 = \sqrt{(5+3\psi) \frac{G_c L^2}{E S S_c}}$$

$\bar{\tau}_h$  et  $\bar{\tau}_p$  représentent respectivement les solutions générales de l'équation homogène et particulière de l'équation différentielle des contraintes de cisaillement. Les conditions aux limites conduisant à la détermination des constantes d'intégration sont les suivantes :

a) Conditions aux limites pour  $\bar{\sigma}$ 

- a<sub>1</sub>) Le moment fléchissant est nul en dehors de la zone de recouvrement

$$\int_{-1/2}^{1/2} \left[ \int_{-1/2}^{1/2} \bar{\sigma}(\alpha) d\alpha \right] d\bar{X} = - \frac{1}{2} (1+\psi) \frac{S^2}{L^2} \quad (\text{VII.30})$$

- a<sub>2</sub>) En  $\bar{X} = 1/2$ , le moment de flexion dans le substrat extérieur s'annule, par conséquent  $y'' = 0$

$$\frac{d^2 \bar{\sigma}}{dX^2} = 0$$

- a<sub>3</sub>) - L'équation des moments VII.5 donne après dérivation :

$$\frac{S}{2} (1+\psi) \tau + \int_{-L/2}^X \sigma(\alpha) d\alpha = - \frac{E S^3}{12} y''' \quad (\text{VII.31})$$

En  $X = \pm L/2$  (bords libres), la contrainte de cisaillement est nulle.

$$\frac{d^3 \bar{\sigma}}{dX^3} = 0 \quad (\text{VII.32})$$

- a<sub>4</sub>) - En dérivant la relation VII.25, et en tenant compte des relations VII.26, VII.13 et VII.14 on obtient en  $\bar{X} = 1/2$  l'équation:



$$\frac{d\tau}{dX} - \frac{S_c^2 G_c}{8 E_c} \frac{d^3\tau}{dX^3} = - \frac{G_c}{E S_c} \sigma_0 \quad (\text{VII.33})$$

En  $\bar{X}=1/2$ , lorsqu'on tient compte de la relation VII.17, l'équation VII.33 devient après changement de signe du terme de droite (en raison de la structure antisymétrique de la solution pour  $\bar{\sigma}$ ) :

$$\frac{d^6\bar{\sigma}}{d\bar{X}^6} - \lambda_2^2 \frac{d^4\bar{\sigma}}{d\bar{X}^4} - 4 \lambda_2^2 \lambda_3^4 \bar{\sigma} = \frac{16}{3} \frac{1+\psi}{\psi^2} \frac{S^2}{L^2} \lambda_2^8 \quad (\text{VII.34})$$

Les quatre conditions à la limite permettent de déterminer les constantes d'intégration  $C_i$  ( $i=1,4$ ) par la résolution du système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{15} \\ 0 \\ 0 \\ a_{45} \end{bmatrix}$$

où :

$$a_{11} = \frac{1}{\lambda_1^2} \left[ \lambda_1 \operatorname{ch} \frac{\lambda_1}{2} - 2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2} \right], \quad a_{12} = \frac{1}{\lambda_2^2} \left[ \lambda_2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_2}{2} - 2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2} \right]$$

$$a_{13} = \frac{1}{2\lambda_3^2} \left[ \lambda_3 \left[ \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} + \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2} \right] - 2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2} \right]$$

$$a_{14} = \frac{1}{2\lambda_3^2} \left[ \lambda_3 \left[ \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2} - \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} \right] + 2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} \right]$$

$$a_{15} = \frac{1+\psi}{2} \frac{S^2}{L^2}$$

$$a_{21} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \right]^2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2}, \quad a_{22} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right]^2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2}$$

$$a_{23} = -\operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2}, \quad a_{24} = \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2}$$

$$a_{31} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda_1}{\lambda_3} \right]^2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_1}{2}, \quad a_{32} = \frac{1}{2} \left[ \frac{\lambda_2}{\lambda_3} \right]^2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_2}{2}$$

$$a_{33} = -\operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} - \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2}$$

$$a_{34} = \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} + \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2}, \quad a_{41} = 4 \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2}$$

$$a_{42} = 4 \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2}, \quad a_{43} = -8 \left[ \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right]^2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2}$$

$$a_{44} = 8 \left[ \frac{\lambda_3}{\lambda_2} \right]^2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2}$$

$$a_{45} = -\frac{16}{3} \frac{1+\psi}{\psi^2} \frac{S^2}{L^2} \frac{\lambda_3^4}{\lambda_2}$$

b) Conditions aux limites pour  $\bar{\tau}$ 

En posant:

$$U = \frac{40}{3} \frac{1+0.6\psi}{\psi^2}, \quad V = 16 \frac{S^2}{L^2}$$

les constantes  $K_i$  ( $i=1,4$ ) de la solution particulière  $\tau_p$  sont données par:

$$K_1 = - \frac{V \lambda_3^4}{U \lambda_3^4 - \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_1^4} C_1, \quad K_2 = - \frac{V}{U} C_2$$

$$K_3 = - V \frac{2(\lambda_2/\lambda_3)^4 C_4 + (U-4) C_3}{4 (\lambda_2/\lambda_3)^4 + (U-4)^2}$$

$$K_4 = - V \frac{2(\lambda_2/\lambda_3)^4 C_3 - (U-4) C_4}{4 (\lambda_2/\lambda_3)^4 + (U-4)^2}$$

Les conditions aux limites suivantes permettent alors de déterminer des constantes d'intégration  $D_i$  ( $i=1,4$ ).

- b<sub>1</sub>) Les contraintes de cisaillement, intégrées sur la longueur de recouvrement supportent la charge extérieure  $F$  ( $F = \sigma_0 S$ ).

$$\int_{-L/2}^{L/2} \tau(X) dX = \sigma_0 S \quad (\text{VII.35})$$

soit en variables adimensionnelles :

$$\int_{-1/2}^{1/2} \bar{\tau}(\bar{X}) d\bar{X} = 1 \quad (\text{VII.36})$$

b<sub>2</sub>) Les contraintes de cisaillement s'annulent aux bords libres du recouvrement

$$\bar{\tau}(\bar{X}=1/2) = 0 \quad (\text{VII.37})$$

b<sub>3</sub>) Par dérivation de la relation VII.25, on obtient en  $\bar{X}=1/2$  et après introduction des variables adimensionnelles, la condition à la limite suivante :

$$\frac{d\bar{\tau}}{d\bar{X}} - \frac{1}{\lambda_1^2} \frac{d^3\bar{\tau}}{d\bar{X}^3} = \frac{\lambda_2^2}{(5+3\psi)} \quad (\text{VII.38})$$

Ces trois équations (VII.36), (VII.37), et (VII.38) conduisent au système d'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{14} \\ b_{24} \\ b_{34} \end{bmatrix}$$

avec :

$$b_{11} = 1, \quad b_{12} = \frac{2}{\omega_1} \operatorname{sh} \frac{\omega_1}{2}, \quad b_{13} = \frac{2}{\omega_2} \operatorname{sh} \frac{\omega_2}{2}$$

$$b_{14} = 1 - K_1 \frac{2}{\lambda_1^2} \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2} - K_2 \frac{2}{\lambda_2^2} \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2} - \\ - K_3 \frac{1}{\lambda_3^2} \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2} + K_4 \frac{1}{\lambda_3^2} \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2}$$

$$b_{21} = 1, \quad b_{22} = \operatorname{ch} \frac{\omega_1}{2}, \quad b_{23} = \operatorname{ch} \frac{\omega_2}{2}$$

$$b_{24} = -K_1 \frac{1}{\lambda_1} \operatorname{ch} \frac{\lambda_1}{2} - K_2 \frac{1}{\lambda_2} \operatorname{ch} \frac{\lambda_2}{2} + \\ + K_3 \frac{1}{2\lambda_3} \left[ \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} + \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2} \right] - \\ - K_4 \frac{1}{2\lambda_3} \left[ \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} - \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2} \right]$$

$$b_{31} = 0, \quad b_{32} = 0, \quad b_{33} = \omega_2 \left[ 1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \right] \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2}$$

$$b_{34} = \frac{\omega_2^2}{(5+3\psi)} - K_1 \left[ 1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_2^2} \right] \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2} - \\ - K_3 \left[ \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} - 2 \left[ 1 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_2^2} \right] \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2} \right] - \\ - K_4 \left[ \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_3}{2} - 2 \left[ 1 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_2^2} \right] \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_3}{2} \right]$$

### VII.3.3. - DISCUSSION

Les constantes d'intégration  $C_i$  et  $D_i$  déterminées par résolution d'équations linéaires, permettent le calcul des contraintes de cisaillement et de décollement dans le joint d'adhésif en fonction des caractéristiques mécaniques et géométriques des substrats et de la colle. Bien que donnant une évaluation correcte des contraintes de cisaillement et de décollement assez "loin" des bords libres, le modèle de VOLKERSEN (10) présente dans certains cas typiques, des singularités de contrainte aux extrémités libres du recouvrement (voir résultats numériques ultérieurs). Nous nous proposons de développer son modèle théorique de manière à satisfaire les conditions aux limites sur les bords libres en ce qui concerne les contraintes de cisaillement.

### VII.4. - MODELE DEVELOPPE

Le modèle que nous présentons ici est issu du modèle théorique de VOLKERSEN (10). Il prend en compte les contraintes de cisaillement et de décollement variables dans la longueur de recouvrement. Les hypothèses conduisant à l'établissement des équations de contraintes sont similaires à celles adoptées par VOLKERSEN (10) dans son modèle.

Il s'agit alors de rechercher une solution générale, assurant une stabilité maximale (absence de singularités) et le respect des conditions aux limites sur les bords non chargés du film d'adhésif.

#### VII.4.1. - Equations constitutives

Les équations différentielles des contraintes de cisaillement et de décollement (identiques à celles de VOLKERSEN(10)) sont données par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{d^5 \bar{\tau}}{d\bar{X}^3} - 8 \frac{E_c L^2}{G_c S_c^2} \frac{d^3 \bar{\tau}}{d\bar{X}^3} + 40(1+0.6\psi) \frac{E_c L^4}{E S S_c^3} \frac{d\bar{\tau}}{d\bar{X}} = \\ = -48 \frac{E_c L^6}{E S^3 S_c^3} \bar{\sigma} \end{aligned} \quad (\text{VII.39})$$

$$\frac{d^8 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^8} - a \frac{d^6 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^6} + b \frac{d^4 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^4} - c \frac{d^2 \bar{\sigma}}{d\bar{X}^2} + d \bar{\sigma} = 0$$

avec  $a, b, c, d$  des constantes positives et définies par :

$$\begin{aligned} a &= \frac{E_c L^2}{G_c S_c^2}, & b &= 40(1+0.6\psi+0.3\psi^2) \frac{E_c L^4}{E S S_c^3} \\ c &= 96 \frac{E_c^2 L^6}{E G_c S^3 S_c^3}, & d &= 192 \frac{E_c^2 L^8}{E^2 S^4 S_c^4} \end{aligned}$$

Les caractéristiques mécaniques et géométriques du film d'adhésif et des substrats sont telles que :

$$a < b < c < d$$

Pour trouver la solution du système d'équation VII.39, il convient de résoudre d'abord l'équation des contraintes de décollement et ensuite celle des contraintes de cisaillement. L'équation caractéristique associée à l'équation différentielle des contraintes de décollement est donnée par :

$$\lambda^8 - a \lambda^6 + b \lambda^4 - c \lambda^2 + d \lambda^6 = 0 \quad (\text{VII.40})$$

C'est une équation en  $\lambda^2$  qui peut s'écrire :

$$(\lambda^2 - \lambda_1^2) (\lambda^2 - \lambda_2^2) (\lambda^2 - (\lambda_3^2 + i\lambda_4^2)^2) (\lambda^2 - (\lambda_3^2 - i\lambda_4^2)^2)$$

où les  $\lambda_j$  ( $j=1,4$ ) sont des constantes positives.

Après développement de la relation précédente, on obtient, par identification avec la relation VII.40, le système d'équations à quatre inconnues suivant :

$$\begin{aligned}
 2 (\lambda_3^2 - \lambda_4^2) + \lambda_1^2 + \lambda_2^2 &= a \\
 \lambda_1^2 \lambda_2^2 + 2(\lambda_3^2 - \lambda_4^2) (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) + (\lambda_3^2 + \lambda_4^2)^2 &= b \\
 2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 (\lambda_3^2 - \lambda_4^2) + (\lambda_1^2 + \lambda_2^2) (\lambda_3^2 + \lambda_4^2)^2 &= c \\
 \lambda_1^2 \lambda_2^2 (\lambda_3^2 + \lambda_4^2)^2 &= d
 \end{aligned}
 \tag{VII.41}$$

#### VII.4.2. - Solution approchée

IL s'agit alors de déterminer les  $\lambda_i$  ( $i=1,4$ ) en fonction des coefficients ( $a, b, c, d$ ) de l'équation différentielle homogène. Après introduction de deux constantes  $P_r$  et  $S_o$  définies par:

$$\begin{aligned}
 P_r &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \\
 S_o &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2
 \end{aligned}
 \tag{VII.42}$$

la première et la quatrième équation de VII.41 conduisent alors aux relations suivantes :

$$\lambda_3^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d}{P_r}} + \frac{a - S_o}{4}
 \tag{VII.43}$$

$$\lambda_4^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d}{P_r}} - \frac{a - S_o}{4}
 \tag{VII.44}$$



où  $\lambda_3^2$  et  $\lambda_4^2$  seront définies si  $P_r$  et  $S_0$  vérifient le système suivant :

$$P_r^2 - P_r (S_0^2 - a S_0 + b) + d = 0 \quad (1) \quad (\text{VII.45})$$

$$P_r^2(a - S_0) - P_r c + d S_0 = 0 \quad (2)$$

$P_r \in \{R^{**}\}$  et  $S_0 \in (R^{**} \setminus \{a/2\})$  sont solutions de VII.45 s'ils vérifient :

$$P_r = \frac{c - S_0^3 + a S_0^2 - b S_0}{a - 2 S_0} \quad (\text{VII.46})$$

Par ailleurs, les solutions des équations de VII.45 s'écrivent respectivement :

$$\left. \begin{aligned} P_{r11} &= \frac{S_0^2 - a S_0 + b}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4 d}{(S_0^2 - a S_0 + b)^2}} \right) \\ P_{r12} &= \frac{S_0^2 - a S_0 + b}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 d}{(S_0^2 - a S_0 + b)^2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII.47})$$

$$\left. \begin{aligned} P_{r21} &= \frac{c}{2(a - S_0)} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4 d S_0 (a - S_0)}{c^2}} \right) \\ P_{r22} &= \frac{c}{2(a - S_0)} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 d S_0 (a - S_0)}{c^2}} \right) \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII.38})$$

L'existence d'une solution commune à (VII.46), (VII.47), et (VII.48) suppose la vérification de l'une des conditions suivantes :

$$P_r = P_{rij} \quad i, j = 1, 2 \quad (\text{VII.49})$$

Dans ce qui suit, nous supposons que :

$$\frac{4 d}{(S_0^2 - aS_0 + b)^2} = 4 \epsilon_1 \ll 1$$

$$\frac{4 d S_0 (a - S_0)}{c^2} = 4 \epsilon_2 \ll 1$$

Ce qui nous permet de faire un développement limité des termes situés sous la racine de VII.47 et VII.48. A l'ordre deux et un, nous obtenons :

$$\left. \begin{aligned} P_{r11} &= (S_0^2 - aS_0 + b) (1 - \epsilon_1 - \epsilon_1^2 + O(\epsilon_1^3)) \\ P_{r12} &= \frac{d}{(S_0^2 - aS_0 + b)} (1 + \epsilon_1 + O(\epsilon_1^2)) \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII.50})$$

$$\left. \begin{aligned} P_{r21} &= \frac{c}{(a - S_0)} (1 - \epsilon_2 - \epsilon_2^2 + O(\epsilon_2^3)) \\ P_{r22} &= \frac{d S_0}{c^2} (1 + \epsilon_2 + O(\epsilon_2^2)) \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII.51})$$

Par identification des termes principaux des expressions précédentes, on obtient :

$$\left. \begin{aligned} S_0^3 - 2 a S_0^2 + (a^2 + b) S_0 + c - ab &= 0 \\ S_0^2 - \frac{(ac + b)}{c} S_0 + b &= 0 \\ S_0^2 - \frac{(ac - b)}{c} S_0 + b - \frac{a d}{c} &= 0 \\ S_0^3 - a S_0^2 + b S_0 - c &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (\text{VII.52})$$

La quatrième équation de VII.52 est en contradiction avec la relation VII.46 car  $P_r$  est non nul. Par exemple, pour des valeurs particulières de caractéristiques mécaniques et géométriques du film d'adhésif et du substrat données par :

$$E = 210000 \text{ MPa}, E_c = 5000 \text{ MPa}, G_c = 2000 \text{ MPa}$$

$$L = 20 \text{ mm}, S = 2.6 \text{ mm}, S_c = 0.04 \text{ mm},$$

les valeurs des constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  de l'équation homogène (VII.39) des contraintes de décollement sont données par:

$$a = 5E6, b = 9.243E8, c = 3.25E11, d = 2.382E13$$

Dans ce cas, les racines de la première équation de VII.52 sont imaginaires. De ce fait, elles ne satisfont pas la relation VII.42. Par conséquent, nous sommes amenés à rechercher les solutions de la deuxième et troisième équation de (VII.52). Celles-ci sont respectivement données par :

$$\left. \begin{aligned} S_{01} &= \frac{(ac + d)}{2c} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4bc^2}{(ac + d)^2}} \right) \\ S_{02} &= \frac{(ac + d)}{2c} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4bc^2}{(ac + d)^2}} \right) \end{aligned} \right\} \text{(VII.53)}$$

$$\left. \begin{aligned}
 S_{03} &= \frac{(ac - d)}{2c} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4c(bc - ad)}{(ac - d)^2}} \right) \\
 S_{04} &= \frac{(ac - d)}{2c} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4c(bc - ad)}{(ac - d)^2}} \right)
 \end{aligned} \right\} \text{(VII.54)}$$

Les valeurs approchées de  $S_{0i}$  ( $i=1,4$ ), calculées à partir des valeurs de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont illustrées dans le tableau VII.1.

| $S_{0N}$  | $S_{01}$  | $S_{02}$ | $S_{03}$  | $S_{04}$ |
|-----------|-----------|----------|-----------|----------|
| 4999899.2 | 4999888.4 | 184.8    | 4999741.8 | 84.8     |

Tableau VII.1 : valeurs approchées de  $S_{0i}$ .

$S_{0N}$  : valeur obtenue par résolution numérique.

Ces résultats numériques sommaires montrent très clairement que les solutions approchées  $S_{02}$  et  $S_{04}$  sont à écarter. En revanche, par rapport à la solution  $S_{0N}$  obtenue par calcul numérique, les solutions approchées  $S_{01}$  et  $S_{03}$  offrent respectivement une précision relative de l'ordre de  $10^{-6}$  et  $10^{-5}$ . Les évaluations numériques de  $P_r$  et de  $P_{rij}$ , déterminées à l'aide des valeurs numériques de  $S_{01}$  et  $S_{03}$  sont données dans le tableau VII.2.

|                   | $P_r$   | $P_{r11}$ | $P_{r12}$ | $P_{r21}$ | $P_{r22}$ |
|-------------------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $S_{01}$          | 3.66E8  | 3.66E8    | 65038     | 2.5E9     | 4.12E8    |
| $S_{03}$          | -3.66E8 | -3.66E8   | -65034    | 7.86E8    | 4.72E8    |
| $P_{rN} = 4.21E8$ |         |           |           |           |           |

Tableau VII.2 : valeurs approchées de  $P_r$  et  $P_{rij}$ .

$$S_{01}=4999899.4, S_{03}=4999741.8$$

$P_{rN}$  est la valeur obtenue par calcul numérique.

Au vu de ces résultats numériques, il est clair que la meilleure approximation est donnée par le couple  $S_{01}$  et  $P_{r22}$ . Par la suite, l'expression de  $S_0$  et de  $P_r$  sera donnée par les solutions approchées  $S_{01}$  et  $P_{r22}$ . Connaissant la somme  $S_0$  et le produit  $P_r$  de  $\lambda_1^2$  et  $\lambda_2^2$ , il suffit de résoudre l'équation du second degré ( $X^2 - S_0X + P_r = 0$ ) dont les racines sont données par:

$$X_1 = \frac{S_0}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 P_r}{S_0^2}} \right)$$

$$X_2 = \frac{S_0}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4 P_r}{S_0^2}} \right)$$

L'expression approchée des racines  $\lambda_i$  ( $i=1,4$ ) est alors donnée par :

$$\lambda_1^2 = \frac{S_0}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4 P_r}{S_0^2}} \right)$$

$$\lambda_2^2 = \frac{S_0}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4 P_r}{S_0^2}} \right)$$

$$\lambda_3^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d}{P_r}} + \frac{a-S_0}{4}$$

$$\lambda_4^2 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{d}{P_r}} - \frac{a-S_0}{4}$$

où:

$$S_0 = \frac{(ac + d)}{2c} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4 b c^2}{(ac + d)^2}} \right)$$

$$P_r = \frac{d S_0}{c} \left( 1 + \frac{d S_0 (a-S_0)}{c^2} \right) \quad \text{au premier ordre}$$

près.

Les tableaux VII.3 à VII.6 donnent les valeurs approchées des  $\lambda_i$  en fonction des paramètres mécaniques et géométriques. Les valeurs des  $\lambda_i$  obtenues par calculs numériques et selon la démarche de VOLKERSEN (10) y sont également illustrées.

|     | $S_c=0.04$ mm   |                 |                 | $S_c=0.2$ mm    |                 |                 | $S_c=0.4$ mm    |                 |                 | $S_c=0.5$ mm    |                 |                 |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|     | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^v $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^v $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^v $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^v $ |
| i=1 | 9,17            | 9,08            | 8,55            | 3,88            | 3,87            | 3,83            | 2,72            | 2,72            | 2,73            | 2,43            | 2,43            | 2,45            |
| i=2 | 2236,026        | 2236,02         | 2236,06         | 447,17          | 447,17          | 447,17          | 223,56          | 223,56          | 223,60          | 178,83          | 178,83          | 178,88          |
| i=3 | 12,00           | 12,16           | 11,29           | 7,87            | 7,88            | 7,55            | 6,57            | 6,57            | 6,34            | 6,20            | 6,20            | 6,00            |
| i=4 | 9,68            | 9,60            | 11,29           | 7,10            | 7,09            | 7,55            | 6,07            | 6,07            | 6,34            | 5,76            | 5,76            | 6,00            |

Tableau VII.3 :  $\lambda_i$  en fonction de  $S_c$

$E = 210000$  MPa ,  $E_c = 5000$  MPa ,  $G_c = 2000$  MPa,  
 $S = 2,6$  mm ,  $L = 20$  mm

|     | $L=10$ mm       |                 |                 | $L=20$ mm       |                 |                 | $L=30$ mm       |                 |                 | $L=40$ mm       |                 |                 |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|     | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^v $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^v $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^v $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^v $ |
| i=1 | 1,94            | 1,93            | 1,91            | 3,88            | 3,87            | 3,83            | 5,82            | 5,87            | 5,75            | 7,76            | 7,75            | 7,67            |
| i=2 | 223,58          | 223,58          | 223,60          | 447,17          | 447,17          | 447,17          | 670,75          | 670,75          | 670,82          | 894,34          | 894,34          | 894,42          |
| i=3 | 3,93            | 3,94            | 3,77            | 7,87            | 7,88            | 7,55            | 11,81           | 11,83           | 11,32           | 15,75           | 15,77           | 15,10           |
| i=4 | 3,55            | 3,54            | 3,77            | 7,10            | 7,09            | 7,55            | 10,65           | 10,64           | 11,32           | 14,20           | 14,19           | 15,10           |

Tableau VII.4:  $\lambda_i$  en fonction de  $L$

$E = 210000$  MPa ,  $E_c = 5000$  MPa ,  $G_c = 2000$  MPa,  
 $S = 2,6$  mm ,  $S_c = 0,2$  mm

|     | E=210000 MPa    |                 |                 | E=180000 MPa    |                 |                 | E=130000 MPa    |                 |                 | E=70000 MPa     |                 |                 |
|-----|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|     | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^V $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^V $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^V $ | $ \lambda_i^N $ | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^V $ |
| i=1 | 14,06           | 13,53           | 12,10           | 15,60           | 14,85           | 13,07           | 19,60           | 18,22           | 15,38           | 29,70           | 27,72           | 20,96           |
| i=2 | 4472,09         | 4472,09         | 4472,13         | 4472,08         | 4472,08         | 4472,13         | 4472,06         | 4472,05         | 4472,13         | 4472,01         | 4471,97         | 4472,13         |
| i=3 | 14,06           | 14,71           | 13,42           | 14,47           | 15,36           | 13,95           | 15,24           | 16,8            | 15,13           | 16,64           | 20,05           | 17,67           |
| i=4 | 10,61           | 10,29           | 13,42           | 10,80           | 10,33           | 13,95           | 11,28           | 10,19           | 15,13           | 12,84           | 8,37            | 17,67           |

Tableau VII.5 :  $\lambda_i$  en fonction de E

$E_c = 5000 \text{ MPa}$  ,  $G_c = 2000 \text{ MPa}$ ,  $L = 20 \text{ mm}$   
 $S = 2,6 \text{ mm}$  ,  $S_c = 0,02 \text{ mm}$

|     | $E_c=5000 \text{ MPa}$<br>$G_c=1800 \text{ MPa}$ |                 |                 | $E_c=2500 \text{ MPa}$<br>$G_c=890 \text{ MPa}$ |                 |                 | $E_c=1250 \text{ MPa}$<br>$G_c=431 \text{ MPa}$ |                 |                 | $E_c=1000 \text{ MPa}$<br>$G_c=340 \text{ MPa}$ |                 |                 |
|-----|--|-----------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|---|-----------------|-----------------|
|     | $ \lambda_i^N $                                  | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^V $ | $ \lambda_i^N $                                 | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^V $ | $ \lambda_i^N $                                 | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^V $ | $ \lambda_i^N $                                 | $ \lambda_i^a $ | $ \lambda_i^V $ |
| i=1 | 12,92  | 12,60           | 11,48           | 8,51  | 8,46            | 8,07            | 5,75  | 5,74            | 5,61            | 5,08  | 5,08            | 4,99            |
| i=2 | 4714,01  | 4714,00         | 4714,04         | 4790,43   | 4740,43         | 4740,45         | 4816,82   | 4816,00         | 4816,83         | 4850,70   | 4850,70         | 4850,72         |
| i=3 | 14,18  | 14,63           | 13,42           | 11,98   | 12,09           | 11,29           | 9,97  | 10,00           | 9,50            | 9,39  | 9,41            | 8,98            |
| i=4 | 10,91  | 10,70           | 13,42           | 9,90  | 9,84            | 11,29           | 8,74  | 8,72            | 9,50            | 8,36  | 8,35            | 8,98            |

Tableau VII.6:  $\lambda_i$  en fonction de  $E_c$

$E = 210000 \text{ MPa}$  ,  $S = 2,6 \text{ mm}$  ,  $S_c = 0,02 \text{ mm}$  ,  $L = 20 \text{ mm}$



### VII.4.3.- DISCUSSION

D'une manière générale, les résultats numériques obtenus dans le cadre de l'approximation effectuée sont assez proches des valeurs déterminées par calcul numérique (voir tableaux VII.3 à VII.6). Cependant, pour des modules de Young de substrat égaux ou inférieurs à 130000 MPa, l'approximation faite entraîne une imprécision sur la détermination de  $\lambda_3$  et  $\lambda_4$  par rapport aux résultats numériques. En revanche, elle permet de montrer que la solution dépend en fait de quatre constantes ( $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ ). En posant  $\Delta\lambda_i = |\lambda_{iN} - \lambda_i|$ , on a :

a) Pour E fixé à 210000 MPa :

$$0.04 \text{ mm} \leq S_c \leq 0.5 \text{ mm} \quad , \quad \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{iN}} \leq 1\%$$

$$10 \text{ mm} \leq L \leq 40 \text{ mm} \quad , \quad \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{iN}} \leq 0.5\%$$

$$1000 \text{ MPa} \leq E_c \leq 5000 \text{ MPa} \quad , \quad \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{iN}} \leq 2.5\%$$

b) Pour :  $E_c = 5000 \text{ MPa}$ ,  $G_c = 2000 \text{ MPa}$ ,  $S_c = 0.02 \text{ mm}$ ,  
 $L = 20 \text{ mm}$ ,  $S = 2.6 \text{ mm}$ .

$$E = 210000 \text{ MPa} \quad , \quad \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{iN}} \leq 4\%$$

$$E = 180000 \text{ MPa} \quad , \quad \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{iN}} \leq 5\%$$

$$E = 130000 \text{ MPa} , \quad \frac{\Delta\lambda_i}{\lambda_{iN}} \leq 9\%$$

La précision sur la détermination de  $\lambda_3$  et  $\lambda_4$  devient moins bonne, lorsque le module de Young des substrats devient inférieur à 130000 MPa.

