

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 08 mai 1945 de Guelma

Mémoire de Magister



77

Département de : Génie Mécanique

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE
SOUS SOLLECITATION CYCLIQUES D'UN POLYMERE
HAUTE DENSITE.**

Option : Construction et Productique

Présenté et soutenu publiquement par :

BOUTELIDJA Racim

Devant le jury composé de MM :

OUELAA Nouredine	Président	Professeur, Université de Guelma
FATMI Louendi	Encadreur	Professeur, Université de Guelma
BEY Kamel	Examineur	Maître de Conférences, Université d'Annaba
TADJINE Kamel	Examineur	Maître de Conférences, Université d'Annaba

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 08 mai 1945 de Guelma

Mémoire de Magister



Département de : Génie Mécanique

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE
SOUS SOLLICITATION CYCLIQUES D'UN POLYMERE
HAUTE DENSITE.**

Option : Construction et Productique

Présenté et soutenu publiquement par :

BOUTELIDJA Racim

Devant le jury composé de **MM** :

OUELAA Nouredine	Président	Professeur, Université de Guelma
FATMI Louendi	Encadreur	Professeur, Université de Guelma
BEY Kamel	Examineur	Maître de Conférences, Université d'Annaba
TADJINE Kamel	Examineur	Maître de Conférences, Université d'Annaba

REMERCIEMENTS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Recherche de Mécanique et Structures de l'Université de Guelma. Tous les moyens du laboratoire étaient à ma disponibilité, je remercie vivement mon encadreur Dr Louendi FATMI, Maître de Conférences au Département de Génie Mécanique de l'Université de Guelma d'avoir dirigé ce travail et pour son aide scientifique et matérielle et surtout pour son suivi régulier et son assistance jusqu'à la fin de ce travail, ainsi que pour les encouragements qu'il n'a cessé d'apporter à mes travaux durant cette période.

J'adresse aussi mes vifs remerciements à Monsieur Nouredine OUELAA, Professeur au Département de Génie mécanique de l'Université de Guelma d'avoir accepté de présider mon jury de soutenance.

Je remercie également Messieurs Kamel BEY et Kamel TADJINE, Maîtres de Conférences à l'Université de Badji Mokhtar ANNABA d'avoir pris le soin d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.

Je remercie mes Enseignants du Département de Génie Mécanique, ainsi que le chef de Département de Mécanique.

Je tiens à remercier également l'ensemble du personnel du département pour ses services appréciables, et surtout nos techniciens ainsi qu'à tous ceux qui ont participé de près ou de loin et qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

J'exprime mes gratitude et mes remerciements à mes parents et à toute ma famille pour leurs encouragements et leurs appuis constants au cours de l'élaboration de ce mémoire.

DEDICACES

A mon père
A ma mère
A ma petite famille, ma femme et mes deux garçons
A mes frères Rafik, Abdou
A ma sœur
A la mémoire de ma tante
A mes enseignants (GUELMA)
A mes responsables
A mes collègues de travail
A mes amis
.....

*TABLE
DES
MATIERES*

Sommaire

- <i>Résumé.</i>	
- <i>Abstract.</i>	
- <i>ملخص</i>	
- <i>Introduction</i>	07
- <i>Chapitre 1 : Généralités sur les polymères</i>	
- Définition des polymères.....	09
o Polymère.....	09
o Exemple de polymère usuel.....	09
o Différents types de polymères.....	10
▪ Les homopolymères.....	10
▪ Les copolymères.....	10
- Les polyéthylènes	10
o Polymérisation de l'éthylène C ₂ H ₄	11
o Propriétés des polyéthylènes haute densité	12
o Caractéristiques du PEHD	13
o Tubes en polyéthylènes	13
▪ Spécification pour composition de base	13
▪ Caractéristiques et classification	13
▪ Domaine d'utilisation.....	14
o Caractéristiques des tubes en PEHD	14
▪ Caractéristiques physiques.....	14
▪ Caractéristiques mécaniques.....	15
▪ Caractéristiques dimensionnelles.....	15
o Application des tubes en PE.....	16
- Mode de Fabrication	16
o Matériau étudié et modes d'obtention des éprouvettes.....	16
o Extrusion des tubes.....	17
▪ L'extrudeuse.....	17
▪ La filière.....	18
▪ Le refroidissement.....	19
▪ L'étirage.....	19
▪ L'extrudat.....	19
o Les produits obtenus.....	20
- <i>Chapitre 2 : Travaux réalisés dans le domaine</i>	21
- <i>Chapitre 3 : Procédure expérimentale</i>	25
- Procédures expérimentales	26
o Eprouvettes obtenues par usinage.....	26
o Régime de coupe et état de surface.....	27

○	Dimensions des éprouvettes.....	27
○	Usinage des éprouvettes.....	28
○	Préparation de l'entaille et des fissures	28
○	Réalisation de l'entaille en V.....	28
○	Réalisation de la fissure	29
○	Banc d'essais	29
-	Essais statiques	30
○	Résultats obtenus	30
○	Analyse des résultats	34
○	Mécanismes de rupture	35
-	Essais cycliques	36
○	Déroulement des essais	36
○	Résultats obtenus	38
○	Analyse et discussion des résultats point de vue comportement	42
○	Mécanismes de rupture observés.....	48
-	<i>Conclusions</i>	50
-	<i>Références bibliographiques</i>	
-	<i>Annexe</i>	

RÉSUMÉ

Dans le cadre de ce mémoire de magister nous avons procédé à une étude expérimentale du comportement mécanique d'un polyéthylène haute densité de grade 100 (PEHD100). Des essais de flexion trois points statiques et cycliques sont réalisés sur des éprouvettes saines et fissurées. Différents niveaux de chargement et différentes vitesses ont été considérés.

Les résultats statiques ont confirmé d'une part la maîtrise des techniques expérimentales employées et d'autre part ont montré que l'augmentation de la valeur de la fissure entraîne une diminution du ligament à casser et donc une baisse de la valeur de la charge à la rupture.

Les résultats des essais de flexion cyclique ont montré que l'augmentation de la vitesse entraîne une dégradation de la valeur du module dès les premiers cycles, probablement lié à une désorganisation des molécules du matériau et ce pour les niveaux de chargement considérés. Cette constatation est valable pour des longueurs de fissure de 0.5 et 1.5 mm.

Pour une fissure de 4.5 le matériau se ramollit dès les premiers cycles pour les différentes vitesses et différents niveaux de chargement retenus. Pour des faibles vitesses et fissure (2 mm/min et 0,5 mm) le matériau se durcit dès les premiers cycles et tend à se stabiliser pour la suite du cyclage. Pour les vitesses de 100 et 500 mm/min le matériau présente un ramollissement dès les premiers cycles, puis un comportement constant, d'une manière générale l'augmentation de la vitesse entraîne une meilleure organisation des chaînes macromoléculaires.

Les observations microscopiques ont montré que les ruptures apparaissent au fond des fissures.

Abstract

Within the framework of this memory of magister we made an experimental study of the mechanical behaviour of a polyethylene high density of rank 100 (PEHD100). Deflection tests three static and cyclic points are carried out on operational test-tubes and are fissured. Various levels of loading and various speeds were considered.

The static results confirmed on the one hand the control of the experimental techniques employed and on the other hand showed that the increase in the value of the crack involves a reduction in the ligament to be broken and thus a fall of the value of the load to the rupture.

The results of the cyclic deflection tests showed that the increase speed involves a degradation of the value of the module as of the first cycles, probably related to a disorganization of the molecules of material and this for the levels of loading considered. This observation is valid for lengths of crack of 0.5 and 1.5 mm.