**VII.4.4. - Expression des contraintes de cisaillement et de décollement dans le plan moyen du film d'adhésif**

En adoptant la démarche de VOLKERSEN, la contrainte de décollement adimensionnelle  $\sigma/\sigma_0$ , exprimée en fonction de la coordonnée adimensionnelle  $\bar{X}=X/L$  s'exprime par:

$$\sigma = C_1 \operatorname{sh}\lambda_1\bar{X} + C_2 \operatorname{sh}\lambda_2\bar{X} + C_3 \operatorname{sh}\lambda_3\bar{X} \cos\lambda_4\bar{X} + C_4 \operatorname{ch}\lambda_3\bar{X} \sin\lambda_4\bar{X} \quad (\text{VII.55})$$

Dans cette équation,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  et  $\lambda_4$  représentent les valeurs absolues des racines réelles de l'équation caractéristique VII.40.  $\lambda_3$  et  $\lambda_4$  sont les parties réelles et imaginaires des deux racines complexes de cette équation.  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  et  $C_4$  sont les constantes d'intégration. On les déterminera en tenant compte des conditions aux limites suivantes :

- a) En dehors de la zone de recouvrement, les couvre-joints sont exempts de flexion

$$\frac{1}{2} (S+S_c) \int_{-L/2}^{L/2} \tau(X) \, dX - \int_{-L/2}^{L/2} X \sigma(X) \, dX = 0$$

soit en variables adimensionnelles:

$$\int_{-1/2}^{1/2} \bar{X} \bar{\sigma}(\bar{X}) d\bar{X} = \frac{1}{2} (1+\psi) \frac{S^2}{L^2} \quad (\text{VII.56})$$

b) En  $\bar{X}=1/2$ , le moment de flexion est nul. Par conséquent,  
 $y''(\bar{X}=1/2)=0$

$$\bar{\sigma}''(\bar{X}=1/2) = 0 \quad (\text{VII.57})$$

c) Par dérivation de la relation VII.4 et en tenant compte de la nullité de  $\bar{\tau}$  en  $\bar{X}=1/2$  on a :

$$y''''(\bar{X}=1/2) = 0$$

ou encore :

$$\bar{\sigma}''''(\bar{X}=1/2) = 0 \quad (\text{VII.58})$$

d) Lorsqu'on dérive la relation VII.25, on obtient avec VII.26 :

$$\frac{d\tau}{dX} - \frac{S_c^2 G_c}{8 E_c} \frac{d^3 \tau}{dX^3} = - \frac{G_c}{S_c} (\epsilon_2 - \epsilon_1) \quad (\text{VII.59})$$

Par passage aux grandeurs adimensionnelles, et en tenant compte de l'imparité de  $\bar{\sigma}$  en fonction de  $\bar{X}$ , les équations VII.17 et VII.59 donnent en  $\bar{X} = 1/2$  :

$$\bar{\sigma} - a \bar{\sigma} - c \bar{\sigma} = \frac{48(1+\psi) E_c^2 L^6}{E^2 S^2 S_c^4} \quad (\text{VII.60})$$

Les quatre conditions aux limites données par les équations VII.56 à VII.60 se traduisent par le système d'équations linéaires suivant:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} & A_{24} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} & A_{34} \\ A_{41} & A_{42} & A_{43} & A_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{15} \\ 0 \\ 0 \\ A_{45} \end{bmatrix} \quad (\text{VII.61})$$

où:

$$A_{11} = \frac{1}{\lambda_1^2} \left[ \lambda_1 \operatorname{ch} \frac{\lambda_1}{2} - 2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2} \right], \quad A_{12} = \frac{1}{\lambda_2^2} \left[ \lambda_2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_2}{2} - 2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2} \right]$$

$$A_{13} = -2 \left[ \frac{\lambda_4}{\lambda_3^2 + \lambda_4^2} \right]^2 \left[ 1 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_4^2} \right] \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} - 4 \left[ \frac{\lambda_4}{\lambda_3^2 + \lambda_4^2} \right]^2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} \\ + \left[ \frac{\lambda_4}{\lambda_3^2 + \lambda_4^2} \right] \left[ \frac{\lambda_3}{\lambda_4} \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} + \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} \right]$$

$$A_{14} = 2 \left[ \frac{\lambda_4}{\lambda_3^2 + \lambda_4^2} \right]^2 \left[ 1 - \frac{\lambda_3^2}{\lambda_4^2} \right] \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} + 4 \left[ \frac{\lambda_4}{\lambda_3^2 + \lambda_4^2} \right]^2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} \\ + \left[ \frac{\lambda_4}{\lambda_3^2 + \lambda_4^2} \right] \left[ \frac{\lambda_3}{\lambda_4} \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} - \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} \right]$$

$$A_{15} = \frac{1+\psi}{2} \frac{S^2}{L^2}$$

$$A_{21} = \lambda_1^2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2}, \quad A_{22} = \lambda_2^2 \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2}$$

$$A_{23} = (\lambda_3^2 - \lambda_4^2) \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} - 2 \lambda_3 \lambda_4 \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2}$$

$$A_{24} = (\lambda_3^2 - \lambda_4^2) \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} + 2 \lambda_3 \lambda_4 \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2}$$

$$A_{31} = \lambda_1^3 \operatorname{ch} \frac{\lambda_1}{2}, \quad A_{32} = \lambda_2^3 \operatorname{ch} \frac{\lambda_2}{2}$$

$$A_{33} = \lambda_3 (\lambda_3^2 - 3\lambda_4^2) \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} - \lambda_4 (3\lambda_3^2 - \lambda_4^2) \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2}$$

$$A_{34} = \lambda_3 (\lambda_3^2 - 3\lambda_4^2) \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} - \lambda_4 (3\lambda_3^2 - \lambda_4^2) \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2}$$

$$A_{41} = (\lambda_1^6 - a\lambda_1^4 - c) \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2}, \quad a_{42} = (\lambda_2^6 - a\lambda_2^4 - c) \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2}$$

$$A_{43} = (C_{63sc} - aC_{43sc} - c) \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} + \\ + (C_{63cs} - aC_{43cs}) \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2}$$

$$A_{44} = (C_{64sc} - aC_{44sc}) \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} + \\ + (C_{64cs} - aC_{44cs} - c) \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2}$$

$$A_{45} = 48 (1+\psi) \frac{E_c^2 L^6}{E^2 S^2 S_c^2}$$

et où :

$$C_{63sc} = 3\lambda_3^6 - 15\lambda_3^4 \lambda_4^2 + 15\lambda_3^2 \lambda_4^4 - \lambda_4^6$$

$$C_{63cs} = 20\lambda_3^3 \lambda_4^3 - 6\lambda_3^5 \lambda_4 - 6\lambda_3 \lambda_4^5$$

$$C_{43sc} = \lambda_3^6 - 6\lambda_3^2 \lambda_4^2 + \lambda_4^4, \quad C_{43cs} = 4(\lambda_3 \lambda_4^3 - \lambda_3^3 \lambda_4)$$

$$C_{64sc} = -C_{63cs}, \quad C_{64cs} = C_{63sc}, \quad C_{44sc} = C_{43cs},$$

$$C_{44cs} = -C_{43sc}$$

La résolution du système VII.61 permet de déterminer les constantes d'intégration  $C_i$  et par suite, les contraintes de décollement dans le plan moyen du film d'adhésif. On peut dès lors déterminer les contraintes de cisaillement dans le joint. La deuxième équation de VII.28 permet alors d'écrire:

$$\bar{\tau}^v - a \bar{\tau}''' + u \bar{\tau} = -v \bar{\sigma} \quad (\text{VII.52})$$

où :

$$a = 8 \frac{E_c L^2}{G_c S_c^2}, \quad u = 40(1+0.6\psi) \frac{E_c L^4}{E S S_c^3}$$

$$v = 48 \frac{E_c L^6}{E S^3 S_c^2}$$

Comme pour la méthode de VOLKERSEN, la solution de VII.62 est la somme d'une solution particulière  $\bar{\tau}_p$  et de la solution de l'équation homogène  $\bar{\tau}_h$ .

$$\bar{\tau} = \bar{\tau}_h + \bar{\tau}_p \quad (\text{VII.63})$$

$$\bar{\tau}_h = D_1 + D_2 \operatorname{ch} \omega_1 \bar{X} + D_3 \operatorname{ch} \omega_2 \bar{X}$$

$$\begin{aligned} \bar{\tau}_p = & B_1 \operatorname{ch} \lambda_1 \bar{X} + B_2 \operatorname{ch} \lambda_2 \bar{X} + B_3 ( \operatorname{ch} \lambda_3 \bar{X} \cos \lambda_4 \bar{X} + \operatorname{sh} \lambda_3 \bar{X} \sin \lambda_4 \bar{X} ) + \\ & + B_4 ( \operatorname{sh} \lambda_3 \bar{X} \sin \lambda_4 \bar{X} - \operatorname{ch} \lambda_3 \bar{X} \cos \lambda_4 \bar{X} ) \end{aligned}$$

où:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{a}{2}} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4u}{a^2}} \right)^{1/2}, \quad \omega_2 = \sqrt{\frac{a}{2}} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{4u}{a^2}} \right)^{1/2}$$

De la même manière que VOLKERSEN(10), nous déterminerons les constantes d'intégration  $D_1$ ,  $D_2$  et  $D_3$  à l'aide des conditions aux limites suivantes:

- a) La charge extérieure est équilibrée par les contraintes de cisaillement intégrées sur la longueur de recouvrement. En variables adimensionnelles cette condition s'écrit:

$$\int_{-1/2}^{1/2} \bar{\tau}(\bar{X}) d\bar{X} = 1 \quad (\text{VII.64})$$

- b) Sur les bords libres  $\bar{X} = \pm 1/2$  du recouvrement, la contrainte de cisaillement s'annule

$$\bar{\tau}(\bar{X} = \pm 1/2) = 0 \quad (\text{VII.65})$$

- c) Une troisième équation est donnée par la relation VII.59

$$\frac{d\tau}{dX} - \frac{S_c^2 G_c}{8 E_c} \frac{d^3 \tau}{dX^3} = - \frac{G_c}{S_c} (\epsilon_2 - \epsilon_1)$$

où:

$$\epsilon_1(X) = \frac{\sigma_0}{E} - \frac{1}{E S} \int_{-L/2}^X \tau(\alpha) d\alpha - \frac{6 M_x}{E S^2}$$

$$\epsilon_2(X) = \frac{1}{E S} \int_{-L/2}^X \tau(\alpha) d\alpha$$

En  $\bar{X}=-1/2$  on obtient:

$$\frac{d\tau}{dX} - \frac{S_c^2 G_c}{8 E_c} \frac{d^3\tau}{dX^3} = - \frac{G_c \sigma_0}{S_c E}$$

D'où en variables adimensionnelles,

$$\frac{d\bar{\tau}}{d\bar{X}} - \frac{1}{a} \frac{d^3\bar{\tau}}{d\bar{X}^3} = - \frac{G_c L^2}{E S S_c} \quad , \text{ en } \bar{X}=-1/2 \quad (\text{VII.66})$$

En tenant compte de ces trois conditions aux limites, les constantes d'intégration  $D_i$  seront déterminées par la résolution du système matriciel suivant:

$$[B_{ij}] D_j = b_i \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (\text{VII.67})$$

Avant de résoudre ce système, il convient de déterminer les constantes  $B_i$  ( $i=1,2,3,4$ ) de la solution particulière  $\bar{\tau}_p$  (voir la relation VII.63). Par identification, l'équation VII.62 et les relations VII.55 et VII.63 permettent de déterminer  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  et  $B_4$  par résolution d'un système d'équation linéaire à deux inconnues.



$$B_1 = - \frac{v C_1}{\lambda_1^5 - a\lambda_1^3 + u\lambda_1} , \quad B_2 = - \frac{v C_2}{\lambda_2^5 - a\lambda_2^3 + u\lambda_2}$$

$$B_3 = \frac{v( A_2 C_4 - A_4 C_3 )}{A_1 A_4 - A_2 A_3} , \quad B_4 = \frac{v( A_1 C_4 - A_3 C_3 )}{A_2 A_3 - A_1 A_4}$$

Les  $A_i$  sont données par :

$$A_1 = C_{53sc} - a C_{33sc} + u C_{13sc}$$

$$A_2 = C_{54sc} - a C_{34sc} + u C_{14sc}$$

$$A_3 = C_{53cs} - a C_{33cs} + u C_{13cs}$$

$$A_4 = C_{54cs} - a C_{34cs} + u C_{14cs}$$

où:

$$C_{13sc} = C_{14cs} = \lambda_3 + \lambda_4 , \quad C_{13cs} = - C_{14sc} = \lambda_3 - \lambda_4$$

$$C_{33sc} = C_{34cs} = \lambda_3^3 + 3\lambda_3^2\lambda_4 - \lambda_3\lambda_4^2 - \lambda_4^3$$

$$C_{33cs} = - C_{34sc} = \lambda_3^3 - \lambda_3^2\lambda_4 - \lambda_3\lambda_4^2 + \lambda_4^3$$

$$C_{53sc} = C_{54cs} = \lambda_3^5 + 5\lambda_3^4\lambda_4 - 10\lambda_3^3\lambda_4^2 - 10\lambda_3^2\lambda_4^3 + 5\lambda_3\lambda_4^4 + \lambda_4^5$$

$$C_{53cs} = -C_{54sc} = \lambda_3^5 - 5\lambda_3^4\lambda_4 - 10\lambda_3^3\lambda_4^2 + 10\lambda_3^2\lambda_4^3 + 5\lambda_3\lambda_4^4 - \lambda_4^5$$

Les constantes  $B_i$  étant déterminées, on résoud le système d'équations linéaires VII.67 où les  $B_{ij}$  sont données par:

$$B_{11} = 1, \quad B_{12} = \frac{2}{\omega_1} \operatorname{sh} \frac{\omega_1}{2}, \quad B_{13} = \frac{2}{\omega_2} \operatorname{sh} \frac{\omega_2}{2}$$

$$b_1 = 1 - \frac{2B_1}{\lambda_1} \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2} - \frac{2B_2}{\lambda_2} \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2} -$$

$$- 2 B_3 \left[ \frac{\lambda_4}{\lambda_3^2 + \lambda_4^2} \right] \left[ \frac{\lambda_3 + \lambda_4}{\lambda_4} \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} + \frac{\lambda_3 - \lambda_4}{\lambda_4} \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} \right] -$$

$$- 2 B_4 \left[ \frac{\lambda_4}{\lambda_3^2 + \lambda_4^2} \right] \left[ \frac{\lambda_3 - \lambda_4}{\lambda_4} \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} - \frac{\lambda_3 + \lambda_4}{\lambda_4} \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} \right]$$

$$B_{21} = 1, \quad B_{21} = \operatorname{ch} \frac{\omega_1}{2}, \quad B_{23} = \operatorname{ch} \frac{\omega_2}{2}$$

$$b_2 = - B_1 \operatorname{ch} \frac{\lambda_1}{2} - B_2 \operatorname{ch} \frac{\lambda_2}{2} -$$

$$- B_3 \left[ \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} + \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} \right] -$$

$$- B_4 \left[ \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2} + \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} \right] -$$

$$B_{31} = 0, \quad B_{32} = \omega_1 \left[ 1 - \frac{\omega_1^2}{a} \right] \operatorname{sh} \frac{\omega_1}{2}, \quad B_{33} = \omega_2 \left[ 1 - \frac{\omega_2^2}{a} \right] \operatorname{sh} \frac{\omega_2}{2}$$

$$b_3 = \frac{G_c L^2}{E S S_c} + B_1 \lambda_1 \left[ \frac{\lambda_1^2}{a} - 1 \right] \operatorname{sh} \frac{\lambda_1}{2} + B_2 \lambda_2 \left[ \frac{\lambda_2^2}{a} - 1 \right] \operatorname{sh} \frac{\lambda_2}{2} +$$

$$+ \left[ B_3 \left[ \frac{C_{33sc}}{a} - (\lambda_3 + \lambda_4) \right] + B_4 \left[ \frac{C_{34sc}}{a} + (\lambda_3 - \lambda_4) \right] \right] \operatorname{sh} \frac{\lambda_3}{2} \cos \frac{\lambda_4}{2} +$$

$$+ \left[ B_3 \left[ \frac{C_{33cs}}{a} - (\lambda_3 - \lambda_4) \right] + B_4 \left[ \frac{C_{34cs}}{a} - (\lambda_3 + \lambda_4) \right] \right] \operatorname{ch} \frac{\lambda_3}{2} \sin \frac{\lambda_4}{2}$$

La résolution des systèmes d'équations VII.63 et VII.57 permet de déterminer les constantes d'intégration  $C_i$  et  $D_j$  ( $i=1,4; j=1,3$ ). Les contraintes de cisaillement et de décollement dans le plan moyen de l'adhésif s'expriment finalement par:

$$\begin{aligned} \bar{\tau}(\bar{X}) = & D_1 + D_2 \operatorname{ch}\omega_1\bar{X} + D_3 \operatorname{ch}\omega_2\bar{X} + B_1 \operatorname{ch}\lambda_1\bar{X} + B_2 \operatorname{ch}\lambda_2\bar{X} + \\ & + B_3 ( \operatorname{ch}\lambda_3\bar{X} \operatorname{cos}\lambda_4\bar{X} + \operatorname{sh}\lambda_3\bar{X} \operatorname{sin}\lambda_4\bar{X} ) + \\ & + B_4 ( \operatorname{sh}\lambda_3\bar{X} \operatorname{sin}\lambda_4\bar{X} - \operatorname{ch}\lambda_3\bar{X} \operatorname{cos}\lambda_4\bar{X} ) \end{aligned}$$

$$\bar{\sigma}(\bar{X}) = C_1 \operatorname{sh}\lambda_1\bar{X} + C_2 \operatorname{sh}\lambda_2\bar{X} + C_3 \operatorname{sh}\lambda_3\bar{X} \operatorname{cos}\lambda_4\bar{X} + C_4 \operatorname{ch}\lambda_3\bar{X} \operatorname{sin}\lambda_4\bar{X}$$

#### VII.5. - CONCLUSION

La méthode de résolution utilisée, basée sur un calcul approché permet en fait de montrer que les contraintes dans le plan moyen du film d'adhésif dépendent non pas de trois constantes caractéristiques, mais de quatre constantes ( $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  et  $\lambda_4$ ). Dans son modèle, VOLKERSEN ne tient compte que de trois constantes, il considère en effet que  $\lambda_3 = \lambda_4$ .

Pour des caractéristiques géométriques ( $L$ ,  $S_c$ ) et mécaniques ( $E_c$ ) du joint fixées, nous avons recalculé à l'aide des  $\lambda_i$  déterminées selon notre méthode d'approximation, celle de VOLKERSEN (10) et celle utilisant les calculs numériques, les constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$ . Les tableaux VII.7 à VII.9 donnent dans chaque cas, une estimation de l'erreur commise sur la détermination des constantes  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$ .

|                | L (mm)               |                      |                      |                      |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                | 10                   | 20                   | 30                   | 40                   |
| $\Delta a_N/a$ | $5 \cdot 10^{-5}$    | $4.5 \cdot 10^{-6}$  | $1.9 \cdot 10^{-5}$  | $3.6 \cdot 10^{-6}$  |
| $\Delta a_V/a$ | $-1.2 \cdot 10^{-5}$ | $-5.5 \cdot 10^{-5}$ | $-7.2 \cdot 10^{-5}$ | $-5.7 \cdot 10^{-5}$ |
| $\Delta a_a/a$ | $4.5 \cdot 10^{-5}$  | $1.8 \cdot 10^{-6}$  | $1.6 \cdot 10^{-5}$  | $1.5 \cdot 10^{-6}$  |
| $\Delta b_N/b$ | $1 \cdot 10^{-2}$    | $0.6 \cdot 10^{-2}$  | $0.3 \cdot 10^{-2}$  | $-0.2 \cdot 10^{-2}$ |
| $\Delta b_V/b$ | $62 \cdot 10^{-2}$   | $61 \cdot 10^{-2}$   | $61 \cdot 10^{-2}$   | $61 \cdot 10^{-2}$   |
| $\Delta b_a/b$ | $1 \cdot 10^{-2}$    | $-0.8 \cdot 10^{-2}$ | $-1 \cdot 10^{-2}$   | $0.9 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta c_N/c$ | $0.6 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.1 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta c_V/c$ | $0.5 \cdot 10^{-2}$  | $5.3 \cdot 10^{-4}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $5.3 \cdot 10^{-4}$  |
| $\Delta c_a/c$ | $0.4 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $-7.4 \cdot 10^{-4}$ | $-6.2 \cdot 10^{-4}$ |
| $\Delta d_N/d$ | $0.6 \cdot 10^{-2}$  | $0.3 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta d_V/d$ | $0.9 \cdot 10^{-2}$  | $-5.5 \cdot 10^{-4}$ | $-5.4 \cdot 10^{-4}$ | $-0.3 \cdot 10^{-2}$ |
| $\Delta d_a/d$ | $1 \cdot 10^{-2}$    | $0.8 \cdot 10^{-2}$  | $0.3 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  |

Tableau VII.7 : Ecart relatifs estimés sur le calcul des coefficients a, b, c et d en fonction de la longueur (L) de recouvrement du joint d'adhésif.

$S=2.6$  mm,  $S_c=0.2$  mm,  $E=210000$  MPa,  $E_c=5000$  MPa,  $G_c=2000$  MPa.

avec:

$$\Delta a_* = a - a_*, \quad \Delta b_* = b - b_*, \quad \Delta c_* = c - c_*$$

Dans le tableau VII.7, les indices (N), (V) et (a) correspondent respectivement aux évaluations obtenues selon les méthodes suivantes: calcul numérique, VOLKERSEN (10) et méthode de VOLKERSEN développée.

|                | $S_c$ (mm)           |                      |                      |                      |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                | 0.04                 | 0.2                  | 0.4                  | 0.5                  |
| $\Delta a_N/a$ | $6 \cdot 10^{-7}$    | $4.4 \cdot 10^{-6}$  | $1.7 \cdot 10^{-5}$  | $1.6 \cdot 10^{-4}$  |
| $\Delta a_V/a$ | $-7.4 \cdot 10^{-6}$ | $-5 \cdot 10^{-5}$   | $-8.8 \cdot 10^{-5}$ | $-1.2 \cdot 10^{-4}$ |
| $\Delta a_a/a$ | $4 \cdot 10^{-6}$    | $1.8 \cdot 10^{-6}$  | $1.7 \cdot 10^{-5}$  | $1 \cdot 10^{-4}$    |
| $\Delta b_N/b$ | $8.8 \cdot 10^{-4}$  | $0.5 \cdot 10^{-6}$  | $0.1 \cdot 10^{-2}$  | $-0.4 \cdot 10^{-2}$ |
| $\Delta b_V/b$ | $60 \cdot 10^{-2}$   | $61 \cdot 10^{-2}$   | $62 \cdot 10^{-2}$   | $62 \cdot 10^{-2}$   |
| $\Delta b_a/b$ | $4.8 \cdot 10^{-2}$  | $0.7 \cdot 10^{-2}$  | $0.1 \cdot 10^{-2}$  | $-0.4 \cdot 10^{-2}$ |
| $\Delta c_N/c$ | $9.8 \cdot 10^{-4}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.1 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta c_V/c$ | $5.3 \cdot 10^{-4}$  | $5.2 \cdot 10^{-4}$  | $0.6 \cdot 10^{-2}$  | $0.3 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta c_a/c$ | $2.7 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.1 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta d_N/d$ | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.6 \cdot 10^{-2}$  | $0.7 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta d_V/d$ | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $-5.5 \cdot 10^{-4}$ | $-1 \cdot 10^{-2}$   | $-2 \cdot 10^{-2}$   |
| $\Delta d_a/d$ | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.7 \cdot 10^{-2}$  | $0.6 \cdot 10^{-2}$  | $0.7 \cdot 10^{-2}$  |

Tableau VII.8 : Ecart relatifs estimés sur le calcul des coefficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  en fonction de l'épaisseur ( $S_c$ ) du joint d'adhésif.

$S=2.6$  mm,  $L=20$  mm,  $E=210000$  MPa,  $E_c=5000$  MPa,  $G_c=2000$  MPa.

Indice N : résultats obtenus par calcul numérique.

Indice V : résultats obtenus selon la méthode de VOLKERSEN (10)

Indice a : résultats obtenus selon la méthode de VOLKERSEN (10) développée

|                | $E_c$ (MPa), $G_c$ (MPa) |                      |                      |                      |
|----------------|--------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                | 5000, 1800               | 2500, 890            | 1250, 431            | 1000, 340            |
| $\Delta a_N/a$ | $4.2 \cdot 10^{-8}$      | $3.1 \cdot 10^{-6}$  | $9.5 \cdot 10^{-7}$  | $2.5 \cdot 10^{-6}$  |
| $\Delta a_V/a$ | $-3.7 \cdot 10^{-6}$     | $-9.5 \cdot 10^{-7}$ | $-1 \cdot 10^{-6}$   | $-4 \cdot 10^{-6}$   |
| $\Delta a_a/a$ | $3 \cdot 10^{-6}$        | $2.8 \cdot 10^{-6}$  | $3.5 \cdot 10^{-4}$  | $2.5 \cdot 10^{-6}$  |
| $\Delta b_N/b$ | $5.5 \cdot 10^{-4}$      | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.3 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta b_V/b$ | $60 \cdot 10^{-2}$       | $60 \cdot 10^{-2}$   | $60 \cdot 10^{-2}$   | $60 \cdot 10^{-2}$   |
| $\Delta b_a/b$ | $-8 \cdot 10^{-2}$       | $-4 \cdot 10^{-2}$   | $-2 \cdot 10^{-2}$   | $-1.5 \cdot 10^{-2}$ |
| $\Delta c_N/c$ | $0.2 \cdot 10^{-2}$      | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.25 \cdot 10^{-2}$ | $0.3 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta c_V/c$ | $0.2 \cdot 10^{-2}$      | $5.4 \cdot 10^{-4}$  | $-0.2 \cdot 10^{-2}$ | $-8 \cdot 10^{-5}$   |
| $\Delta c_a/c$ | $-7 \cdot 10^{-2}$       | $-2 \cdot 10^{-2}$   | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $-4.5 \cdot 10^{-5}$ |
| $\Delta d_N/d$ | $0.3 \cdot 10^{-2}$      | $0.4 \cdot 10^{-2}$  | $0.5 \cdot 10^{-2}$  | $0.4 \cdot 10^{-2}$  |
| $\Delta d_V/d$ | $0.3 \cdot 10^{-2}$      | $0.2 \cdot 10^{-2}$  | $0.1 \cdot 10^{-2}$  | $2.5 \cdot 10^{-4}$  |
| $\Delta d_a/d$ | $8.5 \cdot 10^{-4}$      | $0.3 \cdot 10^{-2}$  | $0.5 \cdot 10^{-2}$  | $0.2 \cdot 10^{-2}$  |

Tableau VII.9 : Ecart relatifs estimés sur le calcul des coefficients a, b, c et d en fonction des caractéristiques mécaniques de l'adhésif.

$S=2.6$  mm,  $L=20$  mm,  $E=210000$  MPa,  $S_c=0.02$  mm.

Indice N : résultats obtenus par calcul numérique.

Indice V : résultats obtenus selon la méthode de VOLKERSEN (10)

Indice a : résultats obtenus selon la méthode de VOLKERSEN (10)  
développée

D'une manière générale, on observe que:

- les précisions sur la détermination des constantes sont satisfaisantes dans le cadre de notre approximation. En effet,

pour les caractéristiques géométriques et mécaniques fixées (cf tableaux VII.7 à VII.9), l'erreur relative obtenue sur le calcul des coefficients (a, b, c, d) de l'équation différentielle des contraintes de décollement est de l'ordre de  $10^{-2}$  au moins.

- En ce qui concerne la démarche théorique de VOLKERSEN (10), l'évaluation des coefficients (a, c et d) a été obtenue avec une bonne précision. En revanche, l'erreur relative estimée sur le calcul du coefficient (b) s'avère élevée (de l'ordre de 60%).

CHAPITRE VIII

EXPLOITATION NUMERIQUE  
DES RESULTATS THEORIQUES



### VIII.1. - INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous effectuons une analyse numérique basée sur les résultats théoriques obtenus au chapitre précédent. Ces résultats numériques permettent de montrer l'influence des paramètres géométriques et mécaniques (de l'adhésif et du substrat ) sur le profil et l'intensité des contraintes de cisaillement et de décollement dans le plan moyen du film d'adhésif.

### VIII.2. - INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DU FILM D'ADHÉSIF ET DE LA LONGUEUR DE RECOUVREMENT

Nous avons évalué numériquement, dans le plan moyen du film d'adhésif, l'intensité des contraintes de cisaillement et de décollement en fonction de la coordonnée adimensionnelle  $\bar{X}$  telle que  $\bar{X} \in [0, 1/2]$ . Les paramètres constants sont:

- l'épaisseur des couvre-joints extérieurs :  $S = 2.6$  mm
- les caractéristiques mécaniques des substrats et de l'adhésif, soient :  
 $E_c = 5000$  MPa ,  $G_c = 2000$  MPa ,  $E = 210000$  MPa

Cinq valeurs d'épaisseur ( $S_c$ ) du film d'adhésif et cinq valeurs de longueur ( $L$ ) de recouvrement constituent, dans chaque cas, les paramètres variables.

#### VIII.2.1.- Profil des contraintes de cisaillement

Les figures VIII.1 et VIII.2 représentent les variations de  $\bar{\tau}$  en fonction de  $\bar{X}$ . Pour chaque famille de courbes, les paramètres pris en compte sont  $S_c$  et  $L$ . Lorsque l'un des paramètres varie, le second est fixé à une valeur constante.

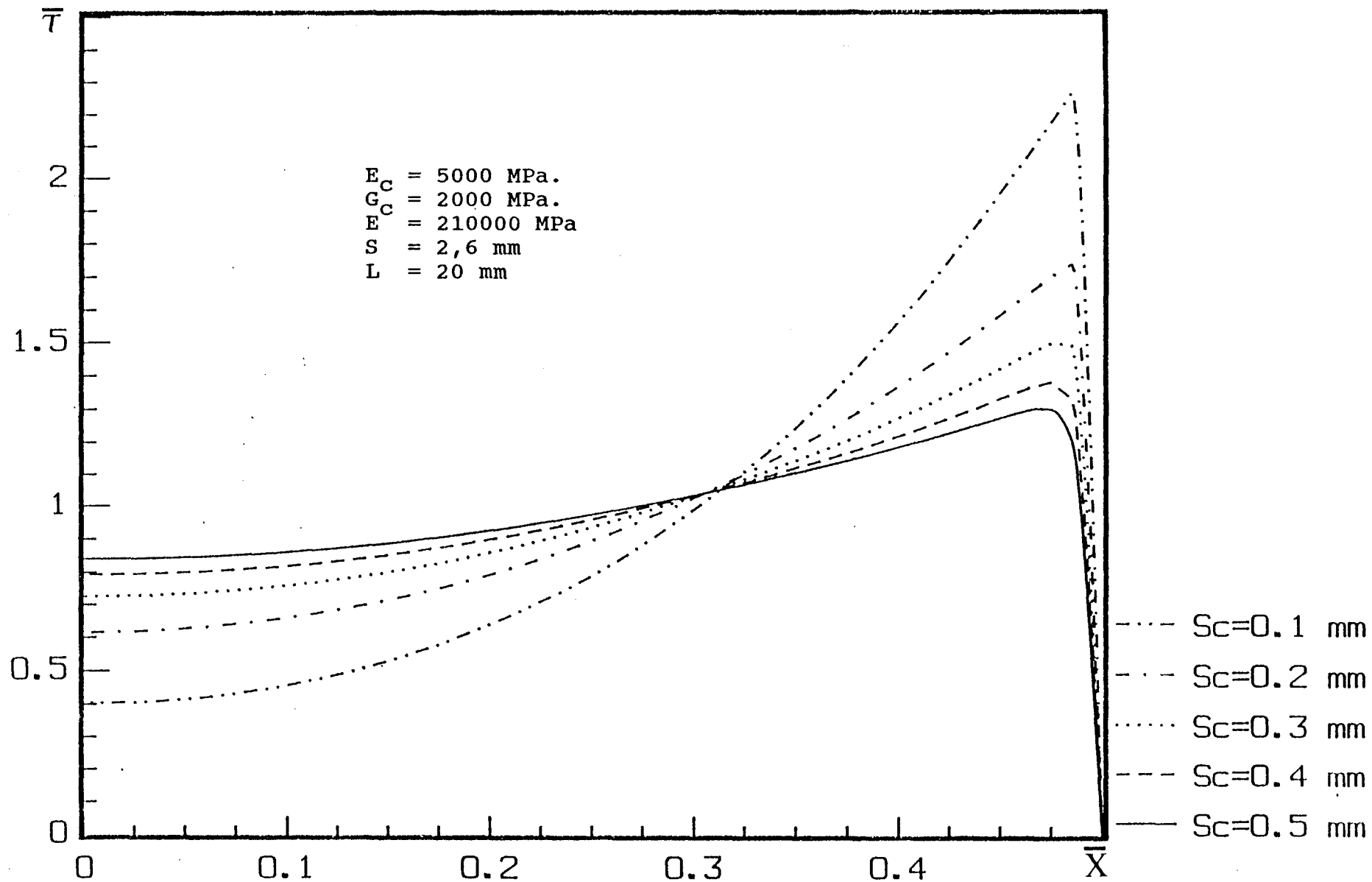


Fig. VIII.1 :  $\bar{\tau}$  en fonction de  $\bar{X}$ . Paramètre : épaisseur ( $S_c$ ) du film d'adhésif.