For a crack of 4.5 the material softened as of the first cycles for various speeds and various levels of loading selected. For weak speed and crack (2 mm/min and 0,5 mm) the material hardened as of the first cycles and tends to be stabilized for the continuation of cycling. For speeds of 100 and 500 mm/min the material presents a softening as of the first cycles, then a constant behaviour, generally the increase speed involves a better organization of the macromolecular chains.

The microscopic observations showed that the ruptures appear at the bottom of cracks.

ملخص

في إطار هذه المذكرة مذكرة الماجستير لقد قمنا بدراسة تجريبية لسلوك الميكانيكي لمادة البوليثيلين العالي الكثافة 100 (HDPE100). تجارب الانحناء بثلاث نقاط سكونية و دورية على عينات اختبار سليمة ومصدعة، مختلف مستويات الشحن و مختلف السرعات أخذت بعين الاعتبار.

نتائج تجارب السكون أكدت من جهة التحكم بتقنيات التجارب المستعملة و من جهة أخرى أكدت أن ارتفاع قيمة التصدع تؤدي إلى نقصان في الرباط الهش إذن انخفاض في قيمة الشحن الانقطاع.

نتائج تجارب الانحناء الدوري بينت أن ارتفاع سرعة الشحن يؤدي إلى تفهقر في قيمة الموديل منذ الأطوار الأولى على الأرجح مرتبطة بتذبذب جزيئات المعدن و من اجل مختلف مستويات الشحن المعتبرة، هذه الملاحظة صحيحة من اجل أطوال التصدعات 0,5 و 1,5 ملليمتر.

من اجل طول التصدع 4,5 ملليمتر المعدن ينحط ابتداء من الأطوار الأولى بالنسبة لمختلف سرعات و مستويات الشحن المحتفظ بها. من اجل السرعات الضعيفة 2مم/ثا و طول التصدع 0,5مم المعدن يتصلب منذ الأطوار الأولى و يلجئ إلى الاستقرار في بقية الأطوار. من اجل السرعات 100 مم/ثا و 500 مم/ثا المعدن يمثل تليين منذ الأطوار الأولى و بعدها سلوك ثابت، بصفة عامة ارتفاع السرعة تؤدي الى تنظيم احسن في السلاسل الجزيئية.

المشاهدة المجهرية بينت ان الإنقطاعات تظهر في اسفل التصدع.

INTRODUCTION

Le choix d'un matériau pour la conception et la fabrication des produits industriels a toujours été au centre des préoccupations des ingénieurs. Les domaines tels que les télécommunications, les transports, le spatial, la santé et le sport, ... sont à l'origine de l'émergence de produits qui doivent répondre à des fonctionnalités nouvelles et variées et à des règles de sécurité de plus en plus strictes.

Pour sélectionner les matériaux qui conviennent le mieux aux exigences du produit il faut s'appuyer sur une approche ayant une longue expérience industrielle et sur des nouvelles méthodes d'analyse et de caractérisation nécessaires à la compréhension et à la prédiction des mécanismes affectant les performances, la fiabilité et la durée de vie des matériaux [1]. Ce choix est rendu plus difficile par le développement de nouveaux matériaux, grâce aux progrès prodigieux de la mécanique des matériaux. Cette dernière décennie a connu l'amélioration des outils de simulation numérique permettant, l'intégration de lois de comportement fortement non linéaires d'une part et à grand nombre d'équations constitutives d'autre part.

Cette volonté d'optimiser au mieux les produits industriels et leur tenue en service ne peut être réalisée qu'à travers une démarche qui tient compte des couplages forts entre la physique et la mécanique des matériaux ainsi que leurs évolutions au cours du temps. Cette démarche conduit inévitablement à proposer des lois de comportement très complexes. Le comportement mécanique de ces matériaux nécessite, un développement des démarches expérimentales lourdes à mettre en œuvre.

Les tubes en polyéthylène haute densité font partie de ces nouveaux matériaux. Ils sont utilisés dans le transport et la distribution de gaz naturel, ils couvrent 80% des réseaux actuels [2], leur flexibilité, fiabilité des jonctions, et résistance aux agents chimiques assurent des canalisations économiques et sûres, la durée de vie de ces canalisations est supérieure à 50 ans [3].

L'objectif assigné à ce travail est la contribution à l'étude du comportement mécanique d'un polyéthylène haute densité de grade 100 soumis à des sollicitations statiques et cycliques, en tenant compte de l'influence de la longueur de fissure, du niveau de chargement, du nombre de cycles et de la vitesse de chargement d'une part sur le comportement mécanique et d'autre part sur la variation de la morphologie du matériau. Pour atteindre ce but nous avons jugé nécessaire d'organiser ce travail comme suit :

Dans le **premier chapitre** nous avons présenté des généralités sur les polymères points de vues : définitions, propriétés, caractérisations et modes de fabrication des matériaux étudiés.

Le deuxième chapitre est consacré principalement à un certain nombre de travaux de recherche réalisés sur le comportement mécanique expérimental des polymères.

Le troisième chapitre est réservé à notre contribution à l'étude du comportement mécanique e à l'évolution de la morphologie du PE100 chargé en flexion trois points statique dans le cas de spécimen sain puis entaillé et fissuré. Dans le cas des essais de flexion 3 points cycliques nous avons tenu compte des effets de la vitesse d'essais, du nombre de cycles, du niveau de chargement et de la longueur de fissure sur l'évolution de la dégradation de la rigidité et de la morphologie du matériau.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES POLYMERES

1 Définition des Polymères

1.1 Polymères

Substances constituées de grandes molécules formées par la répétition d'un même motif composé d'une ou de plusieurs unités de base. Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) (du grec *monos*: un seul ou une seule, et *meros*; partie) [4], dont la molécule finale (polymères) est le degré de polymérisation. Si ce degré de polymérisation est élevé, on parle de hauts polymères; lorsqu'il est faible, le composé est un oligomère [5]. Les matériaux polymères servent de base pour différentes industries de grandes importances, comme celles des plastiques, des fibres de synthèse, du papier, des caoutchoucs et des peintures les polymères organiques les plus connus sont le polyéthylène (PE), le polystyrène (PS) et polychlorure de vinyle (PVC). Ils sont légers et facile à mettre en forme, les polymères sont des isolants électriques et thermiques, ils sont peu rigides et ne supportent pas des températures supérieures à 200°C [6].

1.2 Exemple de polymères usuels

Dans le tableau 1.1 illustre des exemples usuels des polymères.

Polymères usuels	désignation	C.chimique	Domaine d'emploi
polyéthylène	PE	$\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ $\ast \left(\begin{array}{c} \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{H}_2 \end{array} \right)_n \ast$	C'est le matériau d'emballage par excellence
polypropylène	PP	$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}$ $\ast \left(\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{CH}_3 \end{array} \right)_n \ast$	C'est un plastique dur, on le retrouve dans tous les matériaux de plomberie.
Le polychlorure de vinyle	PVC	$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{Cl}}{\text{CH}}$ $\ast \left(\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{Cl} \end{array} \right)_n \ast$	utilisés pour la fabrication des chaussures synthétiques et des disques
Le polytétrafluoroéthylène	PTFE	$\text{F}_2\text{C}=\text{CF}_2$ $\ast \left(\begin{array}{c} \text{F} \quad \text{F} \\ \quad \\ \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{F} \quad \text{F} \end{array} \right)_n \ast$	Ce polymère est plus connu sous le nom de Téflon (anti-adhésif).
Le polystyrène	PS	$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{Ph}}{\text{CH}}$ $\ast \left(\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{Ph} \end{array} \right)_n \ast$	On s'en sert pour les emballages.
Le poly oxyde d'éthylène	POE	$\text{H}_2\text{C}-\underset{\text{O}}{\text{CH}_2}$ $\ast \left(\begin{array}{c} \text{C}-\text{C}-\text{O} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{H}_2 \end{array} \right)_n \ast$	On l'utilise en cosmétique
Le poly méthacrylate de méthyle	PMMA	$\text{H}_2\text{C}=\underset{\text{O}-\text{C}-\text{OCH}_3}{\text{C}}^{\text{CH}_3}$ $\ast \left(\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ \text{C}-\text{C} \\ \quad \\ \text{H}_2 \quad \text{OOCCH}_3 \end{array} \right)_n \ast$	On l'utilise pour la fabrication de Plexiglas.
Les polyamides		$\text{HN}-\underset{\text{H}}{\text{C}}^{\text{O}}-\text{COOH}$ $\ast \left(\begin{array}{c} \text{O} \\ \\ \text{N}-\text{C}-\text{O} \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right)_n \ast$	fabrication de fibres synthétiques