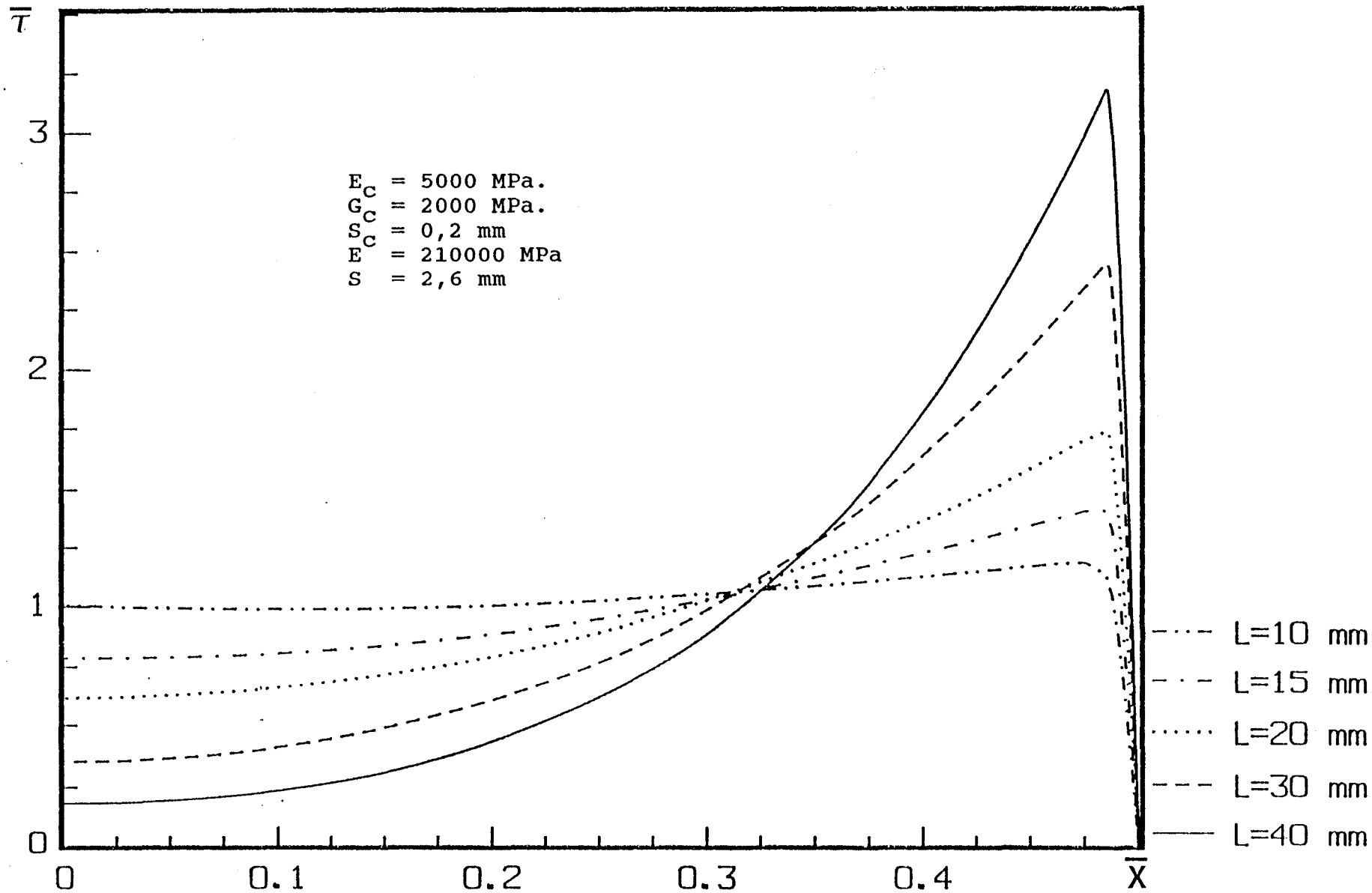


Fig. VIII.2 :  $\bar{\tau}$  en fonction de  $\bar{X}$ . Paramètre : longueur (L) de recouvrement.

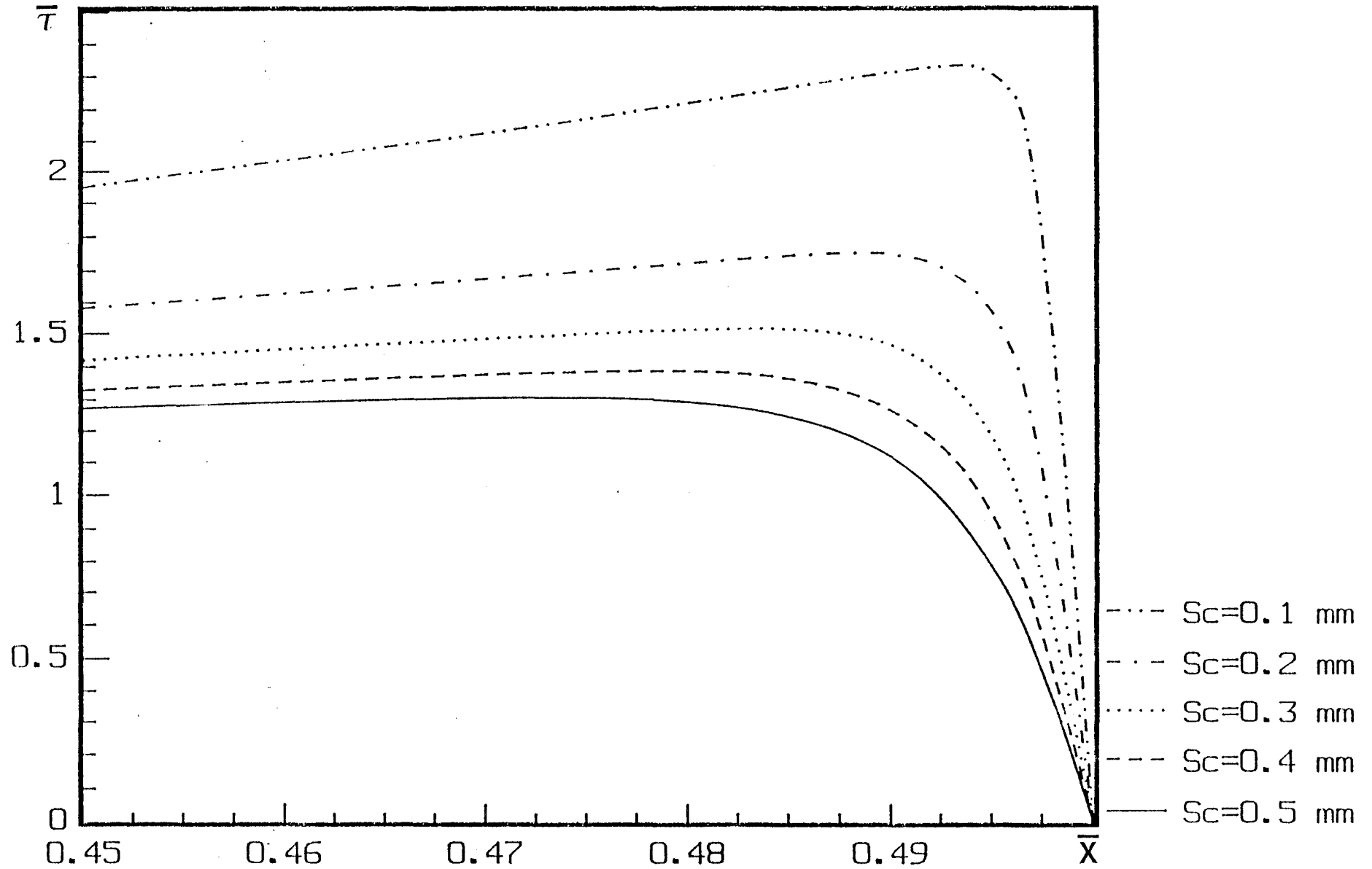


Fig. VIII.3 : Détail agrandi du profil des contraintes spécifiques  $\tau$  au voisinage de l'extrémité libre  $X=1/2$ . Paramètre : épaisseur ( $S_c$ ) du film d'adhésif.

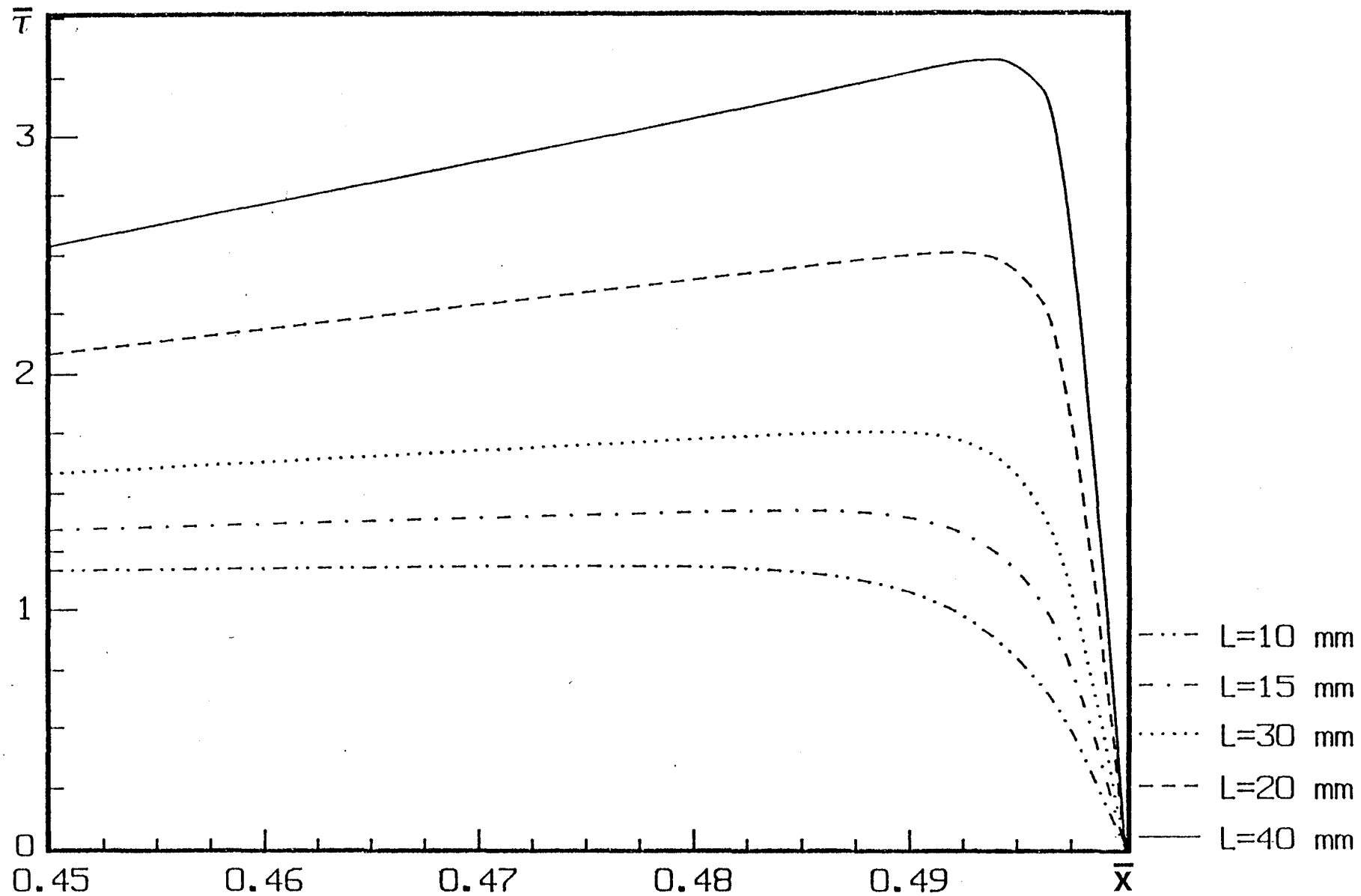


Fig. VIII.4 : Détail agrandi du profil des contraintes spécifiques  $\bar{\tau}$  au voisinage de l'extrémité libre  $\bar{x}=1/2$ . Paramètre : longueur (L) de recouvrement.

-Paramètre fixe :  $S_c = 0.2$  mm  
 $L$  (mm) = 10, 15, 20, 30, 40.

-Paramètre fixe :  $L = 20$  mm  
 $S_c$  (mm) = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5.

Ces courbes mettent en évidence de manière très nette deux régions caractéristiques du joint d'adhésif. La frontière de ces deux régions se situe au point  $\bar{X}_0$  d'intersection des courbes paramétrées. Dans la première région ( $\bar{X} \in [0, \bar{X}_0[$ ), les contraintes adimensionnelles  $\bar{\tau}$  sont des fonctions croissantes de la coordonnée  $\bar{X}$  mais demeurent cependant inférieures à l'unité. Ce qui se traduit par  $\bar{\tau} < \tau_m$ . En revanche, dans la deuxième région ( $\bar{X} \in ]\bar{X}_0, 1/2$ ), la contrainte  $\bar{\tau}$  croît exponentiellement, passe par un extrêum avant de s'annuler en  $\bar{X}=1/2$ . Par ailleurs, lorsque la longueur de recouvrement croît, on constate au voisinage de l'extrémité libre du joint, une augmentation de l'intensité des contraintes  $\bar{\tau}$ . Afin de mieux illustrer le comportement mécanique du joint au voisinage de l'extrémité, les figures VIII.3 et VIII.4 montrent le détail agrandi des courbes consignées dans les figures VIII.1 et VIII.2.

#### VIII.2.2. Profil des contraintes de décollement

L'étude numérique de la variation des contraintes adimensionnelles de décollement du joint en fonction de la coordonnée  $\bar{X}$  a été effectuée. Les paramètres géométriques ( $S_c$  et  $L$ ) du film de colle pris en compte sont identiques à ceux du paragraphe VIII.I.1. Les figures VIII.5 et VIII.6 montrent les profils des contraintes de décollement  $\bar{\sigma}$ . L'examen des différentes courbes montre bien que quelles que soient l'épaisseur  $S_c$  et la longueur de recouvrement  $L$ , les contraintes de décollement  $\bar{\sigma}$  demeurent prépondérantes en  $\bar{X}=1/2$ . Par ailleurs, il convient de noter que les contraintes de cisaillement et de décollement jouent un rôle symétrique. En effet, au bord libre

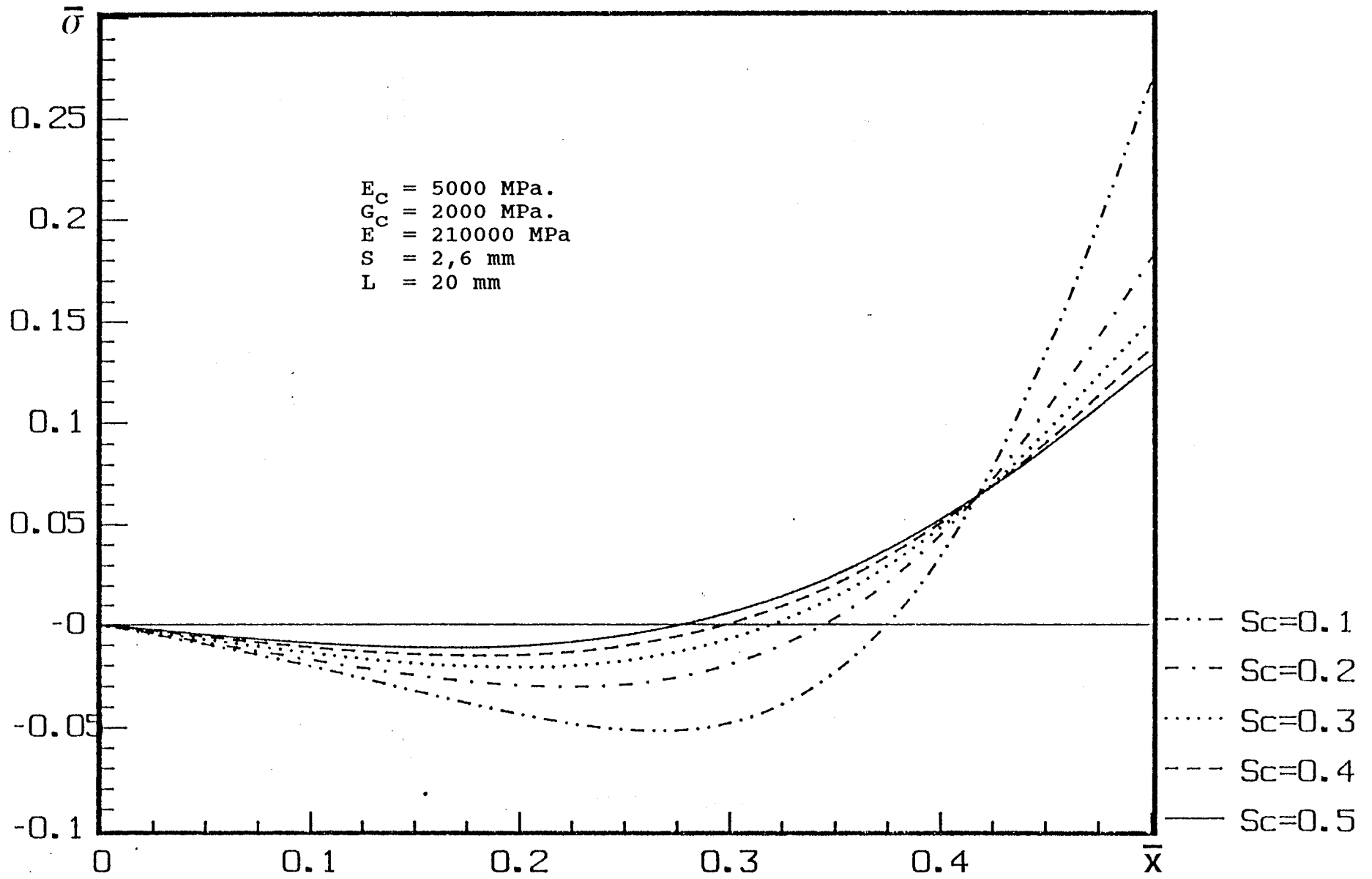


Fig. VIII.5 :  $\bar{\sigma}$  en fonction de  $\bar{X}$ . Paramètre : épaisseur ( $S_c$ ) du film d'adhésif.

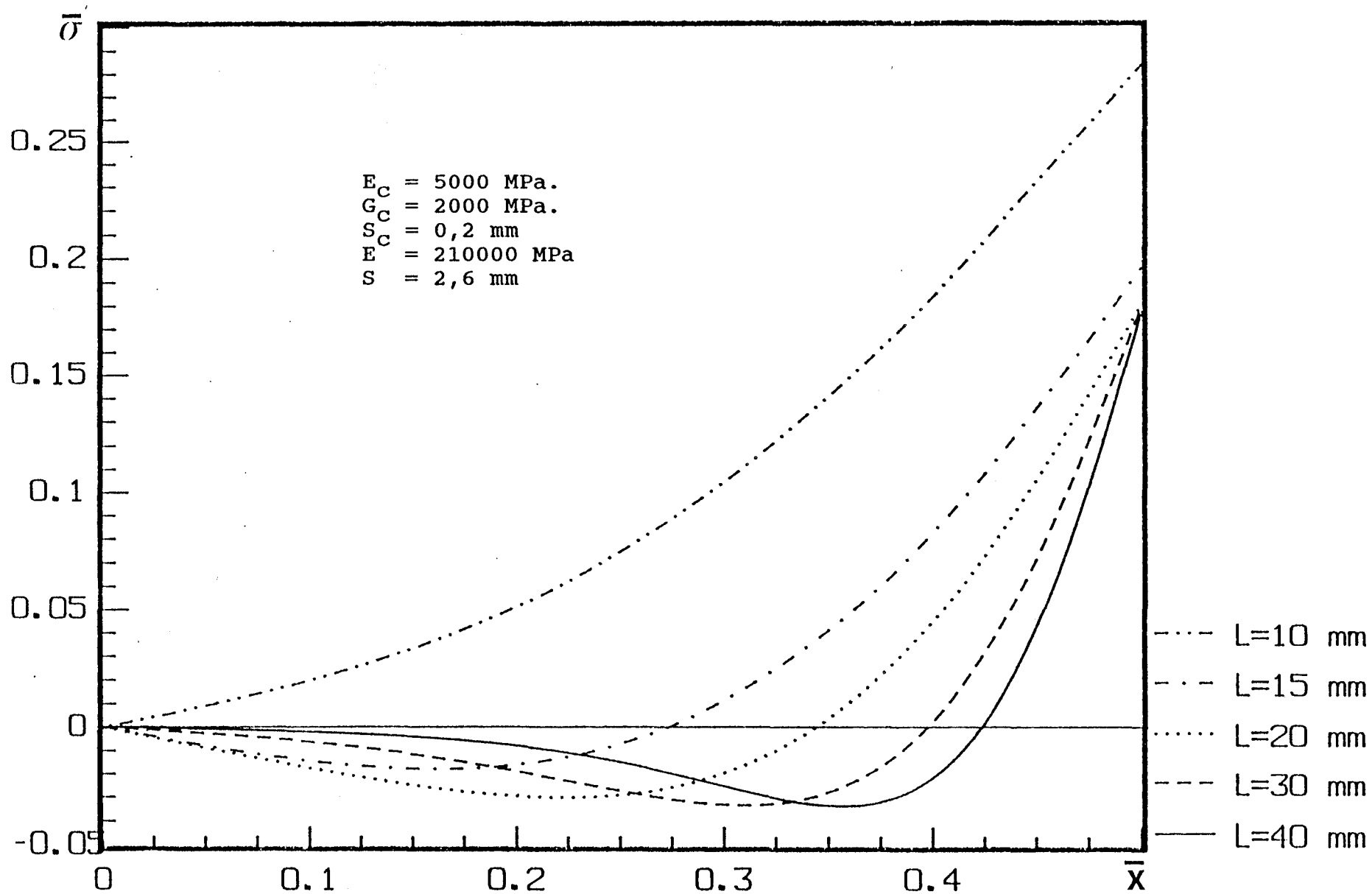


Fig. VIII.6 :  $\bar{\sigma}$  en fonction de  $\bar{X}$ . Paramètre : longueur (L) de recouvrement



$\bar{X}=1/2$ , la contrainte de cisaillement s'annule tandis que la contrainte de décollement atteint sa valeur maximale. Cette valeur maximale  $\bar{\sigma}_M$ . Cette valeur croît avec l'augmentation de l'épaisseur du film de colle et décroît pour des longueurs de recouvrement de plus en plus élevées.

Par ailleurs, les résultats numériques mettent en évidence les variations de l'abscisse  $\bar{X}_M$  de la contrainte maximale de cisaillement  $\bar{\tau}_M$  en fonction de l'épaisseur  $S_c$  du film d'adhésif et de la longueur de recouvrement  $L$  du joint. Ces variations sont illustrées par les figures VIII.7 et VIII.8. On y remarque en outre que, pour une configuration (géométrique et mécanique) donnée du film de colle et du substrat, les points  $\bar{X}_M$  s'éloignent du bord libre  $\bar{X}=1/2$  lorsque l'épaisseur du film de colle augmente. Le comportement inverse est observé pour des longueurs de recouvrement de plus en plus élevées.

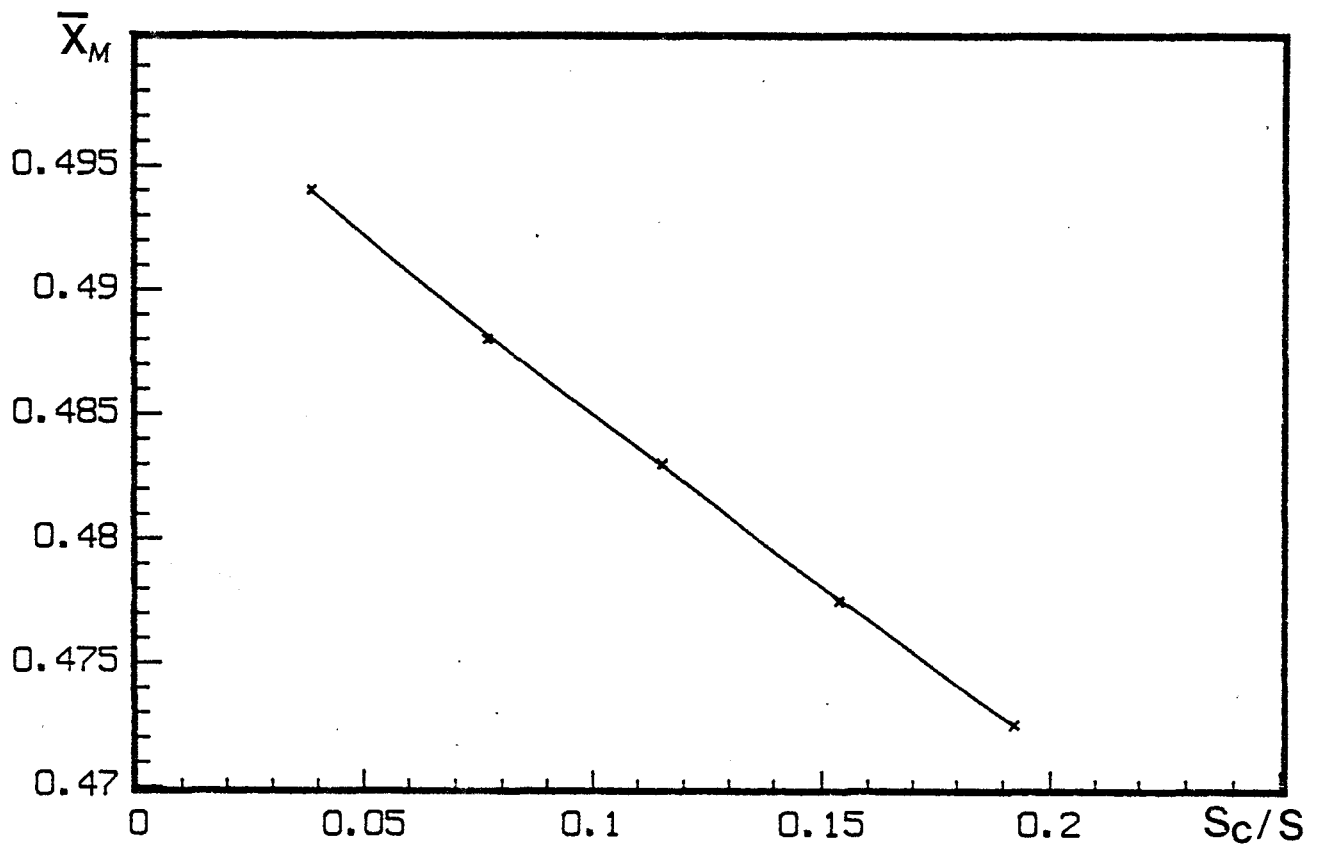


Fig. VIII.7 : Variation de  $\bar{X}_M$  en fonction de  $S_c/S$  .

$E=210000$  MPa,  $E_c=5000$  MPa,  $S=2,6$  mm,  $L=20$  mm

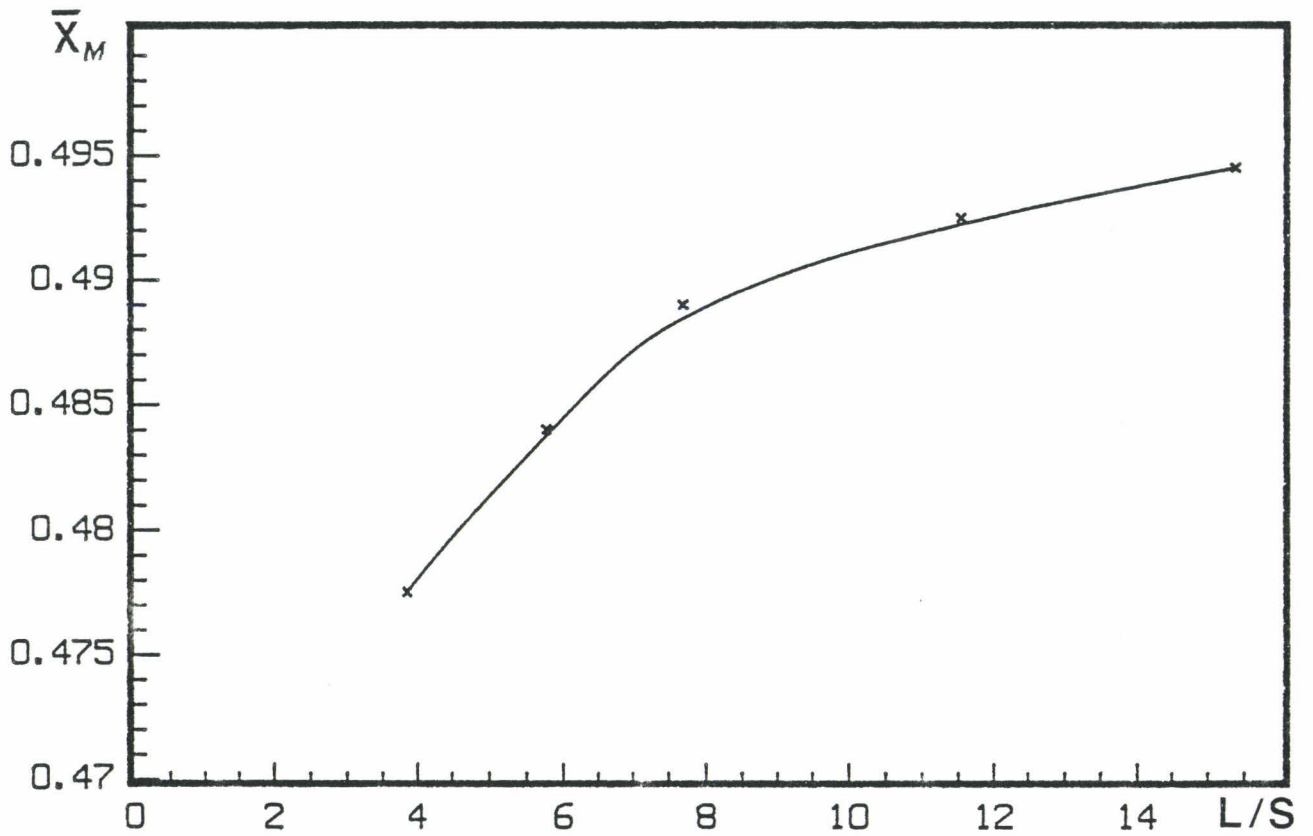


Fig. VIII.8 : Variation de  $\bar{X}_M$  en fonction de L/S

$E=210000$  MPa,  $E_c=5000$  MPa.