Tableau 1.1 Exemple de polymères usuels.

1.3 Différents types de polymères

Il existe deux types de polymères :

- Les homopolymères
- Les copolymères

1.3.1 Les homopolymères

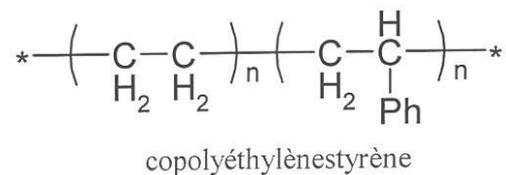
Les homopolymères ne sont constitués que d'un seul type de monomère dont le motif se répète dans la molécule [5] comme par exemple le polystyrène [4], aussi parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène.

Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles, nous trouvons les homopolymères linéaires, les homopolymères branchés, les homopolymères étoilés [7].

1.3.2 Les copolymères

Les copolymères sont constitués de plusieurs types de monomères comme par exemple l'acrylonitrile butadiène styrène [4].

Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles. On parle alors de modes de copolymères



Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons le mode statistique, le mode alterné, le mode séquencé, le mode greffé.

Les polymères, qu'ils soient homo ou copolymères, peuvent être réticulés.

Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents.

La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler [7].

2 Les polyéthylènes

Ces dernières années, les tubes en polyéthylène sont mis en pratique pour le montage de diverses conduites industrielles, ainsi que pour la construction des canalisations d'eau, des conduites de pétrole et des systèmes d'irrigation et de drainage. Il est noté aussi que plusieurs réseaux de distribution de gaz naturel sont complètement réalisés en tubes de polyéthylènes moyens et hautes densités [8].

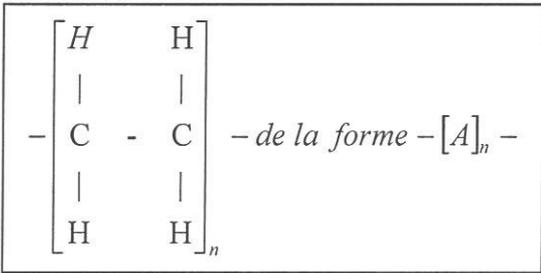
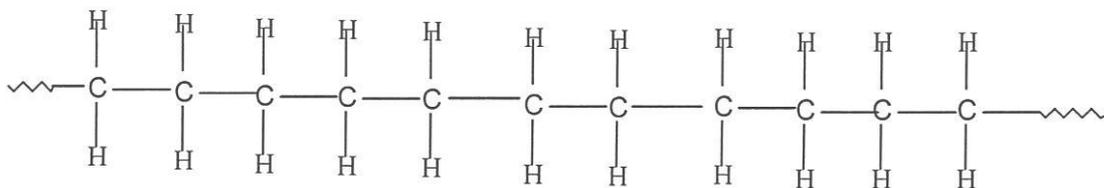
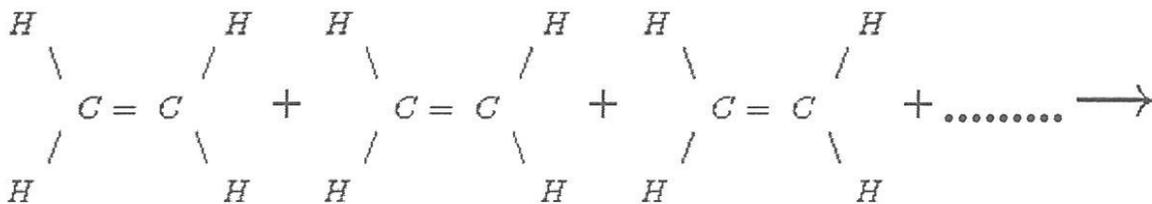
Le polyéthylène est probablement le polymère que nous voyons le plus souvent dans la vie de tous les jours. Le polyéthylène est le plastique le plus populaire du monde c'est le polymère dont sont faits les sacs des supermarchés, les bouteilles de shampoing, les jouets des enfants, et même les gilets pare-balle c'est un matériau qui a des usages aussi variés a une structure très simple, la plus simple de tous les polymères du commerce.

Une molécule de polyéthylène n'est rien de plus qu'une longue chaîne d'atomes de carbone, avec deux atomes d'hydrogène attachés à chaque atome de carbone, mais il est plus simple de le dessiner comme sur la figure ci-dessous, simplement avec la chaîne d'atomes de carbone longue de plusieurs milliers d'atomes.

Le Polyéthylène ou polythène est l'un des polymères les plus simples et les moins chers. C'est un plastique inerte, le polyéthylène peut être très différent d'un industriel à l'autre : cette différence est due au fait que tous les polymères contiennent une gamme moléculaire de longueurs variables. Les processus de polymérisation influent également sur la ramification des molécules et sur le degré de cristallinité du produit final. Les propriétés peuvent être modifiées par un traitement mécanique ou par des additifs appropriés [9].

2.1 Polymérisation de l'éthylène C₂H₄

Son nom vient du fait qu'il est le polymère obtenu par la polymérisation des monomères d'éthylène (CH₂ = CH₂) en une structure complexe de formule générique :



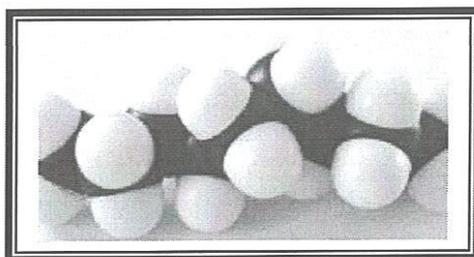


Figure 1.1 Structure moléculaire du polyéthylène (Tranche de polyéthylène).

Les polyéthylènes (PE) sont des macromolécules appartenant à la famille des polyoléfines (hydrocarbures). Ils constituent une importante famille des matières plastiques. Ils sont obtenus par polymérisation d'éthylène gazeux. Divers procédés sont utilisés pour cette polymérisation. On distingue la déshydratation de l'alcool éthylique sur l'acétylène et le cracking des hydrocarbures aliphatiques se trouvant dans le naphta provenant du pétrole brut et dans les gaz naturels. Cette réaction s'effectue à haute température, vers 800°C. L'éthylène doit être soigneusement purifié, pour le débarrasser des impuretés gazeuses comme: CO₂, CO, N₂, NH₃,... qui pourraient jouer le rôle d'inhibiteurs de polymérisation, en rompant les chaînes de polymère, au fur et à mesure de leur formation. L'éthylène (C₂H₄) est un gaz à température ordinaire et facilement compressible. Son point d'ébullition est de -104°C, sous pression atmosphérique. Les polyéthylènes sont de natures différentes selon les modes de polymérisation [11]. Le procédé basse pression du polyéthylène comme celui de Ziegler-Natta, est basé sur l'utilisation de catalyseurs nécessitant de faibles pressions (≤ 50 bars). Ils permettent d'obtenir des chaînes macromoléculaires linéaires facilement cristallisables [12].