$S=2,6$  mm,  $S_c=0.2$  mm.

Afin de mieux illustrer l'influence des paramètres géométriques de l'adhésif, nous avons étudié pour différents rapports des modules de Young ( substrat - colle ), la variation des contraintes maximales de cisaillement (  $\bar{\tau}_M$  ), de décollement (  $\bar{\sigma}_M$  ) et de l'abscisse  $\bar{X}_M$  des contraintes de cisaillement maximales en fonction de l'épaisseur (  $S_c$  ) et la longueur de recouvrement ( L ) du joint. Pour l'épaisseur S des substrats fixée à une valeur constante ainsi que pour différentes valeurs du rapport  $E/E_c$ , nous avons évalué  $\bar{\tau}_M$ ,  $\bar{\sigma}_M$  et  $\bar{X}_M$  en fonction de l'épaisseur spécifique  $S_c/S$ . Les courbes représentatives de  $\bar{\tau}_M$ ,  $\bar{\sigma}_M$  et  $\bar{X}_M$  sont paramétrées en L/S. Cette quantité caractérise la longueur spécifique (grandeur sans

dimension). Les figures VIII.9 à VIII.18 illustrent les différentes courbes. Les caractéristiques mécaniques de l'adhésif prises en compte lors des calculs numériques sont données: pour  $\bar{\tau}_M$  et  $\bar{\sigma}_M$  par le tableau VIII.1 et pour  $\bar{\chi}_M$  par le tableau VIII.2.

| $\frac{E}{E_c}$ | $E_c$<br>(MPa) | $G_c$<br>(MPa) |
|-----------------|----------------|----------------|
| 42              | 5000           | 1800           |
| 84              | 2500           | 890            |
| 168             | 1250           | 431            |
| 210             | 1000           | 340            |

Tableau VIII.1

| $\frac{E}{E_c}$ | $E_c$<br>(MPa) | $G_c$<br>(Mpa) |
|-----------------|----------------|----------------|
| 15              | 4666,6         | 1728,4         |
| 55,5            | 1284           | 431            |
| 100             | 2100           | 750            |

Tableau VIII.2

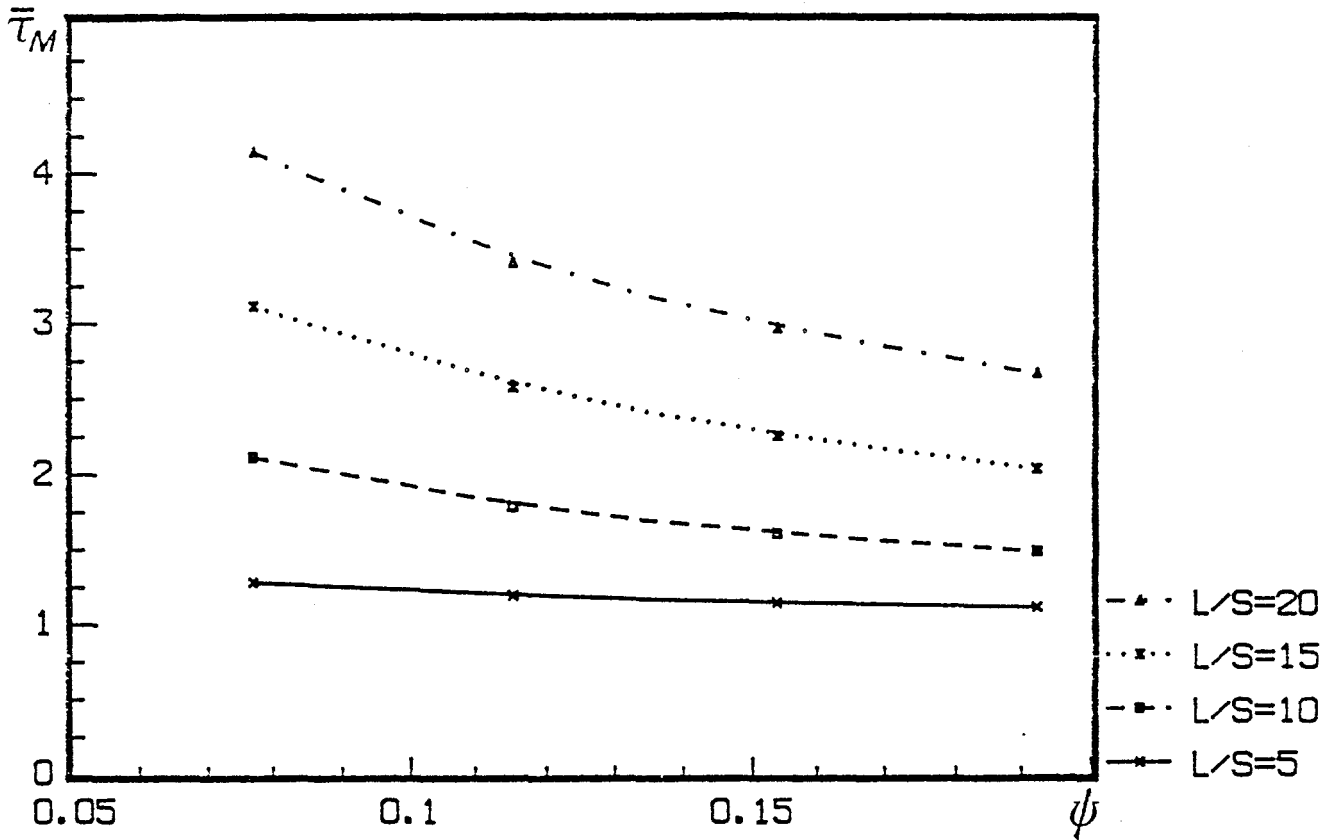


Figure VIII.9 :  $\bar{\tau}$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi=S_c/S$ .  $E/E_c=42$ .  $S=2,6$  mm

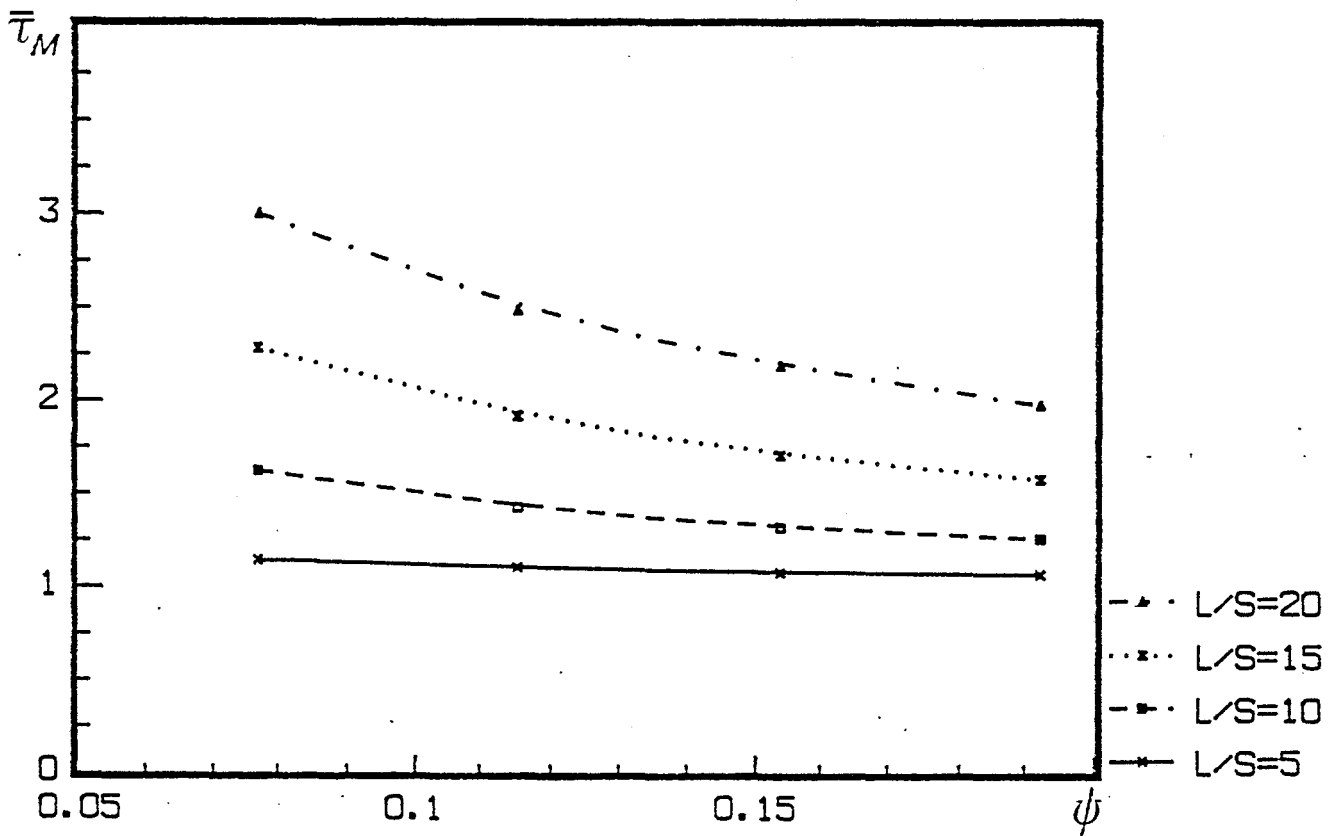


Figure VIII.10 :  $\bar{\tau}$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi=S_c/S$ .  $E/E_c=42$ .  $S=2,6$  mm

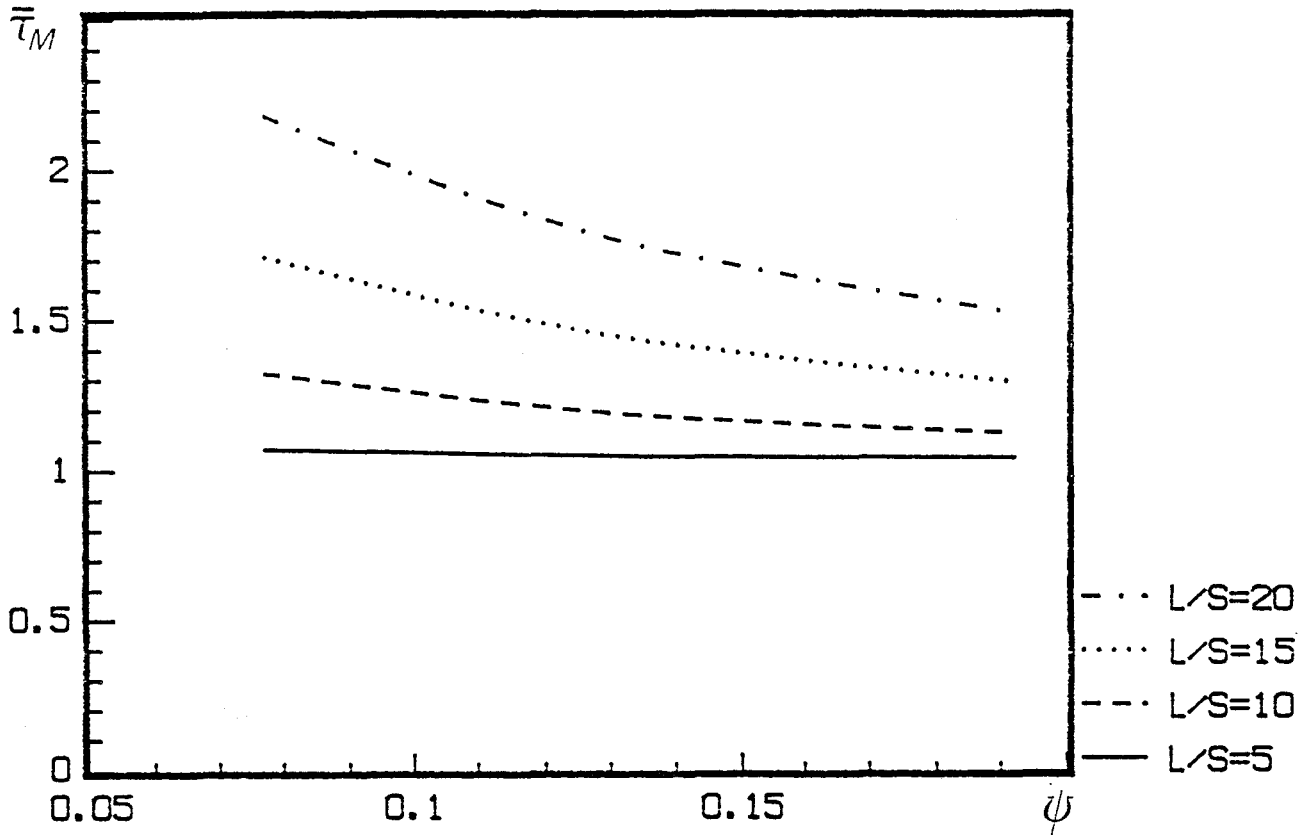


Figure VIII.11  $\bar{\tau}$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi = S_c/S$ .  $E/E_c = 162$ .  $S = 2,6$  mm

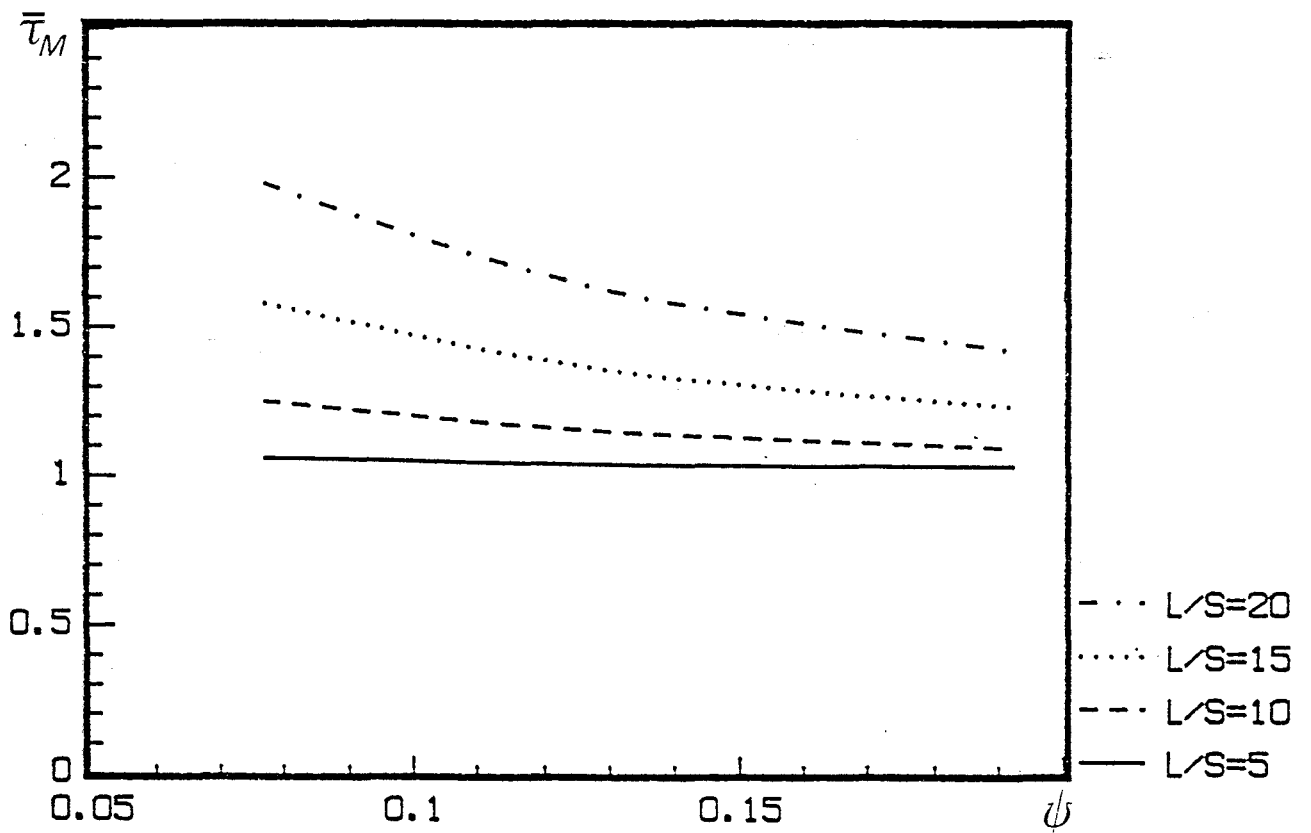


Figure VIII.12 :  $\bar{\tau}$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi = S_c/S$ .  $E/E_c = 210$ .  $S = 2,6$  mm

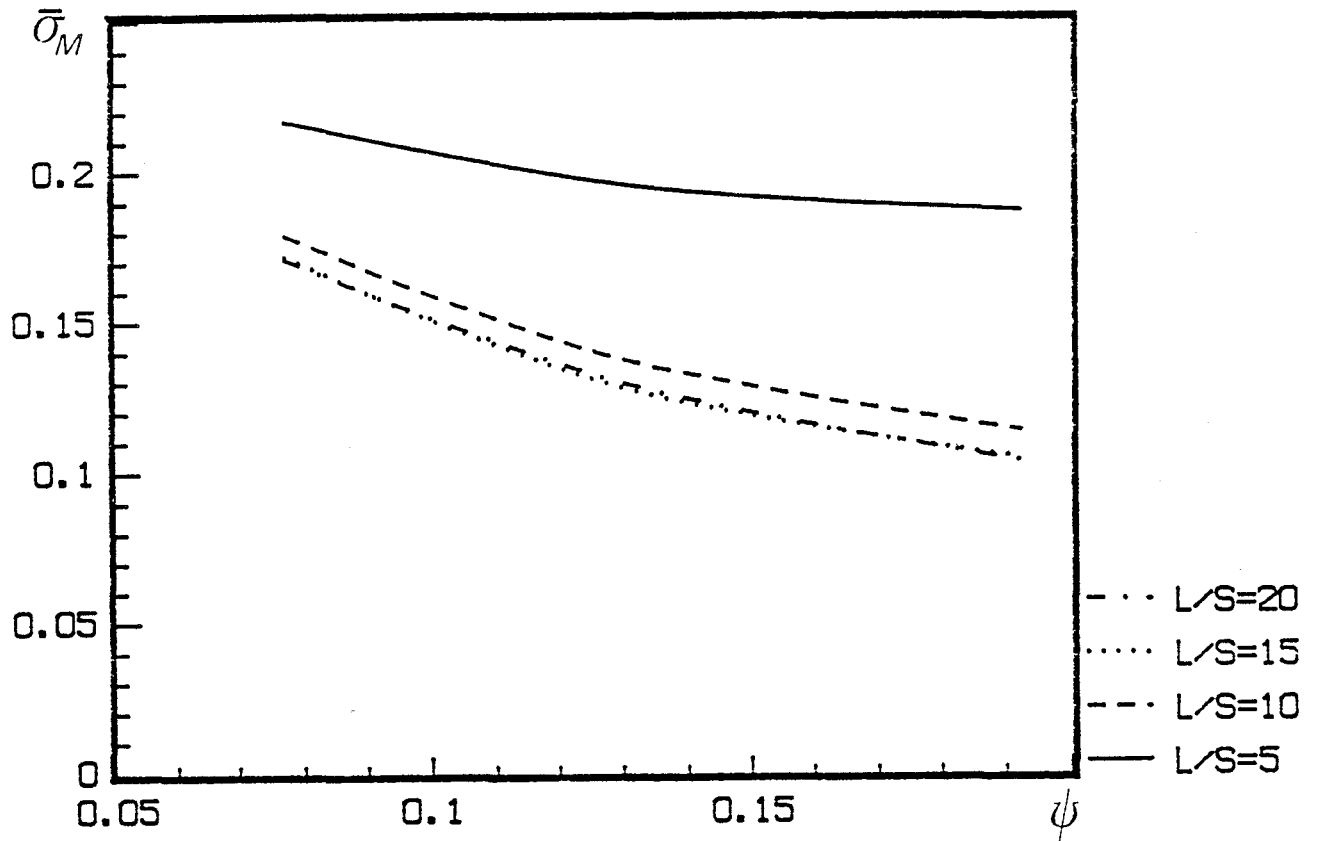


Figure VIII.13 :  $\bar{\sigma}$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi = S_c/S$ .  $E/E_c = 42$ .  $S = 2,6$  mm

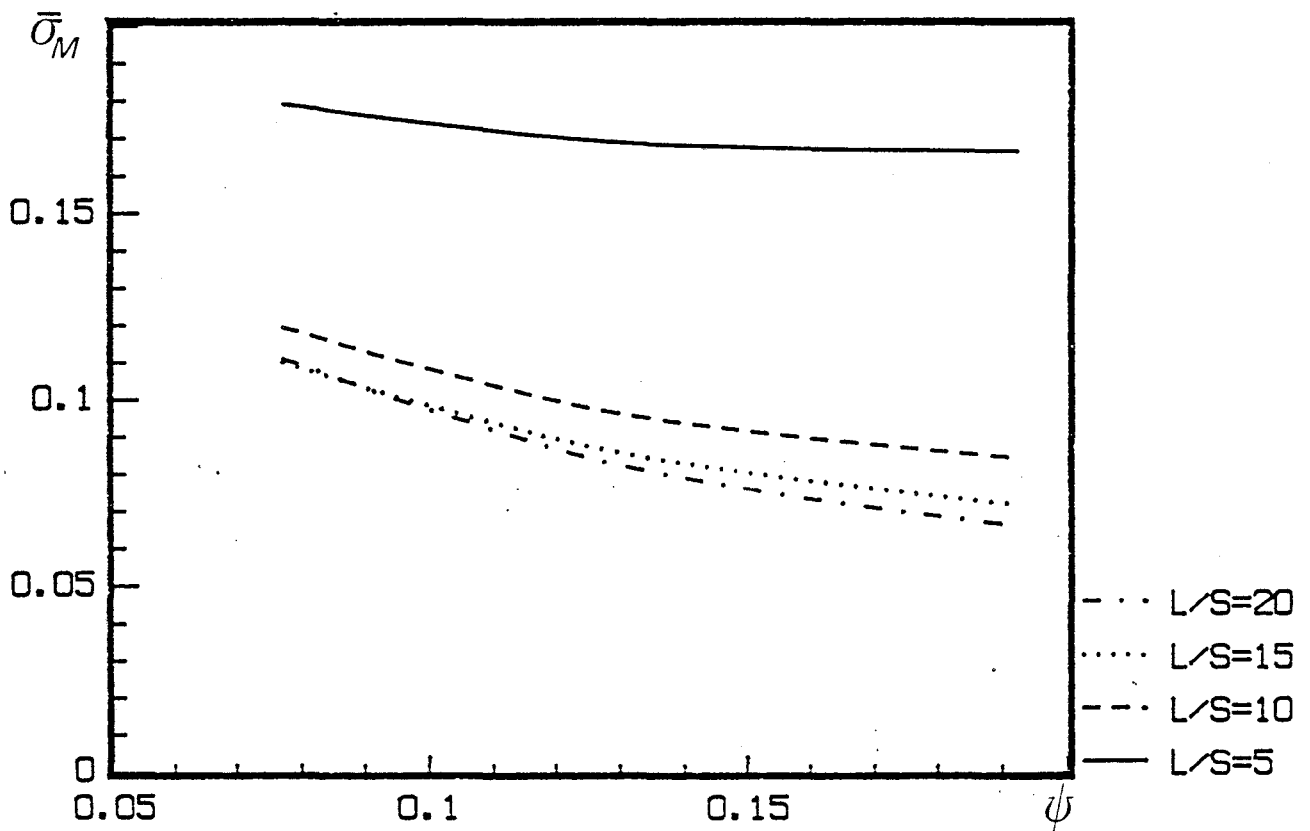


Figure VIII.14 :  $\bar{\sigma}$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi = S_c/S$ .  $E/E_c = 84$ .  $S = 2,6$  mm

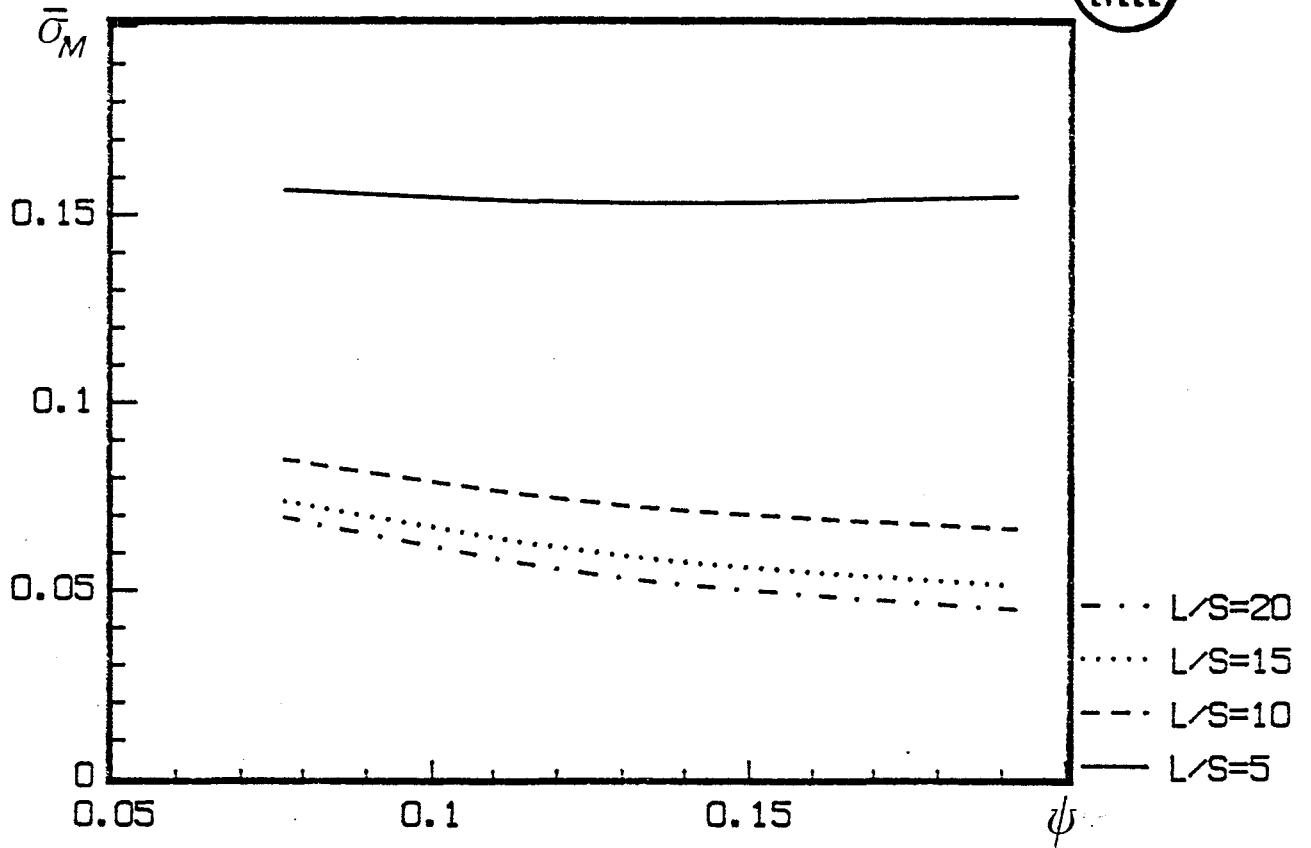


Figure VIII.15 :  $\bar{\sigma}$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi = S_c/S$ .  $E/E_c = 168$ .  $S = 2,6$  mm

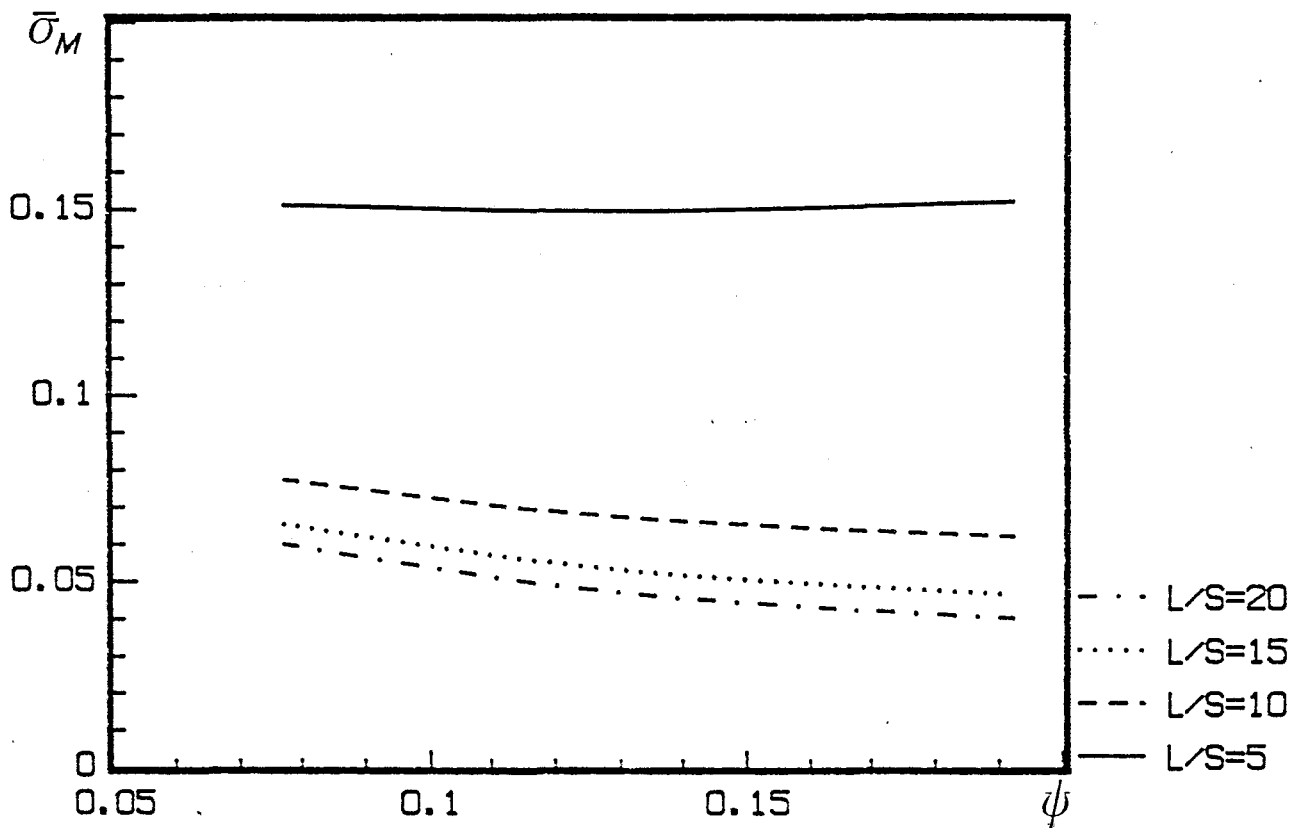


Figure VIII.14 :  $\bar{\sigma}$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi = S_c/S$ .  $E/E_c = 210$ .  $S = 2,6$  mm