Les polyéthylènes existent sous les formes suivantes :

- Matière première à usage général : pâtes, poudres à mouler.
- Demi-produits : Plaque, films et feuilles, fils et fibres.
- Produits finis : préparés par moulage, compression, injection, extrusion et coulée.

2.2 Propriétés des polyéthylènes haute densité

Elles dépendent de ses paramètres structuraux comme la masse volumique, la cristallinité et la distribution des masses molaires, des conditions de mise en œuvre, de la conception de la pièce et des conditions d'utilisation comme le type et la durée des contraintes, ainsi que de la température. Le tableau 1.2 regroupe l'influence des paramètres structuraux sur les propriétés mécaniques du PEHD.

Propriétés		Effet de l'augmentation de :		
		Cristallinité	Masse molaire	L'indice de fluidité
Mécaniques	Rigidité	↑	↑	↑
	Dureté	↑	↑	=
	Résistance à l'abrasion	↑	↑	=
	Résistance à R _e élastique	↑	↑	=
	Allongement à la rupture	↓	=	=
	Allongement au choc	↓	↓	=
	Résistance au fluage	=	↓	=
↑ Augmentation		↓ Diminution		= Pas de variation

Tableau 1.2 Evolution des propriétés mécaniques en fonction des paramètres structuraux [13].

2.3 Caractéristiques du PEHD

Le tableau 1.3 illustre les valeurs indicatives des caractéristiques mécaniques, physiques et thermiques d'un PEHD.

Propriétés	PEHD
Module de Young à 20°C (GPa)	0.55 – 1.00
Taux de cristallinité (%)	73 – 82
Ténacité à 20°C (MPa m ^{1/2})	2 – 5
Résistance à la traction (MPa)	20 – 30
Module en flexion (MPa)	800 – 1100
Température de transition vitreuse Tg (°K)	300
Température de ramollissement Ts (°K)	390
Masse volumique (g/cm ³)	0.95 – 0.98
Conductivité thermique (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.52
Coefficient de dilatation thermique (MK ⁻¹)	150 – 300
Chaleur massique (J Kg ⁻¹ K ⁻¹)	2100

Tableau 1.3 Propriétés du PEHD [9,14].

2.4 Tubes en polyéthylènes

2.4.1 Spécification pour composition de base

Le tableau 1.4 regroupe quelques valeurs de composition de base pour les tubes en polyéthylènes

Caractéristiques	Spécification	Paramètres d'essai	Méthodes d'essai
Tenue aux composants des gaz	≥ 20 h	80° C, 2 MPa	NF-T54-065
Teneur en noir de carbone	2,0 à 2,6% en masse		ISO 6964 ou NF T51- 140
Teneur en matière volatile	≤ 350 mg/kg		NF EN 12099
Dispersion du noir de carbone	≤ 3		ISO 11420 ou NF T51- 142

Tableau 1.4 Composition de base [15].

2.4.2 Caractéristiques et classification

Les tubes polyéthylènes sont caractérisés par :

- La classification de la résine : PE 40 - 63 - 80 - 100
- Le SDR: Diamètre extérieur / Epaisseur
- La pression nominale

- La MRS (Minimal Required Strenght) ou " contrainte minimale requise ", origine de la classification des résines en PE (tableau 1.5). L'appellation retenue par la future norme européenne donne à la fois la " résistance hydrostatique à long terme " et la MRS de la résine, en tenant compte du coefficient de sécurité fixé à 1,25.

La MRS de la résine utilisée est le paramètre selon le quel les canalisations en polyéthylène se classent. Des normes d'utilisation fixent le cadre conventionnel des comparaisons entre plusieurs résines PE sur une durée de 50 ans à une température de 20° C. D'une façon générale, la tenue d'une canalisation est fonction de sa durée et de sa température d'utilisation [15].