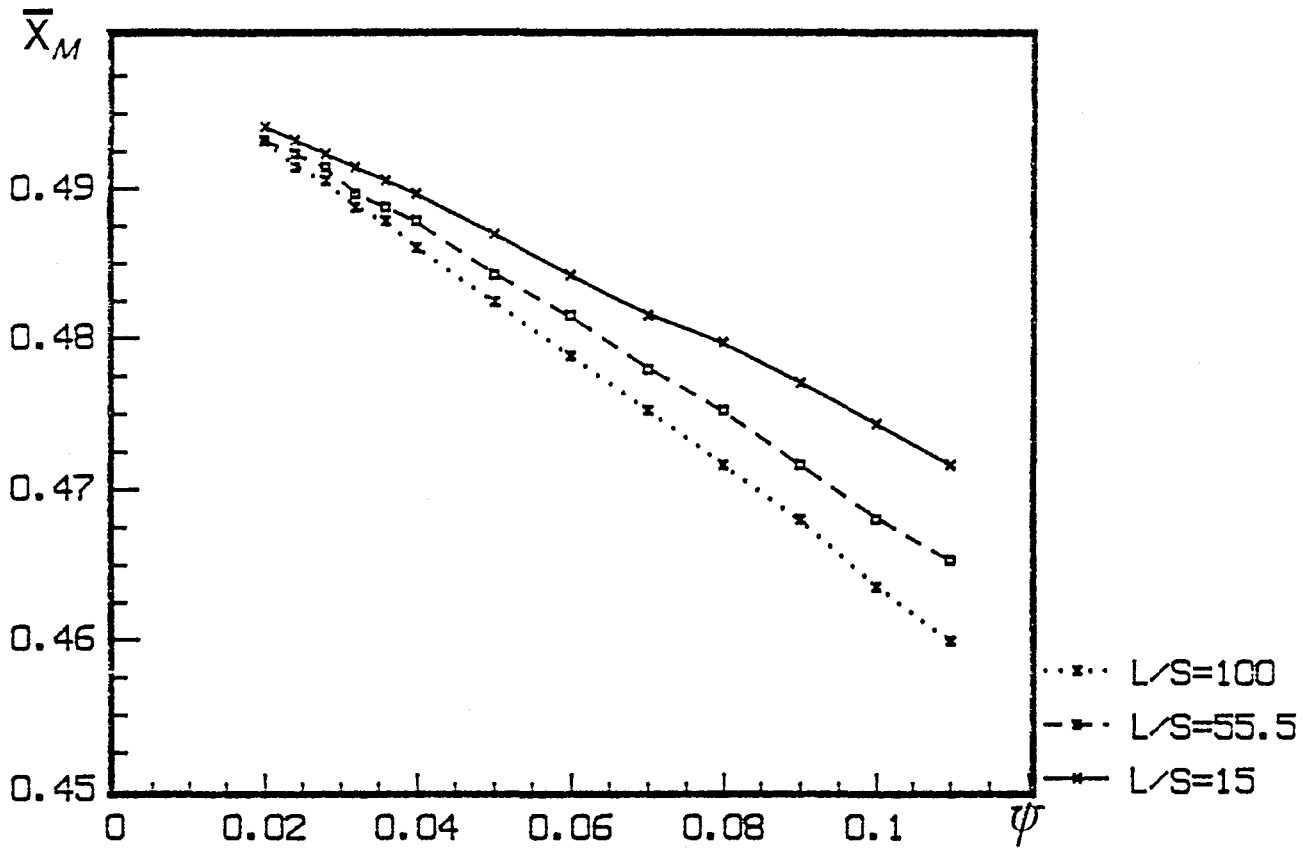


Figure VIII.17 :  $\bar{X}_M$  en fonction de  $\psi$ .  $\psi=S_c/S$ .  $S=5$  mm.  $L=20$  mm.

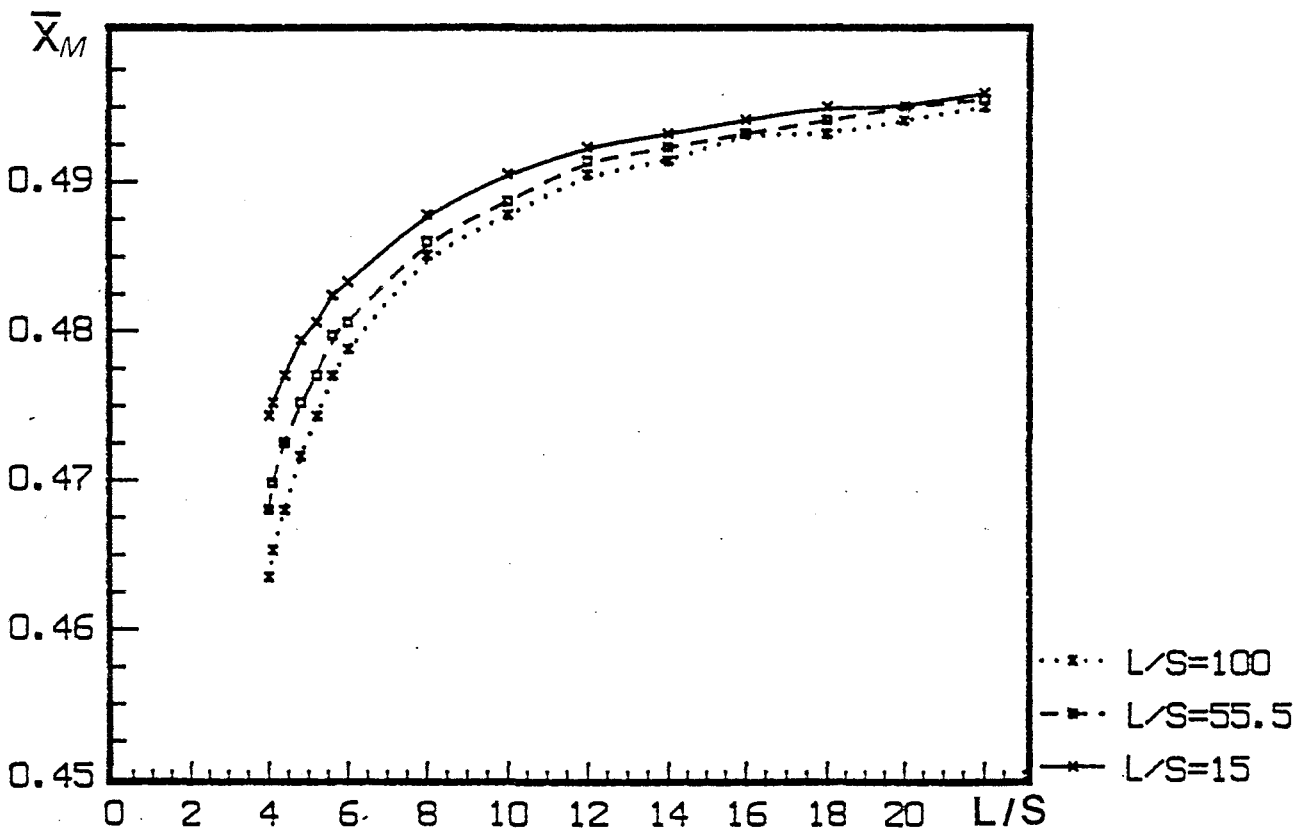


Figure VIII.18 :  $\bar{X}_M$  en fonction de  $L/S$ .  $S_c=0,5$  mm.  $S=5$  mm.



**VIII.3. - INFLUENCE DE L'ÉPAISSEUR DES SUBSTRATS ET DES MODULES DE YOUNG DES DEUX MILIEUX**

Trois séries de calcul nous permettent d'apprécier :

- l'influence de la variation de l'épaisseur des substrats extérieurs sur l'intensité des contraintes dans le joint.
- l'influence de la variation des modules de Young de l'adhésif ( $E_c$ ) et des substrats (E).

Les résultats numériques (voir tableaux VIII.3 à VIII.6) indiquent pour différentes valeurs du rapport de modules substrat-adhésif, les variations des contraintes maximales dans le joint en fonction des rapports  $L/S$  et  $S_c/S$ . Les courbes représentées par les figures VIII.19, VIII.20 et VIII.21 montrent les variations de  $\bar{\tau}$ ,  $\bar{\sigma}$  et  $\bar{X}_M$ , en fonction de  $E_c$  et E ; dans ce cas, les données nominales du joint sont :

|                |      |      |      |      |     |
|----------------|------|------|------|------|-----|
| $E_c$<br>(MPa) | 5000 | 2500 | 1250 | 1000 | 400 |
| $G_c$<br>(MPa) | 1800 | 890  | 431  | 340  | 131 |

$$S = 2,6 \text{ mm} \quad , \quad S_c = 0,2 \text{ mm} \quad , \quad L = 20 \text{ mm}$$

|            |        |        |        |       |       |       |
|------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|
| E<br>(MPa) | 210000 | 180000 | 130000 | 70000 | 50000 | 26000 |
|------------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|

$$S = 2,6 \text{ mm} \quad , \quad S_c = 0,2 \text{ mm} \quad , \quad L = 20 \text{ mm}$$

|                 |      |                  | L/S   |       |       |       |
|-----------------|------|------------------|-------|-------|-------|-------|
|                 |      |                  | 5     | 10    | 15    | 20    |
| $\frac{S_c}{S}$ | 0,05 | $\bar{\tau}_M$   | 1,17  | 1,69  | 2,40  | 3,19  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,391 | 0,233 | 0,230 | 0,217 |
|                 | 0,06 | $\bar{\tau}_M$   | 1,14  | 1,60  | 2,54  | 2,97  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,346 | 0,194 | 0,194 | 0,184 |
|                 | 0,1  | $\bar{\tau}_M$   | 1,12  | 1,51  | 2,09  | 2,75  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,283 | 0,159 | 0,154 | 0,146 |
|                 | 0,2  | $\bar{\tau}_M$   | 1,11  | 1,46  | 2,00  | 2,61  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,195 | 0,113 | 0,103 | 0,101 |
|                 | 0,25 | $\bar{\tau}_M$   | 1,09  | 1,37  | 1,82  | 2,35  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,185 | 0,104 | 0,094 | 0,094 |

Tableau VIII.3:  $E/E_c=42$ ,  $E=210000$  MPa,  $G_c=1800$  MPa,  $S_c = 0,2$  mm.

|                 |      |                  | L/S   |       |       |       |
|-----------------|------|------------------|-------|-------|-------|-------|
|                 |      |                  | 5     | 10    | 15    | 20    |
| $\frac{S_c}{S}$ | 0,05 | $\bar{\tau}_M$   | 1,07  | 1,36  | 1,81  | 2,33  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,354 | 0,166 | 0,150 | 0,144 |
|                 | 0,06 | $\bar{\tau}_M$   | 1,08  | 1,31  | 1,70  | 2,18  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,315 | 0,145 | 0,128 | 0,122 |
|                 | 0,1  | $\bar{\tau}_M$   | 1,07  | 1,26  | 1,61  | 2,03  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,258 | 0,119 | 0,103 | 0,096 |
|                 | 0,2  | $\bar{\tau}_M$   | 1,06  | 1,24  | 1,55  | 1,94  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,166 | 0,084 | 0,070 | 0,064 |
|                 | 0,25 | $\bar{\tau}_M$   | 1,05  | 1,18  | 1,44  | 1,77  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,168 | 0,079 | 0,065 | 0,058 |

Tableau VIII.4:  $E/E_c=84$ ,  $E=210000$  MPa,  $G_c=890$  MPa,  $S_c=0,2$  mm.

|                 |      |                  | L/S   |       |       |       |
|-----------------|------|------------------|-------|-------|-------|-------|
|                 |      |                  | 5     | 10    | 15    | 20    |
| $\frac{S_c}{S}$ | 0,05 | $\bar{\tau}_M$   | 1,05  | 1,18  | 1,42  | 1,74  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,334 | 0,131 | 0,103 | 0,096 |
|                 | 0,06 | $\bar{\tau}_M$   | 1,05  | 1,15  | 1,37  | 1,65  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,298 | 0,115 | 0,089 | 0,082 |
|                 | 0,1  | $\bar{\tau}_M$   | 1,04  | 1,13  | 1,31  | 1,56  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,244 | 0,095 | 0,072 | 0,065 |
|                 | 0,2  | $\bar{\tau}_M$   | 1,04  | 1,11  | 1,28  | 1,50  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,155 | 0,065 | 0,050 | 0,044 |
|                 | 0,25 | $\bar{\tau}_M$   | 1,04  | 1,09  | 1,22  | 1,40  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,158 | 0,063 | 0,047 | 0,041 |

Tableau VIII.5 :  $E/E_c=168$ ,  $E=210000$  MPa,  $G_c=431$  MPa,  $S_c=0,2$  mm.

|                 |      |                  | L/S   |       |       |       |
|-----------------|------|------------------|-------|-------|-------|-------|
|                 |      |                  | 5     | 10    | 15    | 20    |
| $\frac{S_c}{S}$ | 0,05 | $\bar{\tau}_M$   | 1,05  | 1,14  | 1,34  | 1,60  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,329 | 0,123 | 0,093 | 0,085 |
|                 | 0,06 | $\bar{\tau}_M$   | 1,04  | 1,12  | 1,29  | 1,52  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,294 | 0,108 | 0,081 | 0,072 |
|                 | 0,1  | $\bar{\tau}_M$   | 1,04  | 1,10  | 1,25  | 1,45  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,241 | 0,089 | 0,066 | 0,058 |
|                 | 0,2  | $\bar{\tau}_M$   | 1,04  | 1,09  | 1,22  | 1,40  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,152 | 0,061 | 0,046 | 0,039 |
|                 | 0,25 | $\bar{\tau}_M$   | 1,04  | 1,07  | 1,17  | 1,32  |
|                 |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,156 | 0,059 | 0,043 | 0,036 |

Tableau VIII.6 :  $E/E_c=210$ ,  $E=210000$  MPa,  $G_c=431$  MPa,  $S_c=0,2$  mm

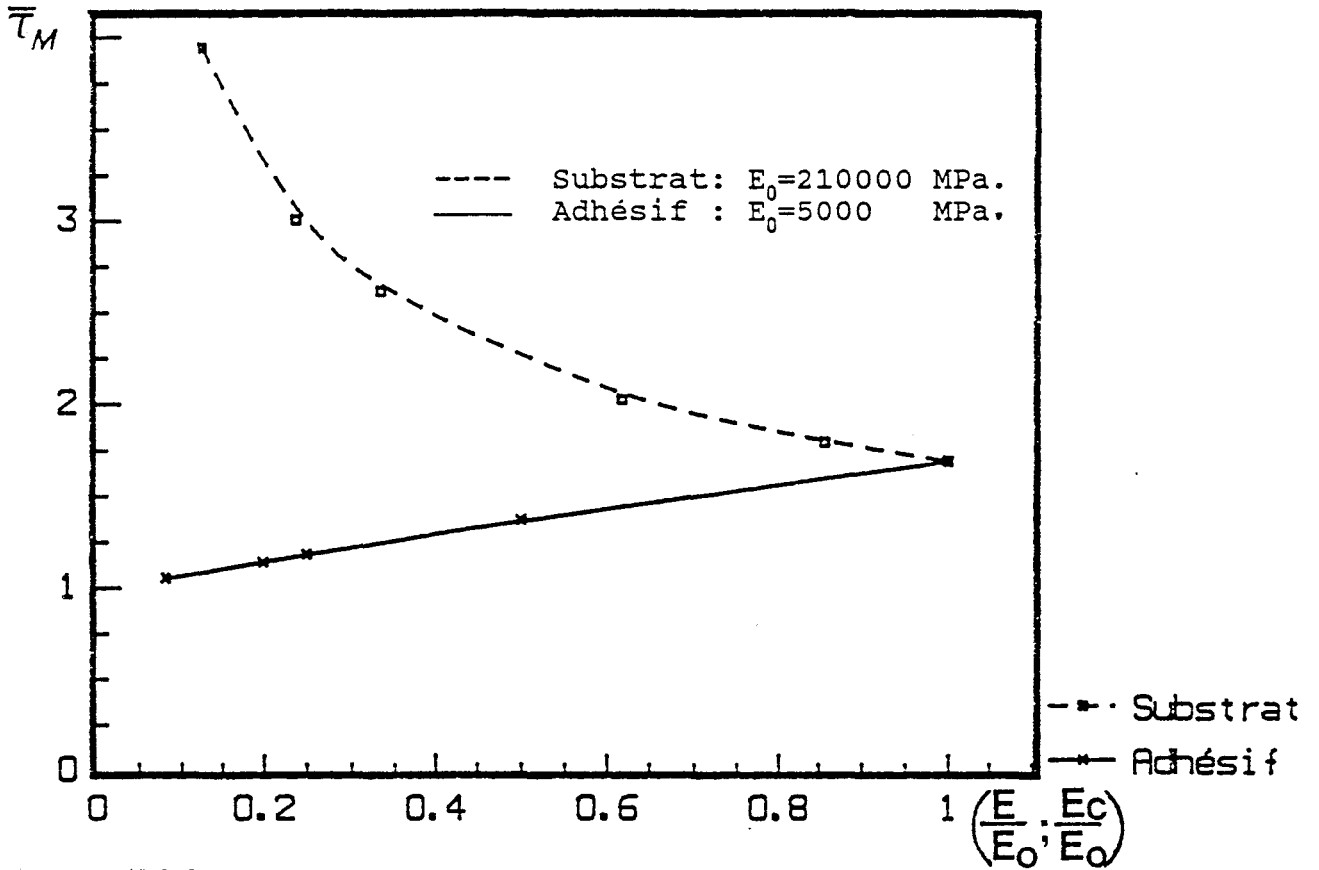


Figure VIII.19 :  $\bar{\tau}_M$  en fonction des modules de Young E et  $E_c$ .

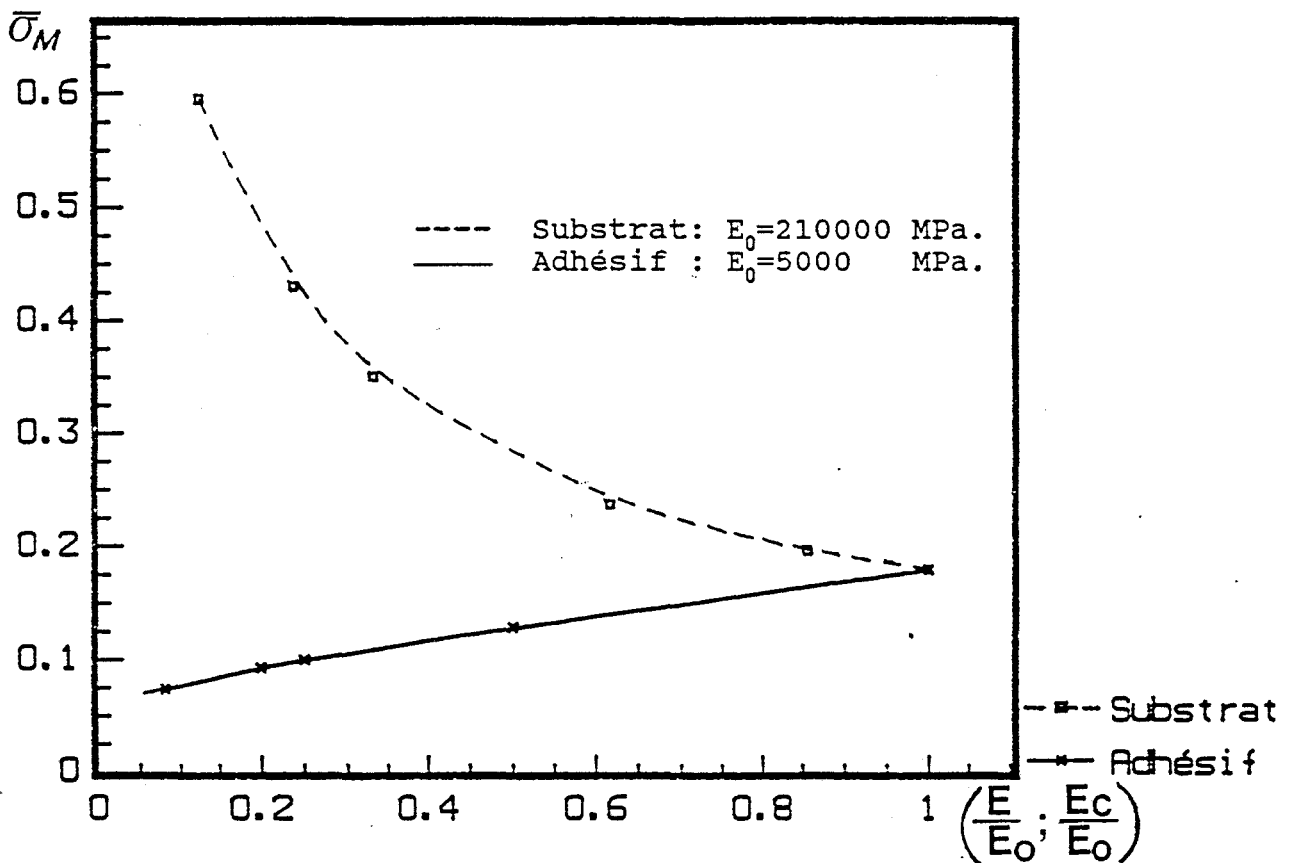


Figure VIII.20 :  $\bar{\sigma}_M$  en fonction des modules de Young E et  $E_c$ .

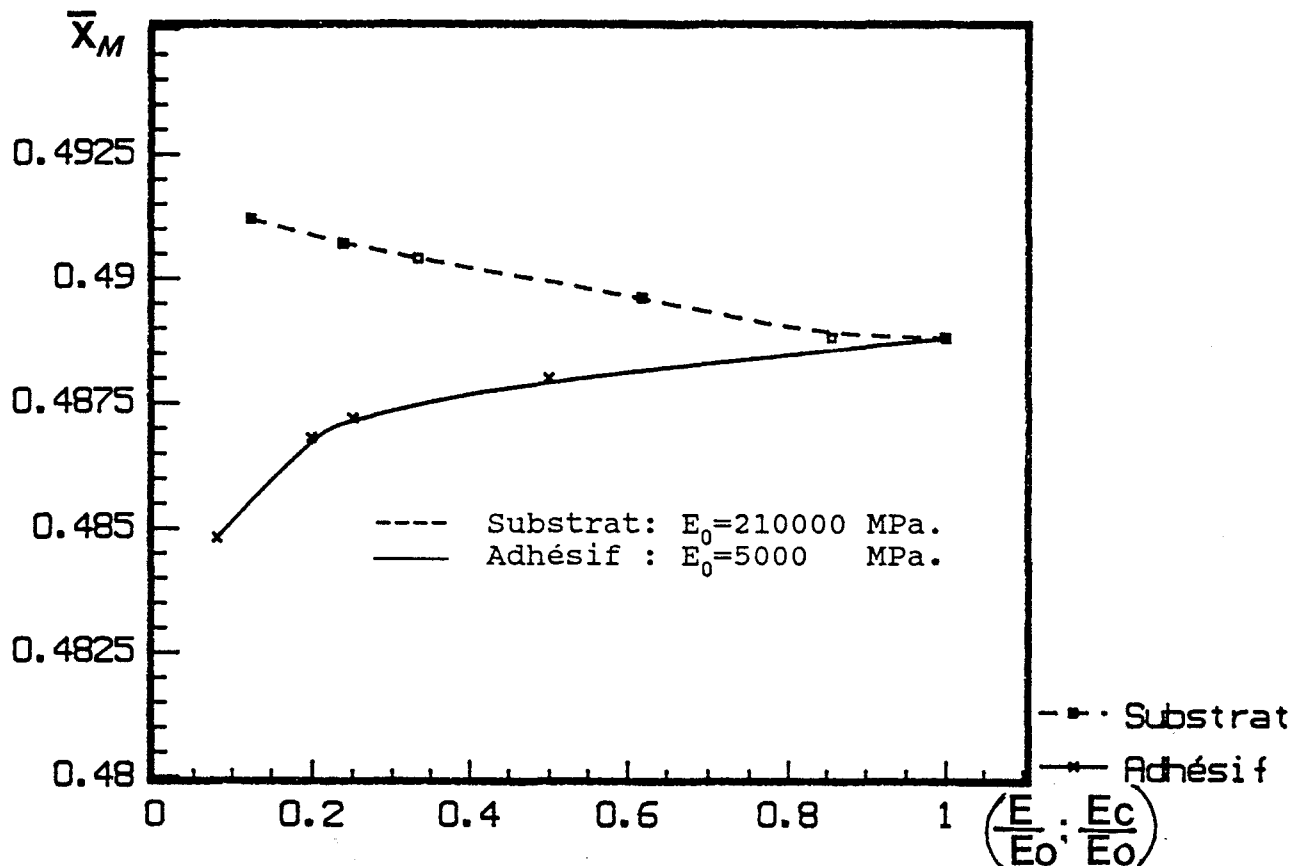


Fig. VIII.21 : Variation de  $\bar{X}_M$  en fonction de E et  $E_c$

#### VIII.4.- CONFRONTATION AVEC D'AUTRES MODELES THEORIQUES

Dans cette partie, nous effectuons une comparaison entre le modèle de VOLKERSEN développé et quelques modèles théoriques. En effet, le calcul de la répartition des contraintes, basé sur des hypothèses simplificatrices peut conduire à des résultats assez disparates. Il convient alors de faire une confrontation des différents modèles afin de situer la validité de notre modèle.

##### VIII.4.1.-Expression des contraintes spécifiques de cisaillement dans le recouvrement pour différents modèles

Dans cette partie, nous comparons nos résultats numériques avec ceux obtenus suivant :

- la démarche théorique de VOLKERSEN (10)
- la méthode de (12) des développements asymptotiques (15)
- l'application de la méthode de calcul par éléments finis

Le profil des contraintes dans le plan moyen du film d'adhésif est donné dans le cas du modèle des développements asymptotiques et de celui du modèle classique par:.

#### VIII.4.1.1.- Modèle des développements asymptotiques

Dans ce modèle, les auteurs (15) considèrent que :

$$\bar{\tau}(\bar{X}) = \frac{\omega}{2} \left[ \frac{\text{ch}\omega x}{\text{sh}\omega/2} - 2 \text{cth} \frac{\omega}{2} \left[ S \left[ -\frac{\bar{X}+1/2}{2 \epsilon} \right] + S \left[ \frac{\bar{X}-1/2}{2 \epsilon} \right] \right] \right]$$

$$\bar{\sigma}(\bar{X}) = \omega \text{cth} \frac{\omega}{2} \left[ D \left[ -\frac{\bar{X}+1/2}{2 \epsilon} \right] + D \left[ \frac{\bar{X}-1/2}{2 \epsilon} \right] \right]$$

$$\text{avec : } \omega^2 = \frac{2G_c L^2}{ESS_c}, \quad \epsilon = \frac{S}{L}$$

$$\begin{aligned} S(x) &= e^{\rho_1 x} (0,636 \cos(j_1 x) + 0,625 \sin(j_1 x)) \\ D(x) &= e^{\rho_1 x} (0,672 \cos(j_1 x) + 0,278 \sin(j_1 x)) \\ \rho_1 &= 2,106 \\ j_1 &= 1,125 \end{aligned}$$

#### VIII.4.1.2.- Méthode classique

Dans ce modèle, Y.GILIBERT (12) aboutit à :

$$\bar{\tau}(\bar{X}) = \frac{G_c S_c}{E S} \left[ \text{ch } wL(\bar{X}-1/2) + \text{ch } wL(\bar{X}+1/2) \right] \quad \text{avec } w^2 = \frac{2G_c}{ESS_c}$$

#### VIII.4.1.3.- Méthode des éléments finis

L'application de la méthode de calcul par éléments finis permet le calcul des champs de déplacements, de contraintes et de déformations dans les milieux continus. Elle permet en outre l'élimination de toutes les hypothèses simplificatrices faites dans la plupart des modèles théoriques. Sans présenter une analyse détaillée de la méthode des éléments finis, nous indiquerons cependant les hypothèses de calcul et l'architecture générale de la méthode.

##### a) Hypothèses de calcul

L'assemblage à double recouvrement est considéré comme

un milieu homogène, isotrope, élastique et linéaire subdivisé en cinq blocs : deux films d'adhésif et trois substrats. Les charges (efforts de traction) sont appliquées aux extrémités du substrat médian et des couvre-joints extérieurs. Compte tenu de la géométrie de l'assemblage (élancement), les calculs ont été menés suivant un modèle de contraintes planes.

b) Architecture générale de calcul

L'architecture générale de la méthode de calcul représentée par la figure VIII.22 peut se résumer en trois parties essentielles :

- 1) mise au point du modèle géométrique.
- 2) mise au point du modèle mécanique.
- 3) résolution numérique.

c) Modèle géométrique

Le but de la modélisation géométrique est de permettre, grâce au mailleur automatique la définition : du type de calcul (bidimensionnel linéaire dans notre cas), des surfaces et de la discrétisation de celles-ci en un nombre fini d'éléments appelés mailles.

d) Modèle mécanique

La définition du modèle mécanique entre dans le cadre de l'analyse statique suivant le schéma élastique en petites déformations, c'est-à-dire vérifiant dans un repère orthonormé les équations d'équilibre du milieu continu occupant le domaine D (fig. VIII.23) :

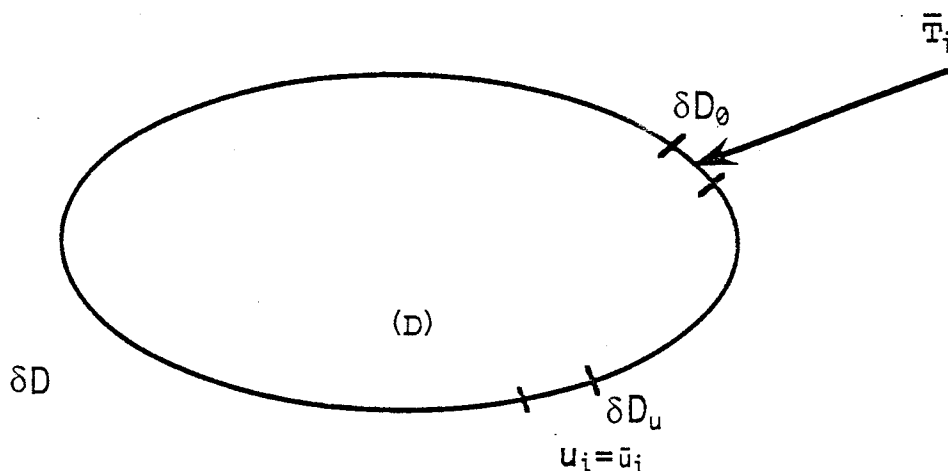


Fig. VIII.23 : Equilibre du domaine D

- 5.1  $\sigma_{ij,j} + f_i = 0$  dans D (équilibre de D)
- 5.2  $\epsilon_{ij} = 1/2 (u_{i,j} + u_{j,i})$  (relation déplacement-déformation)
- 5.3  $\sigma_{ij} = C_{ijhk} \epsilon_{hk}$  (loi de comportement)

A ces équations d'équilibre, on associe les conditions aux limites du type :

$$5.4 \quad \sigma_{ij} n_j = \bar{T}_i \text{ sur } \partial D_0$$

$$5.5 \quad u_i = \bar{U}_i \text{ sur } \partial D_u$$

Les équations 5.4 et 5.5 traduisent respectivement les composantes de contraintes et de déplacements imposées sur  $\partial D_0$  et  $\partial D_u$ . La mise en oeuvre du modèle mécanique consistera donc à affecter :

- les caractéristiques mécaniques (modules de Young et coefficients de Poisson) déduits de 5.3 aux mailles de la structure
- les chargements ( $T_i$ ) et les liaisons ( $u_i$ ) sur une ou plusieurs parties de  $\partial D$  afin que la modélisation mécanique soit une représentation la plus proche possible du problème physique réel.

### c) Résolution numérique

La résolution du problème par la méthode d'éléments finis conduit suivant la nature des hypothèses mécaniques faites, à la résolution d'un système linéaire du type :

$$5.6 \quad K_G u_G = F_G$$

$K_G$  : la matrice de rigidité globale de la structure, obtenue par assemblage des matrices de rigidité élémentaires

$F_G$  : vecteur des forces généralisées induites par le chargement  $T_i$

$u_G$  : vecteur de déplacements nodaux de toute la structure



Les résultats obtenus à l'issue de la résolution du système 5.6 sont :

- les déplacements aux noeuds
- les réactions aux noeuds à déplacement imposé
- les contraintes dans les mailles (par exploitation de la relation 5.3)

L'exploitation et le dépouillement des résultats permet par la suite d'étudier l'évolution de différentes composantes (contraintes, déplacements, isovaleurs...) en différents points (noeuds) et suivant des directions choisies.

#### VIII.4.1.3.1.- Maillage. Caractéristiques nominales de l'assemblage.

Compte tenu du mode de sollicitation du joint (cisaillement préférentiel) et des phénomènes de concentration de contrainte au voisinage des bords libres, un maillage fin et régulier a été effectué dans ces zones. Les données nominales géométriques et mécaniques de l'assemblage sont :

- substrats :  $E = 71300 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,33$ ,  $S = 5 \text{ mm}$   
Largeur = 10 mm
- adhésif :  $E_c = 1284 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,49$ ,  $S_c = 0,5 \text{ mm}$   
L = 88 mm

Le chargement et les conditions aux limites (fig. VIII.24) introduisent dans les substrats, en dehors de la zone de recouvrement une contrainte normale  $\sigma_0$  ( $\sigma_0 = 40 \text{ MPa}$ ). Les figures VIII.25 et VIII.26 montrent les éléments de maillage non déformés et déformés au voisinage du bord  $\bar{X} = - 1/2$ .

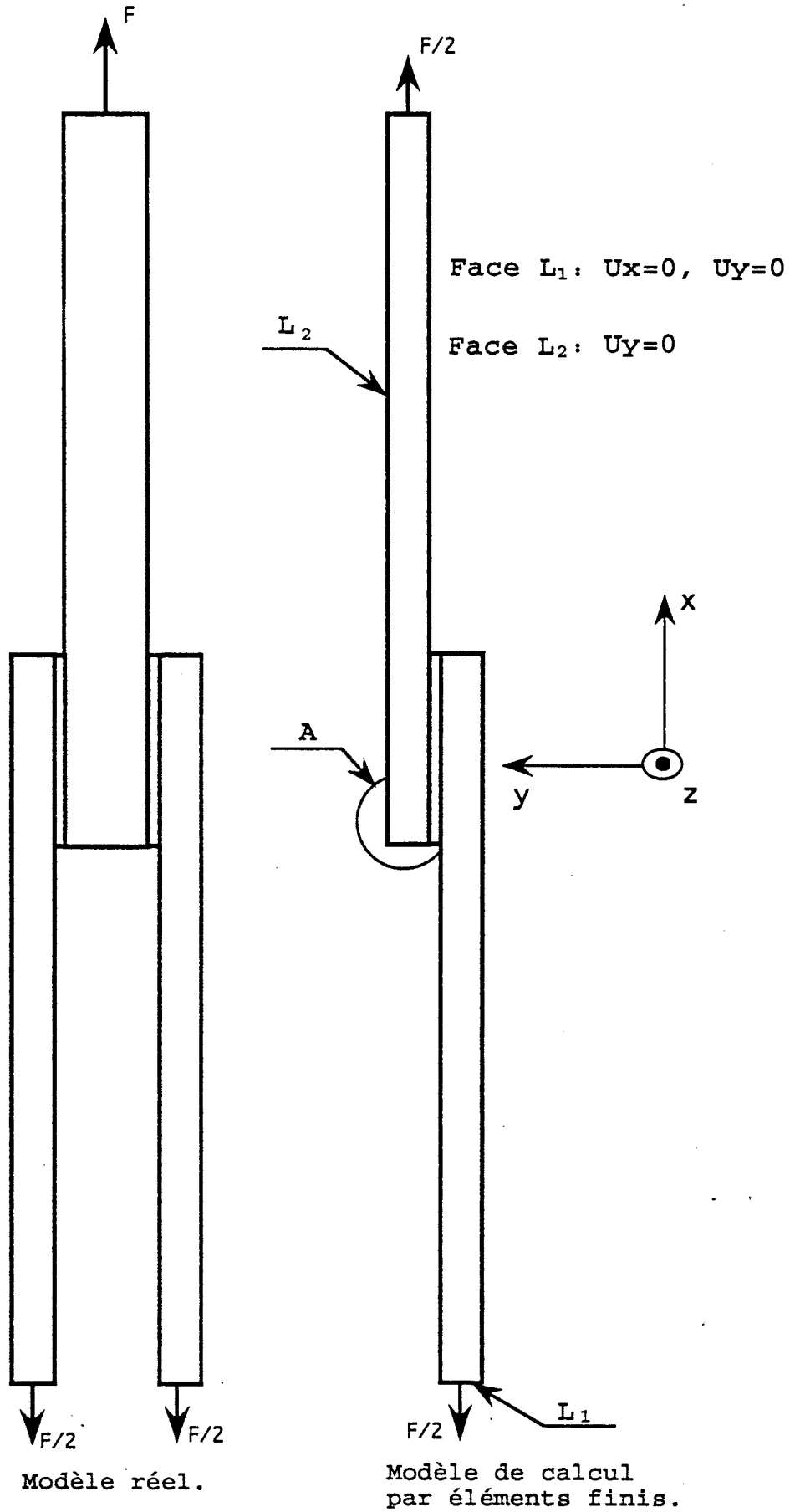


Fig. VIII.24 : Conditions aux limites et chargement.

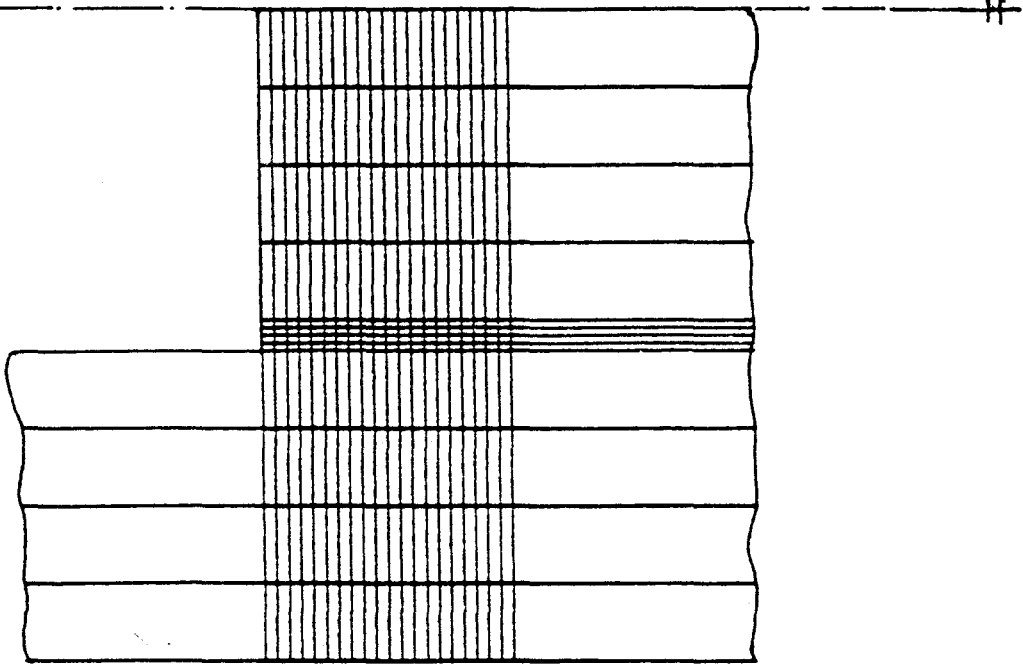


Figure VIII.25: Maillage non déformé. Echelle 0,123. Détail A

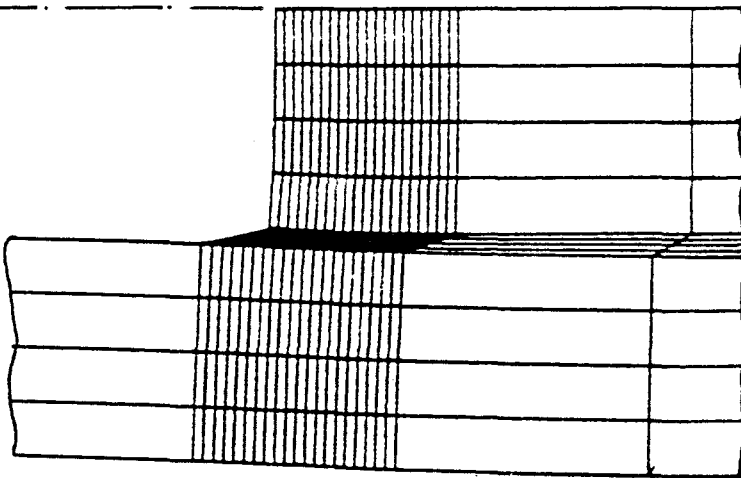


Figure VIII.26 : Maillage déformé. Echelle 0,172. Détail A

### VIII.4.2. - Comparaison des résultats numériques.

Pour les modèles théoriques précédemment cités, la figure VIII.27 montre l'évolution de la contrainte spécifique de cisaillement dans le plan moyen de la couche d'adhésif. L'évolution des contraintes maximales a été également déterminée suivant le modèle éléments finis et le modèle de VOLKERSEN (10). Les tableaux VIII.7 à VIII.9 montrent les variations de ces contraintes en fonction de  $L$ ,  $E_c$  et  $E$ . Les données géométriques et mécaniques fixées dans chaque cas sont:

1) Variation de la longueur de recouvrement  $L$ .

$$E = 71300 \text{ MPa}, E_c = 1284 \text{ MPa}, \nu = 0,33, \nu_c = 0,49,$$

$$S = 5 \text{ mm}, S_c = 0,5 \text{ mm}, b = 10 \text{ mm (largeur de l'assemblage)}$$

2) Variation du module de Young de l'adhésif  $E_c$ .

$$E = 210000 \text{ MPa}, \nu = 0,28, L = 88 \text{ mm}, S = 5 \text{ mm},$$

$$S_c = 0,5 \text{ mm}, b = 10 \text{ mm (largeur de l'assemblage)}$$

|             |       |      |      |      |
|-------------|-------|------|------|------|
| $E_c$ (MPa) | 1284  | 1800 | 2500 | 5000 |
| $G_c$ (MPa) | 430,8 | 625  | 892  | 1851 |

3) Variation du module de Young des substrats  $E$ .

$$E_c = 1284 \text{ MPa}, \nu_c = 0,49, S = 5 \text{ mm}, S_c = 0,45 \text{ mm},$$

$$L = 88 \text{ mm}, b = 10 \text{ mm}.$$

|           |       |        |        |        |
|-----------|-------|--------|--------|--------|
| $E$ (MPa) | 71300 | 130000 | 180000 | 210000 |
| $\nu$     | 0,33  | 0,3    | 0,29   | 0,28   |

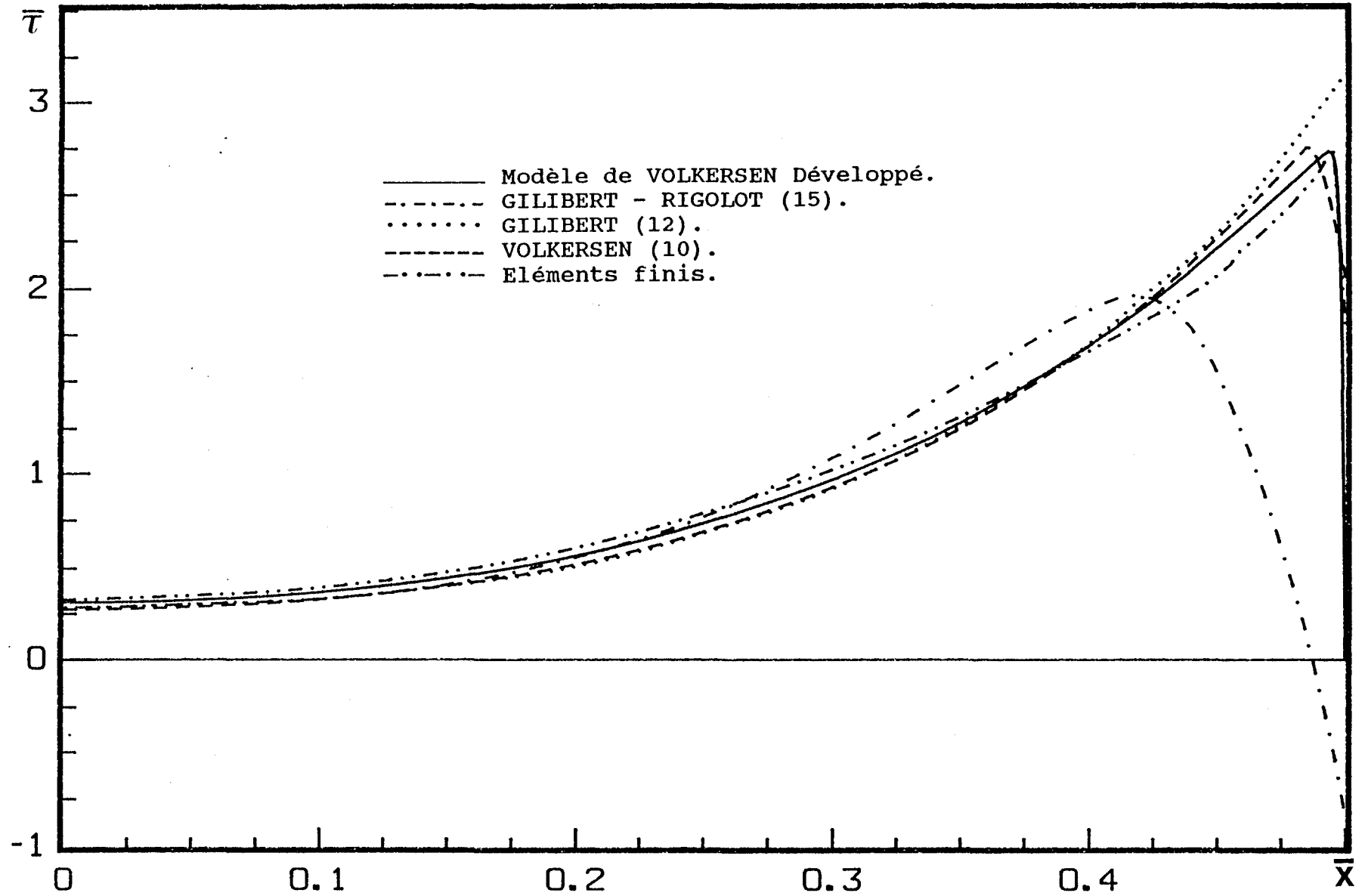


Fig. VIII.27 : Répartition de  $\bar{\tau}$  dans le recouvrement selon différents modèles.

|           |    |                  | Eléments finis | VOLKERSEN | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |
|-----------|----|------------------|----------------|-----------|------------------------|
| L<br>(mm) | 20 | $\bar{\tau}_M$   | 1,33           | 1,08      | 1,10                   |
|           |    | $\bar{\sigma}_M$ | 0,258          | 0,250     | 0,248                  |
|           | 30 | $\bar{\tau}_M$   | 1,23           | 1,18      | 1,23                   |
|           |    | $\bar{\sigma}_M$ | 0,168          | 0,173     | 0,160                  |
|           | 40 | $\bar{\tau}_M$   | 1,37           | 1,37      | 1,43                   |
|           |    | $\bar{\sigma}_M$ | 0,142          | 0,151     | 0,137                  |
|           | 88 | $\bar{\tau}_M$   | 2,78           | 2,80      | 2,75                   |
|           |    | $\bar{\sigma}_M$ | 0,114          | 0,131     | 0,121                  |

Tableau VIII.7 : Contraintes maximales en fonction de L.

|                |      |                  | Eléments finis | VOLKERSEN | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |
|----------------|------|------------------|----------------|-----------|------------------------|
| $E_c$<br>(MPa) | 1284 | $\bar{\tau}_M$   | 1,80           | 1,90      | 1,71                   |
|                |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,058          | 0,065     | 0,062                  |
|                | 1800 | $\bar{\tau}_M$   | 2,07           | 1,92      | 2,03                   |
|                |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,071          | 0,081     | 0,076                  |
|                | 2500 | $\bar{\tau}_M$   | 2,30           | 2,25      | 2,34                   |
|                |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,088          | 0,101     | 0,094                  |
|                | 5000 | $\bar{\tau}_M$   | 3,22           | 3,45      | 3,25                   |
|                |      | $\bar{\sigma}_M$ | 0,140          | 0,164     | 0,151                  |

Tableau VIII.8 : Contraintes maximales en fonction de  $E_c$ .

|            |        |                  | Eléments finis | VOLKERSEN | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |
|------------|--------|------------------|----------------|-----------|------------------------|
| E<br>(MPa) | 71300  | $\bar{\tau}_M$   | 2,78           | 2,8       | 2,75                   |
|            |        | $\bar{\sigma}_M$ | 0,114          | 0,131     | 0,121                  |
|            | 130000 | $\bar{\tau}_M$   | 2,17           | 2,01      | 2,12                   |
|            |        | $\bar{\sigma}_M$ | 0,078          | 0,088     | 0,082                  |
|            | 180000 | $\bar{\tau}_M$   | 1,91           | 1,78      | 1,86                   |
|            |        | $\bar{\sigma}_M$ | 0,064          | 0,071     | 0,067                  |
|            | 210000 | $\bar{\tau}_M$   | 1,80           | 1,69      | 1,76                   |
|            |        | $\bar{\sigma}_M$ | 0,058          | 0,065     | 0,062                  |

Tableau VIII.9 : Contraintes maximales en fonction de E.

Les résultats numériques consignés dans les tableaux VIII.7 à VIII.9 ont permis de mettre en évidence les variations des contraintes maximales spécifiques en fonction de L,  $E_c$ , et E. D'une manière générale nos résultats numériques demeurent sensiblement identiques à ceux obtenus suivant la démarche de VOLKERSEN et suivant celle des éléments finis.

Une étude graphique portant sur les variations des contraintes maximales de cisaillement et de décollement ( $\bar{\tau}_M$  et  $\bar{\sigma}_M$ ) a été effectuée. Les paramètres géométriques et mécaniques pris en compte pour le calcul des contraintes sont similaires à ceux des tableaux VIII.7, VIII.8 et VIII.9. **Les courbes représentatives des contraintes ont toutes été tracées en fonction des grandeurs spécifiques L/S, E/E<sub>0</sub> et E<sub>c</sub>/E<sub>0</sub>.** Dans le cas du substrat, la valeur de E<sub>0</sub> a été fixée à 210000 MPa alors que celle de l'adhésif est de 5000 MPa.

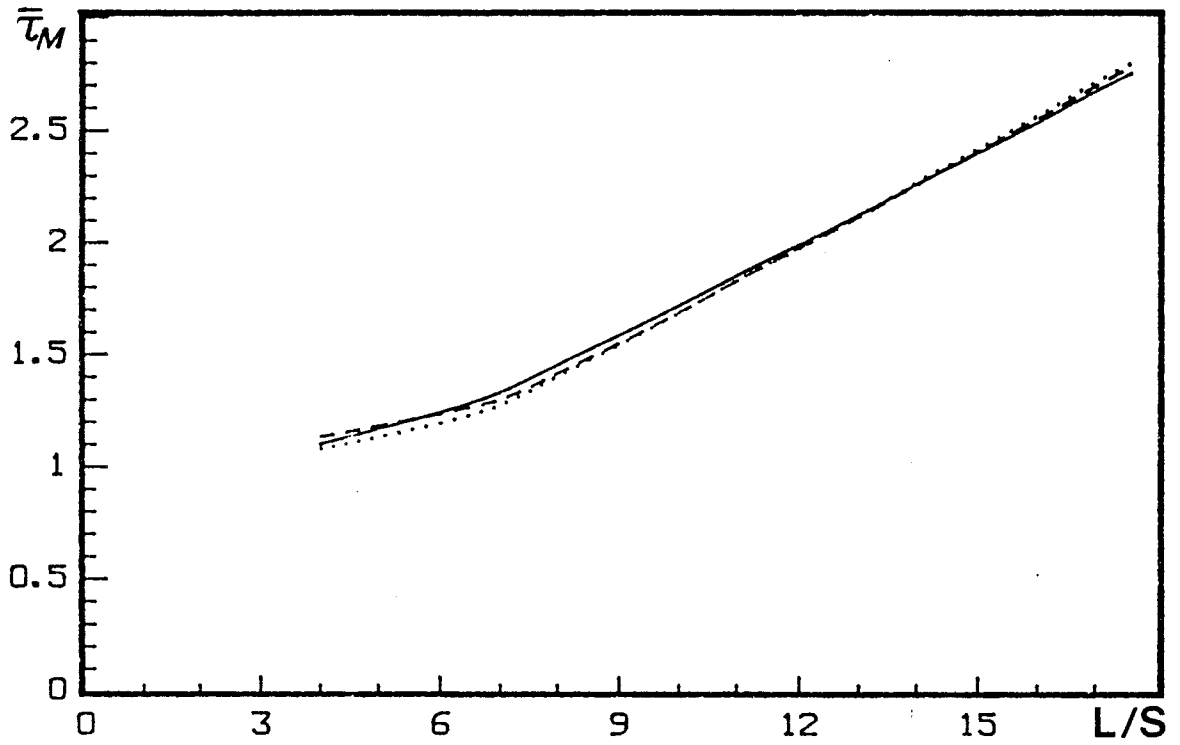


fig VIII.28a :  $\bar{\tau}_M$  en fonction de L/S

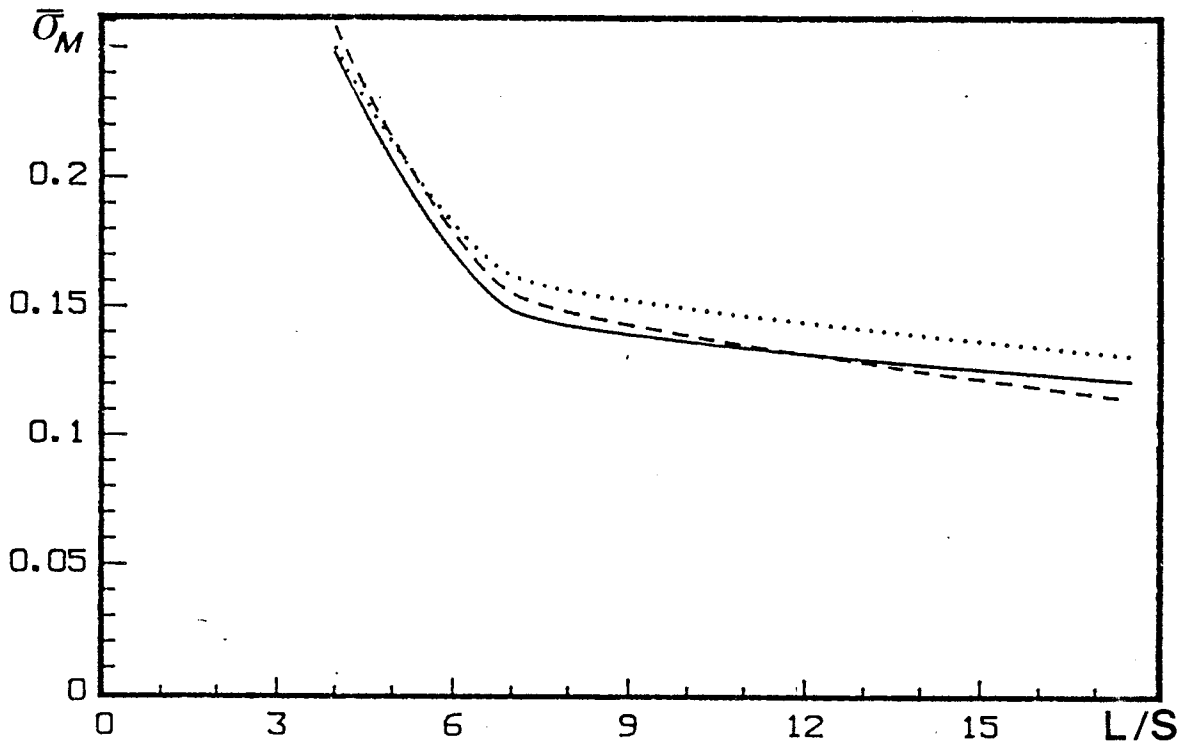


fig VIII.28b :  $\bar{\sigma}_M$  en fonction de L/S

fig.VIII.28: contraintes maximales en fonction de L/S

——— VOLKERSEN développé.  
 - - - - - Eléments finis  
 ..... VOLKERSEN.

S = 5 mm



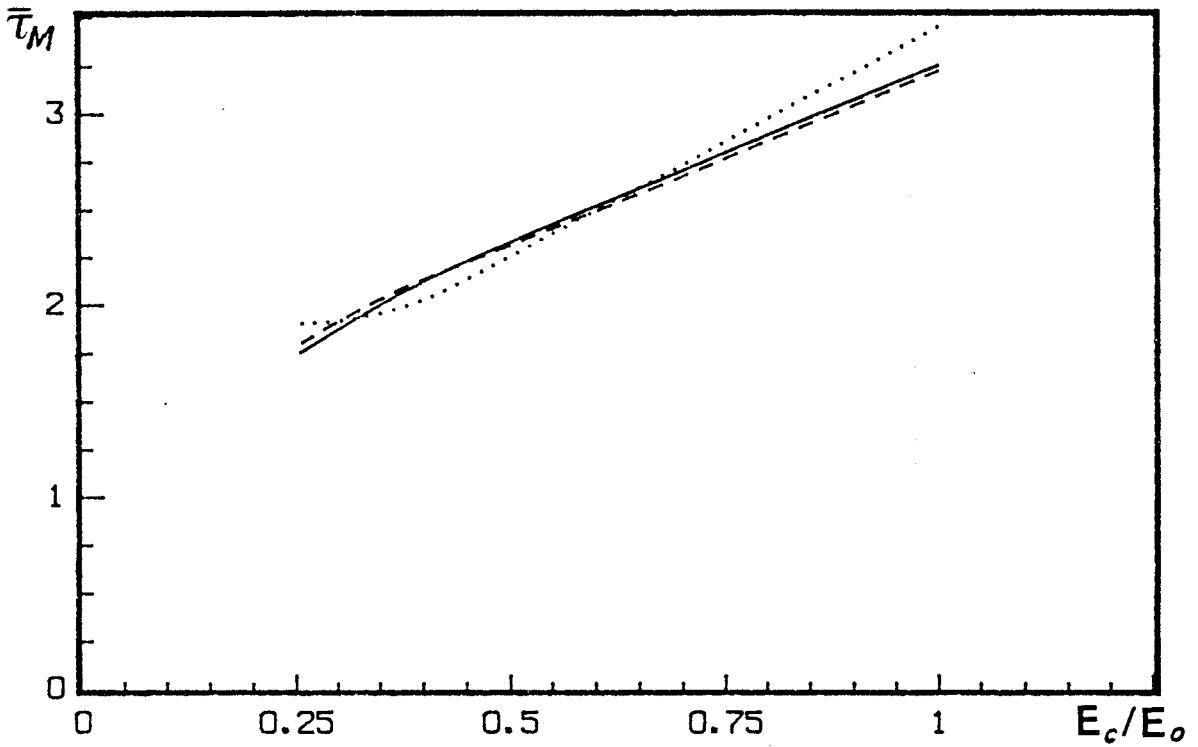


fig VIII.29a :  $\bar{\tau}_M$  en fonction de  $E_c/E_o$

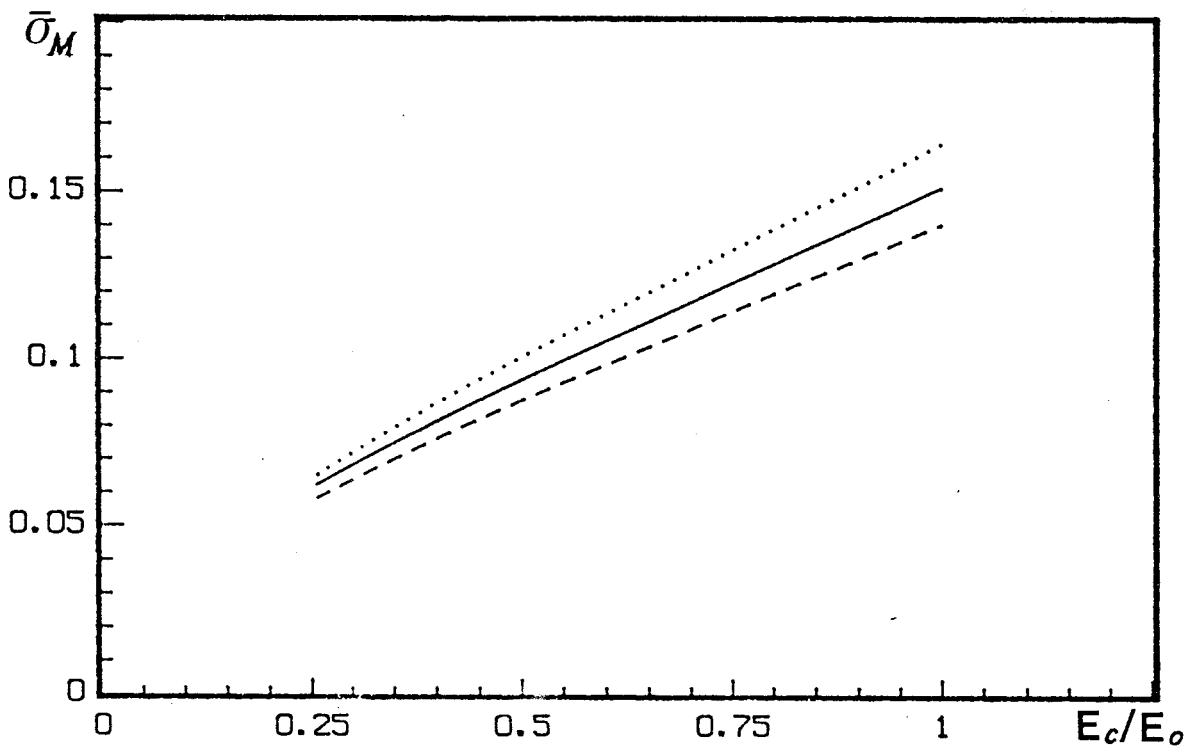


fig VIII.29.b :  $\bar{\sigma}_M$  en fonction de  $E_c/E_o$

fig.VIII.29: contraintes maximales en fonction de  $E_c/E_o$

$E_o = 5000$  MPa

— VOLKERSEN Développé  
 - - - - - Eléments finis  
 ..... VOLKERSEN.