Classification résine (Selon ISO)	Contrainte minimale requise (MRS)	Résistance hydrostatique à long terme (à 20° C)
PE 100	10,0 MPa	8,0 MPa
PE 80	8,0 MPa	6,3 MPa
PE 63	6,3 MPa	5,0 MPa
PE 40	4,0 MPa	3,2 MPa
PE 32	3,2 MPa	2,5 MPa

Tableau 1.5 Classification de la résine [15].

2.4.3 Domaine d'utilisation

Il existe plusieurs applications intéressantes, on distingue [15]:

- Les conduites de transport de pétrole, fuel, gaz, eau potable;
- Les conduites de ventilation et de dépoussiérage;
- Le gainage de câbles;
- L'irrigation et le drainage;
- Les conduites de transport de pâtes cellulosiques.

2.5 Caractéristiques des tubes en PEHD

2.5.1 Caractéristiques physiques

Le tableau 1.6 illustre quelques valeurs de caractéristiques physiques des tubes en polyéthylène haute densité.

Caractéristiques	Spécification	Paramètres d'essai	Méthode d'essai
Retrait à chaud	≤ 3% aspect conservé	110° C	ISO 2505-1 ISO 2505-2
Masse volumique conventionnelle	≥ 930 Kg/m ³	23° C	ISO 1183 NF T 51063
Temps d'induction à l'oxydation (stabilité thermique)	> 20 min	200° C	ISO/TR 10837

Tableau 1.6 Valeurs des caractéristiques physiques.

2.5.2 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques des tubes en polyéthylènes sont montrées sur le tableau 1.7.

Caractéristiques	Spécifications	Paramètres d'essais	Méthode d'essais
Résistance hydraulique	Tenue ≥ 100 h	20° C PE80 9,0 Mpa PE100 12,4 Mpa	ISO 1167
	Tenue ≥ 165 h Tenue ≥ 1000 h	80° C 4,6 Mpa 4,0 Mpa 5,5 Mpa 5,0 Mpa	EN N 921
Traction Contrainte de seuil	PE80 ≥ 15 Mpa PE100 ≥ 19 Mpa		ISO 6259-3 EN 638
Allongement à la rupture	$\geq 350\%$		
Tenue à la fissuration rapide : essai S4 Pression critique pe S4	Pour 4 bar: 0,94 bar	0° C	EN ISO 13477

Tableau 1.7 Valeurs des caractéristiques mécaniques.

2.5.3 Caractéristiques dimensionnelles

Le tableau (1.8) regroupe des valeurs indicatives des caractéristiques dimensionnelles de tubes en PEHD.

Diamètre extérieur nominale (mm)	SDR (1)	Epaisseur nominale (mm)	Tolérance (mm)		Ovalisation Absolue maximale		Masse métrique Kg/m
			Sur diam. Extérieur moy.	Sur épaisseur	Sur tube droit (mm)	Sur tube enroulé (mm)	
20		3,0	+0,3 0	+0,4	1,2	1,2	0,162
40	11	3,7	+0,4 0	+0,5 0	1,4	2,4	0,428
63	11	5,8	+0,6 0	+ 0,7 0	1,5	3,8	1,050
90	11	8,2	+ 0,9 0	+ 1,0 0	1,8	5,4	2,130
125	11	11,4	+ 1,0 0	+ 1,3 0	2,5	7,5	4,090
160 200	11	14,6	+ 1,0 0	1,6 0	3,9	9,6	6,70
200	17,6	11,4	1,2 0	+1,3 0	4,0		6,800

Tableau 1.8 Valeurs dimensionnelles.

2.6 Application des tubes en PE

Le polyéthylène de basse densité (LDPE) est souvent transformé par extrusion en profilés et en tubes. Les tuyaux en LDPE ont des diamètres rarement supérieurs à 100 mm et sont très appréciés en agriculture, car n'