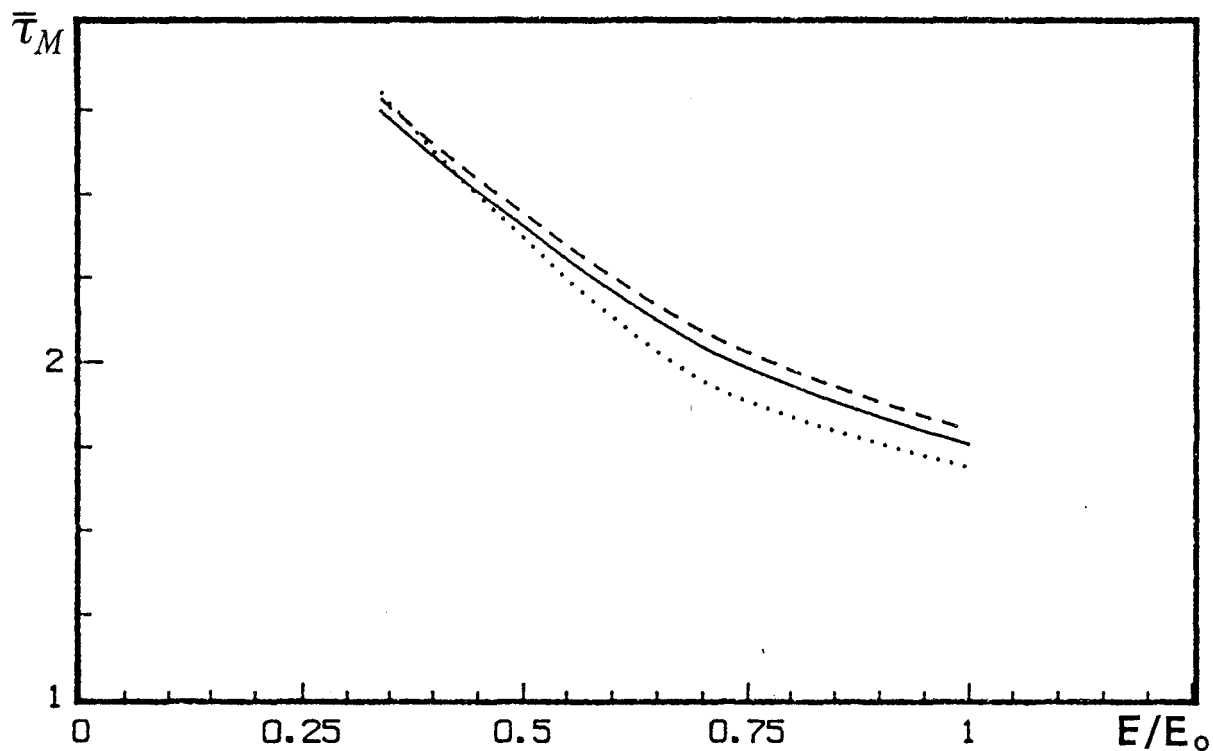
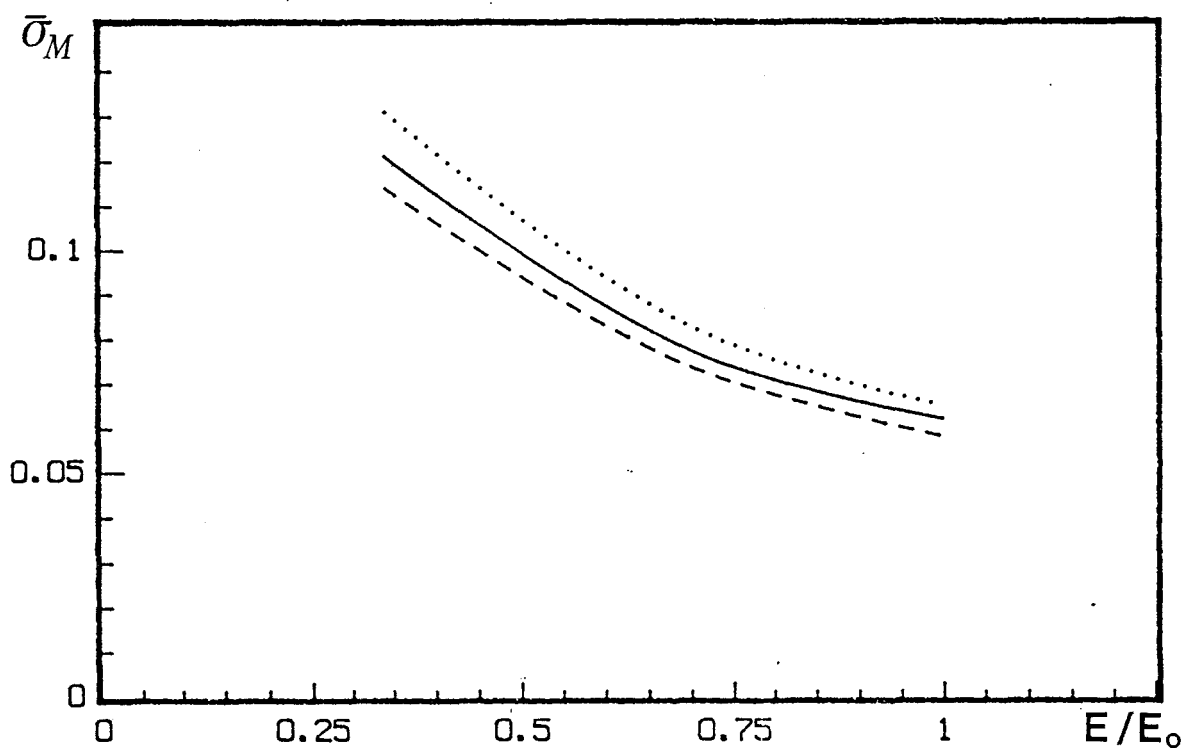
fig VIII.30a :  $\bar{\tau}_M$  en fonction de  $E/E_0$ .fig VIII.30.b :  $\bar{\sigma}_M$  en fonction de  $E/E_0$ .

fig.VIII.30: contraintes maximales en fonction de  $E/E_0$

|       |                     |
|-------|---------------------|
| ——    | VOLKERSEN développé |
| ----- | Eléments finis      |
| ..... | VOLKERSEN.          |

$E_0 = 210000$  MPa

Les allures des courbes révèlent essentiellement, pour les trois modèles étudiés, le même comportement mécanique en ce qui concerne le profil des contraintes maximales de cisaillement et de décollement. Toutefois, la coïncidence entre les trois modèles demeure satisfaisante.

**VIII.5. - Evaluation des contraintes maximales  $\bar{\tau}_M$ , des contraintes  $\bar{\tau}(1/2)$  au bord  $\bar{X} = 1/2$ , de l'abscisse  $\bar{X}_M$  et comparaison avec les résultats théoriques de VOLKERSEN(10)**

Pour différentes valeurs de la longueur  $L$  de recouvrement ainsi que pour des valeurs particulières de  $E$ ,  $E_c$ , de  $S_c$  et de  $S$ , nous calculons :

- les contraintes maximales induites dans le joint :  $\bar{\tau}_M$ .
- leurs abscisses associées :  $\bar{X}_M$ .
- les valeurs des contraintes sur le bord non chargé :  $\bar{\tau}(1/2)$ .

Les données géométriques et mécaniques prises en compte dans les calculs numériques sont :

- a)  $E/E_c = 15$ ,  $E = 70000$  MPa,  $G_c = 1728$  MPa.
- b)  $E/E_c = 25$ ,  $E = 70000$  MPa,  $G_c = 1000$  MPa.
- c)  $E/E_c = 100$ ,  $E = 210000$  MPa,  $G_c = 750$  MPa.
- d)  $E/E_c = 210$ ,  $E = 210000$  MPa,  $G_c = 344$  MPa.

Les tableaux VIII.10 à VIII.21 donnent une évaluation numérique de  $\bar{\tau}_M$ ,  $\bar{X}_M$  et  $\bar{\tau}(1/2)$  en fonction de la longueur de recouvrement et pour certaines valeurs particulières de  $E/E_c$ ,  $S_c$ , et  $S$ .

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$      | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,02           | 0           | 0,16              | 1,04                | 0           | 0,2                                |
|           | 20 | 1,05           | 0,4775      | 0,12              | 1,06                | 0,475       | 0,4                                |
|           | 30 | 1,10           | 0,4825      | -0,04             | 1,12                | 0,485       | 0,5                                |
|           | 40 | 1,17           | 0,4875      | -0,06             | 1,19                | 0,4875      | 0,7                                |
|           | 50 | 1,39           | 0,49        | -0,21             | 1,39                | 0,49        | 1                                  |

Tableau VIII.10 :  $E/E_c = 210$ ,  $S_c = 0,5$  mm,  $S = 5$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$      | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,05           | 0,465       | 0,26              | 1,06                | 0,4626      | 0,2                                |
|           | 20 | 1,11           | 0,4775      | 0,05              | 1,14                | 0,4775      | 0,4                                |
|           | 30 | 1,21           | 0,485       | -0,13             | 1,26                | 0,485       | 0,5                                |
|           | 40 | 1,38           | 0,4875      | -0,07             | 1,41                | 0,4875      | 0,8                                |
|           | 50 | 1,74           | 0,49        | -0,42             | 1,79                | 0,4925      | 1,3                                |

Tableau VIII.11 :  $E/E_c = 100$ ,  $S_c = 0,5$  mm,  $S = 5$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|------------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$         | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,16           | 0,4725      | 0,26              | 1,22                   | 0,4725      | 0,3                                |
|           | 20 | 1,40           | 0,48        | -0,24             | 1,52                   | 0,4825      | 0,5                                |
|           | 30 | 1,91           | 0,4875      | -0,16             | 1,90                   | 0,4875      | 0,8                                |
|           | 40 | 2,12           | 0,49        | -0,24             | 2,32                   | 0,49        | 1,2                                |
|           | 50 | 3,25           | 0,4925      | 1,3               | 3,22                   | 0,4925      | 2,5                                |

Tableau VIII.12 :  $E/E_c = 25$ ,  $S_c = 0,5$  mm,  $S = 5$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|------------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$         | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,23           | 0,4725      | 0                 | 1,37                   | 0,4750      | 0,3                                |
|           | 20 | 1,75           | 0,4825      | -0,11             | 1,83                   | 0,4825      | 0,6                                |
|           | 30 | 2,28           | 0,4875      | -0,2              | 2,36                   | 0,4875      | 1                                  |
|           | 40 | 2,29           | 0,4925      | -0,04             | 2,93                   | 0,49        | 1,6                                |
|           | 50 | 3,53           | 0,4925      | 1,06              | 4,10                   | 0,4925      | 3                                  |

Tableau VIII.13 :  $E/E_c = 15$ ,  $S_c = 0,5$  mm,  $S = 5$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$      | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,40           | 0,4775      | -0,42             | 1,58                | 0,48        | 0,43                               |
|           | 20 | 2,29           | 0,49        | -0,40             | 2,93                | 0,49        | 1,6                                |
|           | 30 | 3,28           | 0,4925      | -1,01             | 4,37                | 0,4925      | 3,6                                |
|           | 40 | 4,400          | 0,495       | -0,01             | 5,84                | 0,495       | 6,4                                |
|           | 50 | 5,66           | 0,495       | 0,65              | 7,26                | 0,495       | 10                                 |

Tableau VIII.14 :  $E/E_c = 15$ ,  $S_c = 0,2$  mm,  $S = 2$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$      | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,04           | 0,47        | 0,16              | 1,05                | 0,47        | 0,3                                |
|           | 20 | 1,17           | 0,4875      | -0,06             | 1,19                | 0,4875      | 0,7                                |
|           | 30 | 1,45           | 0,49        | -0,45             | 1,45                | 0,4925      | 1,2                                |
|           | 40 | 1,72           | 0,4925      | 0,14              | 1,78                | 0,4925      | 2                                  |
|           | 50 | 3,46           | 0,5         | 3,46              | 2,16                | 0,495       | 3                                  |

Tableau VIII.15 :  $E/E_c = 210$ ,  $S_c = 0,2$  mm,  $S = 2$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|------------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$         | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,71           | 0,48        | -0,02             | 1,78                   | 0,48        | 0,5                                |
|           | 20 | 3,46           | 0,4925      | 1,41              | 3,40                   | 0,49        | 1,8                                |
|           | 30 | 4,88           | 0,4925      | -2,44             | 5,07                   | 0,4925      | 4,2                                |
|           | 40 | 5,68           | 0,495       | 2,32              | 6,78                   | 0,495       | 7,5                                |
|           | 50 | 6,31           | 0,495       | 1,64              | 8,40                   | 0,495       | 11                                 |

Tableau VIII.16 :  $E/E_c = 15$ ,  $S_c = 0,2$  mm,  $S = 1,5$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|------------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$         | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,05           | 0,4725      | 0,08              | 1,06                   | 0,4725      | 0,3                                |
|           | 20 | 1,25           | 0,4875      | 0,07              | 1,27                   | 0,4875      | 0,7                                |
|           | 30 | 1,57           | 0,4925      | 0,37              | 1,60                   | 0,4925      | 1,3                                |
|           | 40 | 2,50           | 0,5         | 2,50              | 2,01                   | 0,495       | 2,2                                |
|           | 50 | 2,40           | 0,4975      | 1,99              | 2,47                   | 0,495       | 3,5                                |

Tableau VIII.17 :  $E/E_c = 210$ ,  $S_c = 0,2$  mm,  $S = 1,5$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|---------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$      | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,98           | 0,48        | -0,39             | 2,12                | 0,48        | 0,5                                |
|           | 20 | 3,84           | 0,4925      | -0,90             | 4,17                | 0,49        | 2,5                                |
|           | 30 | 5,08           | 0,4925      | -2,44             | 6,23                | 0,495       | 5,2                                |
|           | 40 | 26,15          | 0,5         | 26,15             | 8,34                | 0,495       | 9,3                                |
|           | 50 | 12,31          | 0,5         | 12,31             | 10,29               | 0,495       | 14                                 |

Tableau VIII.18 :  $E/E_c = 15$ ,  $S_c = 0,2$  mm,  $S = 1$  mm.

|           |    | VOLKERSEN         |             |                    | VOLKERSEN DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|-------------------|-------------|--------------------|---------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$    | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$  | $\bar{\tau}_M$      | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,47              | 0,4425      | $-29 \cdot 10^3$   | 1,09                | 0,475       | 0,3                                |
|           | 20 | $8 \cdot 10^8$    | 0,5         | $8 \cdot 10^8$     | 1,41                | 0,4875      | 0,7                                |
|           | 30 | $1 \cdot 10^{13}$ | 0,5         | $1 \cdot 10^{13}$  | 1,88                | 0,4925      | 1,5                                |
|           | 40 | 2,08              | 0,455       | $-7 \cdot 10^{17}$ | 2,43                | 0,495       | 2,7                                |
|           | 50 | $6 \cdot 10^{21}$ | 0,5         | $6 \cdot 10^{21}$  | 3,01                | 0,495       | 4,1                                |

Tableau VIII.19 :  $E/E_c = 210$ ,  $S_c = 0,2$  mm,  $S = 1$  mm.



|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|------------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$         | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 2,00           | 0,4825      | -0,04             | 2,35                   | 0,48        | 0,6                                |
|           | 20 | 3,94           | 0,4925      | 1,11              | 4,66                   | 0,49        | 2,6                                |
|           | 30 | 6,11           | 0,4925      | -18,16            | 6,98                   | 0,495       | 5,8                                |
|           | 40 | 8,38           | 0,4925      | -161,14           | 9,32                   | 0,495       | 10                                 |
|           | 50 | 10,40          | 0,4925      | -516,8            | 11,48                  | 0,495       | 16                                 |

Tableau VIII.20 :  $E/E_c = 15$ ,  $S_c = 0,2$  mm,  $S = 0,8$  mm.

|           |    | VOLKERSEN      |             |                   | VOLKERSEN<br>DEVELOPPE |             |                                    |
|-----------|----|----------------|-------------|-------------------|------------------------|-------------|------------------------------------|
|           |    | $\bar{\tau}_M$ | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$ | $\bar{\tau}_M$         | $\bar{X}_M$ | $\bar{\tau}(1/2)$<br>( $10^{-5}$ ) |
| L<br>(mm) | 10 | 1,10           | 0,475       | -0,06             | 1,12                   | 0,4750      | 0,3                                |
|           | 20 | 1,48           | 0,49        | -0,33             | 1,51                   | 0,4875      | 0,8                                |
|           | 30 | 2,00           | 0,49        | -5,18             | 2,7                    | 0,4925      | 1,7                                |
|           | 40 | 53,3           | 0,5         | 53,3              | 2,70                   | 0,495       | 3                                  |
|           | 50 | 3,15           | 0,49        | -485              | 3,36                   | 0,495       | 4,6                                |

Tableau VIII.21 :  $E/E_c = 210$ ,  $S_c = 0,2$  mm,  $S = 0,8$  mm.

Les différents résultats numériques obtenus nous ont permis d'évaluer, en fonction des caractéristiques mécaniques et géométriques de l'adhésif et du substrat:

- l'intensité des contraintes de cisaillement maximales.
- l'abscisse  $\bar{X}_M$  de  $\bar{\tau}_M$ .
- la nature des contraintes  $\bar{\tau}_M$  au bord libre  $\bar{X}=1/2$ .

D'une manière générale, au bord libre  $\bar{X}=1/2$  du recouvrement, les calculs effectués montrent très clairement que la méthode de résolution préconisée assure des conditions aux limites satisfaisantes. En effet, les intensités des contraintes de cisaillement  $\bar{\tau}(1/2)$  sont très fortement réduites ( de l'ordre de  $10^{-5}$  ) par rapport à celles déterminées suivant la démarche de VOLKERSEN (10). Contrairement au modèle de VOLKERSEN (10), nous ne constatons aucune singularité de contrainte.

Le tableau VIII.10 montre que, pour certaines valeurs particulières de la longueur de recouvrement, le point  $\bar{X}_M$  se situe au centre du recouvrement. Dans ce cas, la contrainte maximale de cisaillement se trouve localisée au milieu (  $\bar{X}=0$  ) de la longueur de recouvrement. Le joint d'adhésif est alors soumis à des sollicitations de décollement préférentiel.

Une étude numérique plus fine portant sur les variations de  $\bar{X}_M$  en fonction de la géométrie du joint a été menée. Il s'agit, pour le rapport  $E/E_c$ , fixé de rechercher:

- a) A épaisseur  $S_c$  de joint constante, la valeur de la longueur de recouvrement telle que  $\bar{X}_M=0$ .
- b) Pour une longueur de recouvrement fixée, l'épaisseur  $S_c$  de la couche d'adhésif qui annule  $\bar{X}_M$ .

Le calcul des valeurs de  $\bar{X}_M$  (cf tableau VIII.23 ) en fonction de  $S_c$  et  $L$  a été effectué en tenant compte des données nominales consignées dans le tableau VIII.2. Les courbes représentées par les figures VIII.31 et VIII.32 indiquent les variations de  $\bar{X}_M$  en fonction des grandeurs spécifiques  $S_c/S$  et  $L/S$ .  $S$  est dans ces cas une donnée constante.

|                |      | L : Longueur de recouvrement. (mm) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|----------------|------|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
|                |      | 10,7                               | 10,8   | 15     | 17,25  | 20     | 30     | 40     | 50     | 60     | 70     | 80     | 90     | 100    | 110    |
| E              | 15   | 0                                  | 0,4408 | 0,465  | 0,4730 | 0,4743 | 0,4833 | 0,4878 | 0,4905 | 0,4923 | 0,4932 | 0,4941 | 0,495  | 0,495  | 0,4959 |
| E <sub>c</sub> | 55.5 | 0                                  | 0      | 0,4512 | 0,4630 | 0,468  | 0,4806 | 0,486  | 0,4887 | 0,4914 | 0,4923 | 0,4932 | 0,4941 | 0,495  | 0,495  |
|                | 100  | 0                                  | 0      | 0      | 0,4536 | 0,4635 | 0,4788 | 0,4851 | 0,4878 | 0,4905 | 0,4914 | 0,4932 | 0,4932 | 0,4941 | 0,495  |

Tableau VIII.23a :  $\bar{\chi}_M$  en fonction de L.  $S_c = 0,5$  mm. Paramètres: E/E<sub>c</sub>

|                |      | S <sub>c</sub> : Epaisseur du film d'adhésif. (mm) |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |     |
|----------------|------|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----|
|                |      | 0,1  | 0,12   | 0,14   | 0,16   | 0,2    | 0,25   | 0,3    | 0,35   | 0,4    | 0,45   | 0,5    | 0,55   | 0,75   | 1      | 1,5    | 2      | 2,5    | 2,6 |
| E              | 15   | 0,4941   | 0,4932 | 0,4923 | 0,4914 | 0,4896 | 0,4869 | 0,4842 | 0,4815 | 0,4897 | 0,477  | 0,4743 | 0,4716 | 0,463  | 0,4488 | 0,4216 | 0,3912 | 0,3576 | 0   |
| E <sub>c</sub> | 55.5 | 0,4932   | 0,4923 | 0,4914 | 0,4896 | 0,4878 | 0,4842 | 0,4815 | 0,4779 | 0,4752 | 0,4716 | 0,468  | 0,4658 | 0,451  | 0,432  | 0      | 0      | 0      | 0   |
|                | 100  | 0,4932   | 0,4914 | 0,4905 | 0,4887 | 0,486  | 0,4825 | 0,4788 | 0,4752 | 0,4716 | 0,468  | 0,4635 | 0,4592 | 0,4424 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0   |

Tableau VIII.23b :  $\bar{\chi}_M$  en fonction de S<sub>c</sub>. L = 20 mm. Paramètres: E/E<sub>c</sub>

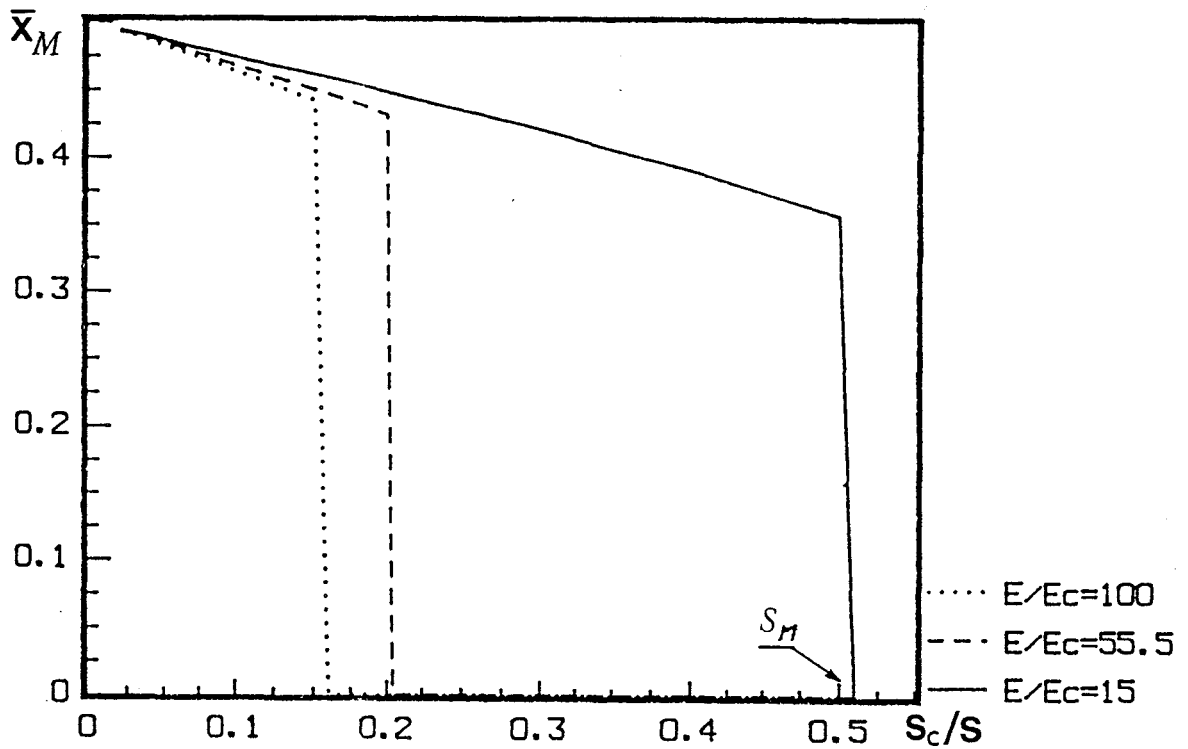


Fig. VIII.31a : Variation de  $\bar{X}_M$  en fonction de  $S_c/S$ .  $S = 5$  mm,  $L = 20$  mm.

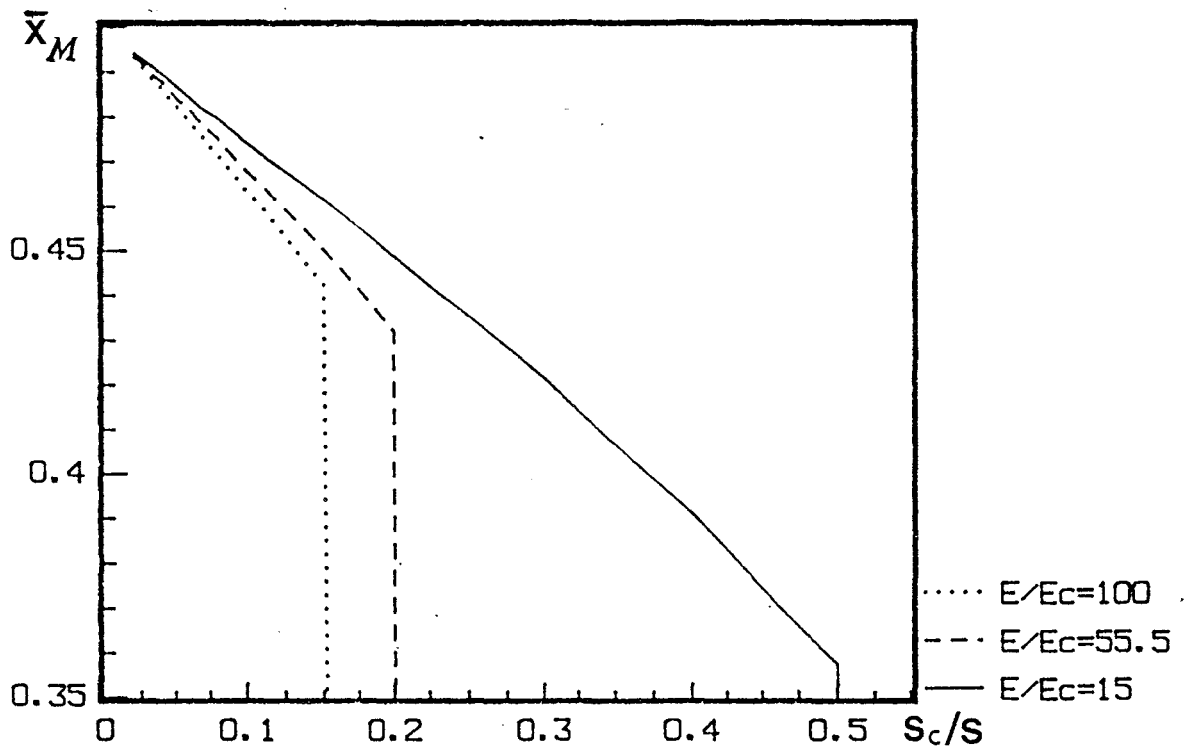


Fig. VIII.31b : Détail de la figure VIII.31a.

Fig VIII.31 : Variation de  $\bar{X}_M$  en fonction de  $S_c$ .

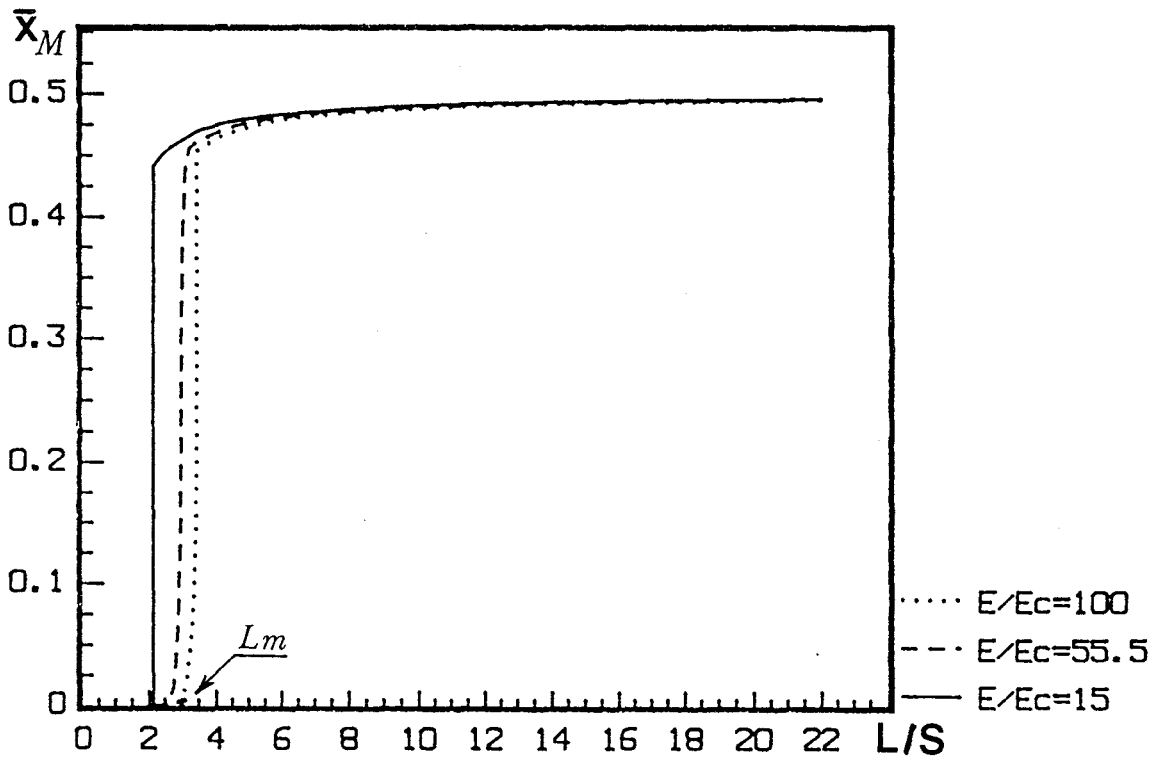


Fig. VIII.32a : Variation de  $\bar{X}_M$  en fonction de  $L/S$ ,  $S = 5$  mm,  $S_c = 0,5$  mm.

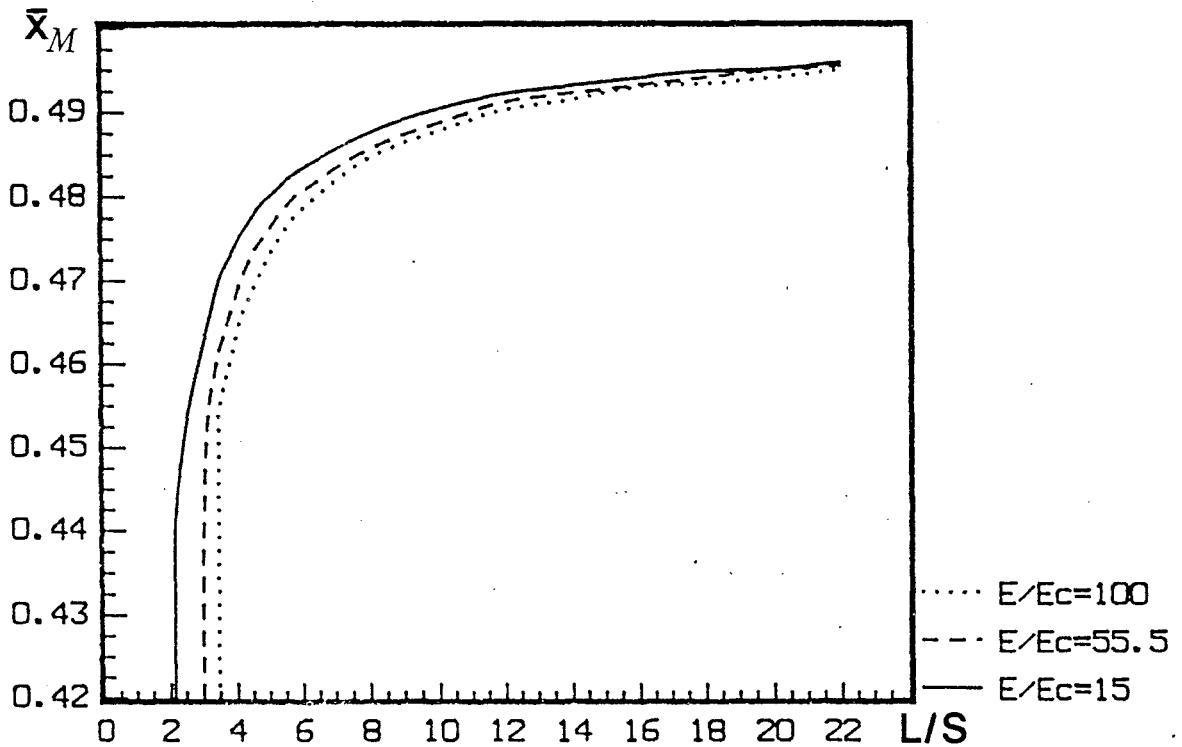


Fig.VIII.32b : Détail de la figure VIII.32a.

### VIII.6. - CONCLUSION

Les résultats numériques obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres spécifiques géométriques ( $S_c/S$ ,  $L/S$ ) et mécaniques ( $E/E_c$ ) sur la distribution des contraintes dans la couche d'adhésif. Un certain nombre d'observations peuvent ainsi être faites sur :

- La répartition des contraintes.
- Localisation des contraintes maximales ( $\bar{X}_M$ )
- Contraintes maximales induites dans le joint.
- Les conditions aux limites.

#### a) Répartition des contraintes dans le joint.

L'intérêt des figures VIII.1 à VIII.4 est de mettre en évidence deux mécanismes qui conditionnent l'entrée du joint d'adhésif dans le domaine non linéaire. Ce sont :

- Le cisaillement du joint au voisinage de l'extrémité libre du recouvrement.
- Le décollement à l'extrémité libre  $\bar{X} = 1/2$ .

Les courbes théoriques, représentées par la figure VIII.27 montrent très clairement que, dans la partie médiane du recouvrement ( $|\bar{X}| < 0,3$ ), les différents résultats théoriques coïncident assez bien. Cependant, les comportements mécaniques des différents modèles diffèrent au voisinage du bord libre.

#### b) Abcisses des contraintes maximales.

Dans le proche voisinage de l'extrémité libre du joint d'adhésif, la contrainte de cisaillement passe par un extrémum (maxima) avant de décroître pour s'annuler en  $\bar{X} = 1/2$  alors que la contrainte de décollement croît et atteint sa valeur maximale en ce même point. Les calculs numériques effectués, basés sur le modèle théorique de VOLKERSEN (10) que nous avons développé ont permis de montrer l'influence des caractéristiques géométriques et mécaniques de l'assemblage sur la variation de  $\bar{X}_M$ . Nous avons ainsi mis en évidence (tableaux

VIII.22, VIII.23 et figures VIII.31, VIII.32) l'existence d'une longueur minimale  $L_m$  et d'une épaisseur de film maximale  $S_m$  pour lesquelles la contrainte de cisaillement maximale se trouve localisée au centre ( $\bar{X} = 0$ ) du recouvrement. Dans ce cas, l'assemblage passe alors du mode sollicitation mixte "cisaillement-décollement" au mode de "décollement préférentiel". Nous retrouvons ici un type de comportement mis en évidence par GILIBERT (12) dans ses travaux sur les assemblages collés à double recouvrement. En effet, il a montré, à partir de son modèle expérimental, qu'il existait une épaisseur maximale au delà de laquelle l'assemblage était caractérisé par une plus grande fragilité. Pour des données géométriques et mécaniques des substrats (constantes), l'abscisse  $\bar{X}_m$  se déplace vers l'extrémité libre  $\bar{X} = 1/2$  lorsque la longueur de recouvrement croît. Le même phénomène est observé lorsque l'épaisseur de la couche d'adhésif diminue. Les coefficients de concentration des contraintes de cisaillement croissent et se trouvent localisés dans le proche voisinage du bord libre. Lorsque la longueur de recouvrement devient de plus en plus grande, les variations des points  $\bar{X}_m$  deviennent très petites. Leurs valeurs demeurent toutefois inférieures à 0,5. C'est ce qui explique l'abaissement de la résistance à la rupture constaté expérimentalement lors de l'augmentation de la longueur de recouvrement des assemblages collés.

c) Contraintes maximales induites dans le joint.

Les facteurs de concentration de contrainte obtenus selon le modèle de VOLKERSEN (10) que nous avons développé ont été comparés avec les résultats théoriques de VOLKERSEN (10) et ceux issus des calculs par éléments finis. Les tableaux VIII.7, VIII.8, VIII.9 et les figures VIII.28 à VIII.29 donnent pour chaque modèle théorique les variations de  $\bar{\tau}_m$  et  $\bar{\sigma}_m$  en fonction de  $L$ ,  $E_c$  et  $E$ . Les résultats contenus dans le tableau VIII.24, calculés à partir des valeurs issues des tableaux VIII.7 à VIII.9, donnent dans l'ensemble, une bonne comparaison entre notre méthode et la démarche de VOLKERSEN (10). Une bonne

coïncidence existe également entre nos résultats et ceux obtenus par éléments finis.

|                |        | $M^*$                       |                                 | $V^*$                       |                                 |
|----------------|--------|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|
|                |        | $\bar{\tau}_M/\bar{\tau}_E$ | $\bar{\sigma}_M/\bar{\sigma}_E$ | $\bar{\tau}_M/\bar{\tau}_E$ | $\bar{\sigma}_M/\bar{\sigma}_E$ |
| L<br>(mm)      | 20     | 0,83                        | 0,96                            | 0,81                        | 0,97                            |
|                | 30     | 1                           | 0,95                            | 0,96                        | 1,03                            |
|                | 40     | 1,04                        | 0,96                            | 1                           | 1,07                            |
|                | 88     | 0,99                        | 1,06                            | 1                           | 1,15                            |
| $E_c$<br>(MPa) | 1284   | 0,95                        | 1,06                            | 1,05                        | 1,12                            |
|                | 1800   | 0,98                        | 1,07                            | 0,92                        | 1,14                            |
|                | 2500   | 1,01                        | 1,06                            | 0,97                        | 1,14                            |
|                | 5000   | 1                           | 1,07                            | 1,07                        | 1,17                            |
| E<br>(MPa)     | 71300  | 0,99                        | 1,06                            | 1                           | 1,15                            |
|                | 130000 | 0,97                        | 1,05                            | 0,92                        | 1,12                            |
|                | 180000 | 0,97                        | 1,04                            | 0,93                        | 1,10                            |
|                | 210000 | 0,97                        | 1,06                            | 0,93                        | 1,12                            |

Tableau VIII.24

- $M^*$  : modèle de VOLKERSEN développé.
- $V^*$  : modèle de VOLKERSEN (10)
- $\bar{\tau}_E, \bar{\sigma}_E$  : contraintes maximales obtenues par E.F.

#### d) Conditions aux limites

Cette partie constitue à notre sens l'amélioration la plus importante apportée au modèle de VOLKERSEN (10). La technique de résolution d'équations différentielles à coefficients constants nous a permis de répondre simplement à une exigence primordiale : la prise en compte des conditions aux limites sur



les bords libres. Les tableaux VIII.10 à VIII.21 montrent très clairement en fonction de quelques caractéristiques géométriques et mécaniques de l'assemblage l'abaissement notable du niveau des contraintes de cisaillement au bord libre  $\bar{X} = 1/2$ .

CONCLUSION GENERALE

Le comportement mécanique à la rupture par cisaillement de joints d'adhésif sur des assemblages symétriques à double recouvrement constitue un problème complexe à cause du nombre important de paramètres à maîtriser et de la recherche constante de la simplicité de mise en oeuvre. En effet, sur la difficulté d'assurer avec une grande précision la reproductibilité géométrique des états de surface, vient se greffer l'impossibilité d'effectuer des mesures directes de déformation sur le film de colle.

Les différentes procédures d'usinage et les traitements thermiques effectués, bien que très longs ont cependant contribué de manière évidente à l'obtention de substrats identiques tant du point de vue géométrique que dimensionnel.

L'élaboration d'éprouvettes géométriquement reproductibles a été rendue possible grâce à deux montages spécialement conçus à cet effet. Ces montages de par leur conception permettent également d'exercer, par l'intermédiaire des couvre-joints extérieurs, une pression constante sur les films de colle.

L'étude expérimentale, réalisée sur les assemblages symétriques à double recouvrement a permis de générer des contraintes de cisaillement dans le joint par traction sur les substrats. Nous avons pu, grâce à une méthodologie expérimentale bien adaptée, minimiser l'influence des efforts parasites de flexion sur les couvre-joints extérieurs.

Sur les deux types d'adhésifs testés, nous avons ainsi mis en évidence l'influence des paramètres de durcissement sur la tenue mécanique des joints à la rupture par cisaillement.

Pour quatre valeurs de palier de température respectivement fixés pendant: 1 heure, 2 heures, 3 heures et 4 heures, nous avons déterminé expérimentalement l'influence de la température de cuisson sur les deux adhésifs.

- Lorsque le palier de température est nul et la pression de collage constante, la résistance à la rupture par cisaillement du joint varie de manière pratiquement linéaire avec la température de cuisson.

- Pour chaque palier de température fixé, il existe à pression de collage constante, une température de cuisson optimale pour laquelle la résistance à la rupture par cisaillement du film est maximale. Au-delà de cette température optimale, il se produit une dégradation des caractéristiques adhésives et cohésives des deux adhésifs.

- A température de cuisson et temps de cuisson constants ( $T=175\text{ }^{\circ}\text{C}$  ,  $t=1$  heure), la variation de la résistance au cisaillement en fonction de la pression de collage présente un minimum. Cependant, les mesures d'épaisseur  $S_c$  effectuées sur les assemblages confirment bien que celles-ci décroissent lorsque la pression de collage augmente. Ce résultat met en évidence deux zones distinctes d'épaisseur du film d'adhésif. La première zone correspond à une épaisseur de joint telle que  $0,02\text{ mm} \leq S_c \leq 0,04\text{ mm}$ . Dans cette zone, compte tenu de la faible épaisseur du joint, il se produit un phénomène de clivage et d'interpénétration des pics de la rugosité qui engendre une augmentation de la résistance au cisaillement. La seconde zone est quant à elle caractérisée par une épaisseur de film comprise entre  $0,04\text{ mm}$  et  $0,06\text{ mm}$ ; la variation de la résistance au cisaillement en fonction de la pression de collage ( ou de l'épaisseur du joint ) est dans ce cas en accord avec les résultats expérimentaux de Y. GILIBERT (12).

Les examens micrographiques effectués sur les faciès de rupture mettent en évidence l'existence de deux types de rupture : les ruptures de type cohésive par cisaillement du joint et les ruptures de type mixte ( cohésive et adhésive ) par cisaillement et décollement du joint.

L'analyse extensométrique par jauges électriques, effectuée sur deux assemblages a permis de déterminer finement leurs comportements mécanique par l'évaluation dans le joint:

- des seuils d'amorçage  $F_f$  des microfissures ainsi que de leur

développement ( croissance en régime stable ).

- des seuils de propagation  $F_p$  des criques et de leur propagation en régime instable ( voir le comportement de l'adhésif  $M_2$  ).

Une confrontation théorie-expérience a été effectuée dans la partie centrale du corps d'épreuve où le comportement mécanique de l'assemblage est élastique linéaire dans sa première phase (  $F < F_i$  ). Dans cette partie centrale, après avoir évalué de manière indirecte les constantes élastiques de l'adhésif, nous avons pu montrer l'existence d'une bonne adéquation entre nos résultats expérimentaux et les résultats théoriques de Y. GILIBERT et A. RIGOLOT (15).

La démarche théorique de VOLKERSEN (10), fondée sur la loi de Hooke a été explicitée et développée. Ce développement a permis de montrer que les contraintes de cisaillement et de décollement dans le plan moyen du film d'adhésif peuvent être en fait caractérisées par quatre constantes caractéristiques:  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ ,  $\lambda_3$  et  $\lambda_4$ .

Ainsi, la méthode de résolution employée a permis d'évaluer les contraintes de cisaillement et de décollement sur toute la longueur de recouvrement du joint. Dans une bonne partie du recouvrement, une parfaite coïncidence existe entre notre méthode et celles issues des travaux de VOLKERSEN (10), GILIBERT (12) et GILIBERT-RIGOLOT (13). La comparaison demeure également satisfaisante avec les résultats obtenus par éléments finis.

D'une manière générale, il en ressort que, quels que soient les paramètres géométriques et mécaniques considérés, la modélisation théorique ainsi proposée assure une grande stabilité (absence de contraintes singulières). De plus, sont satisfaites les conditions aux limites sur les bords libres (contrairement aux modèles utilisés dans les travaux précédents)

Un certain nombre d'observations peuvent être alors faites:

1) Lorsque le module de Young ( $E$ ) et l'épaisseur ( $S$ ) du substrat sont constants, on constate que pour  $E_c$  (module de Young de l'adhésif) fixé:

a) Toute variation de l'épaisseur du film d'adhésif entraîne dans le même sens, une variation des contraintes de décollement. Quant aux contraintes de cisaillement, leur variation se fait en sens inverse. Dans tous les cas, les contraintes de décollement atteignent leur valeurs maximales aux extrémités libres du recouvrement. En particulier, lorsque l'épaisseur du joint augmente, le coefficient de concentration des contraintes de cisaillement diminue. L'abscisse  $X_M$  des contraintes maximales de cisaillement s'éloigne des bords libres et s'annule pour une valeur caractéristique de l'épaisseur du joint. C'est ce qui explique la notion d'épaisseur optimale mise en évidence de manière expérimentale par Y.GILIBERT (12). On observe l'effet contraire lorsque l'épaisseur du joint diminue: Les points  $X_M$  se rapprochent, puis restent confinés au voisinage des bords libres.

b) L'augmentation de la longueur de recouvrement, bien que favorisant une diminution des contraintes de décollement provoque en retour l'effet inverse en ce qui concerne les contraintes de cisaillement. Dans ce cas, les points  $X_M$  se rapprochent des bords libres et tendent asymptotiquement vers une valeur finie. Nous trouvons bien ici, l'explication de la faible variation des contraintes moyennes de cisaillement à la rupture constatée expérimentalement par certains auteurs lorsque les longueurs de recouvrement deviennent de plus en plus élevées.

Lorsque les caractéristiques géométriques du joint sont fixées, l'augmentation du module d'élasticité longitudinal de l'adhésif entraîne dans le film d'adhésif, aux voisinage des extrémités libres du recouvrement une augmentation des contraintes de cisaillement maximales  $\tau_M$  et une diminution des contraintes de décollement  $\sigma_M$ .

2) Pour une section  $S_c$ , une longueur  $L$  de recouvrement et une valeur du module  $E_c$  de Young de l'adhésif constants, les calculs numériques montrent que les contraintes maximales de décollement  $\sigma_M$  varient dans le même sens que l'épaisseur  $S$  de l'assemblage. En ce qui concerne les contraintes maximales de cisaillement  $\tau_M$ , on observe un comportement

inverse. D'une manière générale, suivant les caractéristiques géométriques et mécaniques du substrat et de l'adhésif ( à l'exception du cas où les films d'adhésif sont suffisamment épais ) il y a prépondérance:

- des contraintes de cisaillement aux voisinages des extrémités libres du recouvrement
  
- des contraintes de décollement aux bords libres ( $\bar{x}=1/2$ ) du recouvrement

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- (1) J. MAC BAIN  
Reports of D.S.I.R. London, 1922, 1927, 1932
- (2) S. S. VOYUSTKII  
Uppekhi Khimii, pp.18, 449, 1949  
Rubber Chem. Tech., pp 30,531, 1957
- (3) H. KAUSH  
I.U.P.A.C. Macromolécules, H. Benoit and P. Rempp,  
Pergamon Press, Oxford and N.Y., pp 211, 1982
- (4) H. SCHONHORN  
Adhesion: Fundamentals and Practice  
Mac Laren, London, pp 312, 1969
- (5) J. R. HUNTSBERGER  
Traitrise and Adhesion and Adhesives  
M. Dekker, R.L. Patrick Edition, N.Y,vol.1, pp 119, 1957
- (6) B. V. DERYAGIN and N. A. KROTOVA  
Dokl. Akad. Nauk., S.S.S.R., pp 89,109, 1953
- (7) W. A. ZIZMAN  
Ind. Eng. Chem., PP 19,55, 1963
- (8) ARNOVLJEVIC  
Das verteilungsgesetz der Haftspannungen in axial  
beanspruchten verbundstaeben  
Z. F. Arch.und Ing. Wesen, Hannovre, 55, (1909),p 415.
- (9) M. GOLAND AND E. REISSNER  
The stresses in cemented joints  
J. Appl. Mech., Vol.11, pp 17-27, 1944



- (10) O. VOLKERSEN  
Recherche sur la théorie des assemblages collés.  
Construction métallique, n°4, pp 3-13, 1965
- (11) R. D. ADAMS and N. A. PEPPIATT  
Stress analysis of adhesive bonded lap joints  
J. Strain Anal., Vol.9, n°3, pp 185-196, 1974
- (12) Y. GILIBERT  
Contribution à l'étude de l'adhésivité de matériaux collés par l'intermédiaire de résines époxydiques.  
Thèse de doctorat d'Etat ès-sciences physiques  
Université de Reims, 1978
- (13) Y. GILIBERT et C. COLLOT  
Influence de l'épaisseur du joint d'adhésif sur la résistance mécanique de l'acier collé par l'intermédiaire de résine époxydique. C. R. Acad. Sc. Paris, t. 284 ( 28 Février 1977 )
- (14) Y. GILIBERT et A. RIGOLOTT  
Analyse asymptotique des assemblages collés à double recouvrement sollicités au cisaillement, en traction.  
C. R. Acad. Sc. Paris, t. 288, pp. 387-390, 1979.
- (15) Y. GILIBERT et A. RIGOLOTT  
Théorie élastique de l'assemblage collé à double recouvrement: Utilisation de la méthode des développements asymptotiques raccordés au voisinage des extrémités.  
BORDAS-GAUTHIER-VILLARS, Vol.18 - N°107 - MATERIAUX et CONSTRUCTION.
- (16) Y. GILIBERT et A. RIGOLOTT  
Analyse asymptotique des assemblages collés à double recouvrement sollicités au cisaillement en traction.  
Journal de Mécanique Appliquée, Vol.3, N°3, 1979.

- (17) P. DESTUYNDER, Y. OUSSET et C. STACKER  
Sur les singularités de contraintes dans les joints collés.  
Journal de Mécanique théorique et appliquée. Vol.7, n°6, 1988, pp 899-926.
- (18) S.AMIJIMA and T.FUJII  
A microcomputer program for stress analysis of adhesive-bonded joints.  
Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol.7, n°4, October 1987.
- (19) H. L. GROTH  
Calculation of stresses in bonded joints using substructuring technic.  
Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol.6, n°1, January 1986.
- (20) G. R. WOOLEY and D. R. CARVER  
Stress Concentration Factor for Bonded Lap Joint  
J. Aircraf, vol.8, n°10, October 1971.
- (21) J. A. HARRIS and R. ADAMS  
Strength prediction of bonded single lap joint by non linear finite element methods.  
Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol.4, n°2, April 1984.
- (22) R. D. ADAMS, J. COPPENDALE and N. A. PEPPIATT  
Stress Analysis of Axisymmetric Butt Joints Loaded in Torsion and Tension.  
Journal of strain analysis, Vol.13, n°1, pp 1-10, 1978.
- (23) L. J.. HART-SMITH  
Stress Analysis: a Continuum Mechanical Approach.  
Development in Adhesives 2E (Applied Science Publishers), Vol.2, pp 1-44, 1981.

- (24) G. DOLEV and O. ISHAI  
Mechanical characterization of Adhesive Layer in situ and as Bulk Material.  
J. Adhesion, Vol.12, pp 283-294, n°4, 1981.
- (25) S. GALI, G. DOLEV, and O. ISHAI  
An Effective stress/Strain Concept in the Mechanical Characterization of Structural Adhesives, pp 135-140, January 1981.
- (26) C. C. H. GUYOTT and P. CAWLEY  
Evaluation of the cohesive properties of adhesive joints using ultrasonic spectroscopy.  
N.D.T International, Vol.27 , n°4, pp 233-240, August 1988.
- (27) G. C. KNOLLMAN  
Variation of Shear Modulus Through the Interfacial Bond Zone of an Adhesive.  
Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol.5, n°3, pp 137-141, July 1985.
- (28) T. S. SRIVATEN, R. MANTENA, R. F. GIBSON, T. A. PLACE and T. S. SUDARSHAN  
Electromagnetic Measurement of Damping Capacity to Detect Damage in Adhesively Bonded Material.  
Material Evaluation, Vol.47, n°5, pp 564-570, May 1989.
- (29) Y. GILIBERT, S. HALFAOUI et M. L. L. KLEIN  
Influence de la rugosité sur le comportement mécanique fin en traction statique, et en fatigue par traction ondulée, de l'assemblage collé en sifflet. XXème congrès F.A.T.I.P.E.C. Nice-17 au 21 Septembre 1990, pp 309-324.
- (30) Y. GILIBERT  
Etude de l'influence du biseautage des extrémités des substrats, sur le comportement mécanique d'un composite

- plan collé, sollicité à l'essai de cisaillement par traction. 19<sup>ième</sup> Col. an., Groupe Français de Rhéologie, Rhéologie des matériaux anisotropes, Paris, 28 - 30 Nov. 1984.
- (31) Y. GILIBERT, M. A. KOMIHA et A. RIGOLOT  
Théorie élastique de l'assemblage collé à double recouvrement: Utilisation de la méthode des développements asymptotiques raccordés au voisinage des extrémités.  
Rapport de recherche 189, E.N.S.T.A, Juillet 1984.
- (32) Y. GILIBERT et C. COLLOT  
Contribution à l'étude de l'adhésivité colle-acier en fonction des états microgéométriques des surfaces rectifiées et rectifiées sablées.
- (33) E. ZIANE, G. BERANGER, C. CODET and J. C. CHARBONNIER  
Behaviour of adhesive-bonded assemblies of galvanized steel sheets under shear loading. Int. J. Adhesion and Adhesives, Vol.6, n°2, pp 67-71, April 1986.
- (34) MOHAMED Ali KOMIHA  
Analyse théorique et expérimentale de l'influence de l'épaisseur du film de colle dans un assemblage collé, à double recouvrement.  
Thèse, Université PIERRE et MARIE CURIE, Octobre 1983.
- (35) C. BERDAH, Y. GILIBERT, et A. RIGOLOT  
Contraintes élastiques planes dans un assemblage à simple recouvrement, sollicité en traction.  
C.R. Acad. Sc. Paris, t. 303, série II, n°17, 1986.
- (36) Y. GILIBERT, M. L. L. KLEIN, B. REYNIER  
Analyse fine du comportement mécanique d'assemblages collés en sifflet, sollicités en traction simple.  
Composite - n°3 - Mai-Juin 1989, pp 54-66.

- (37) S. DIB  
Etude de la rupture d'assemblages métalliques liés par joint d'adhésif.  
Thèse, E.C.P. Octobre 1985.
- (38) M. DUBOIS  
Etalonnage de dynamomètres et de balances au centre d'essais de Modane-Avrieux.  
Communication, Congrès Mesucora, Paris, 17-21 Avril 1967.
- (39) M. DUBOIS  
Etude expérimentale de dynamomètres de grande précision à jauges extensométriques au centre d'essais de Modane-Avrieux de l'O.N.E.R.A. Communication, 2<sup>ième</sup> réunion de l'IMEKO, la HAYE, 14-16 Sept. 1971
- (40) M. DUBOIS  
Mesure des coefficients thermoélastiques des métaux à l'aide de jauges extensométriques. Strain, pp 22-31, Janvier 1978.
- (41) G. MÜLLER  
Der Verformungs-und Bruchvorgang an Metallklebeverbindungen verschiedenen Verkstoffe bei ein-und mehrachsiger statischer Belastung.  
Dissertation, Université technique de Berlin, 1959.
- (42) ENCYCLOPEDIE D'ANALYSE DES CONTRAINTES.  
Vishay - micromesures. Dépôt légal n°7570 - 1<sup>ier</sup> trimestre 1984.
- (43) S. KONIECZKA.  
Conception d'un capteur à jauges pour balance de faible portée. L'extensométrie appliquée aux capteurs de pesage. Journées d'étude organisées par la Revue Pratique de Contrôle Industriel. 13 - 14 Janvier 1988. Editions Ampère.

(44) Y. GILIBERT

Dispositif d'ancrage mécanique pour le maintien d'une extrémité d'une pièce parallélépipédique, procédé de fabrication d'un tel dispositif et adaptateur de ce dispositif pour son montage sur une machine de traction. BREVET FRANÇAIS: N°86.14137 du 10.10.1986. B.O.I.P. N°51 du 23.12.88. BREVET EUROPEEN : GB - NL - IT, demande N°87.402264.3 du 09.10. 1987 . Délivrée le 23.12.1988 sous le N°2.605.068.

(45) Y. GILIBERT, J. BIELLE, J. BERNASCONI, C. COLLOT

Etude de la résistance mécanique de plaques d'acier collés en fonction de la rugosité des subjectiles et de l'épaisseur de l'adhésif. Bulletin de la RILEM (Matériaux et construction) N°54 (1976)

(46) Y. GILIBERT, G. VERCHERY

Influence of surface roughness of mechanical properties of joints, Division of Organic Coating and Plastics Chemistry, American Chemical Society, 184 th National Meeting, Kansas City, Organic Coating and Applied Polymer Science Proceedings, American Chemical Society, 47, pp. 84 - 86, 12-17 Sept. 1982.

(47) Y. GILIBERT

Influence of surface roughness on mechanical properties of joints, BOOK:"ADHESIVE JOINT, Formation, Characteristics and Testing" Edited by MITTAL K.L. IBM CORPORATION PLENUM PRESS (New York and London), pp 69 - 84, 1984.

(48) Y.GILIBERT, A. RIGOLOT

Optimisation de l'état de surface des subjectiles d'un assemblage plan collé : modélisation analytique de son comportement dans le domaine élastique, 1<sup>ier</sup> Congrès International, " De la science des Matériaux au Génie des

Matériaux de Construction ", RILEM, Paris - Versailles,  
7 - 11 Sept., 1987.

(49) Y. GILIBERT

Procédé pour améliorer la résistance à l'amorçage, en régime stable et à la propagation des microfissures dans un joint d'adhésif composite adhérent à la surface du subjectile d'un substrat ou d'éléments de renforcement d'un corps en matériaux composites ou agrégat. FRANCE : Dépôt du 05.12.1988. N°8815912, B.O.P.I, " BREVET " N°23 du 08.06.1990.

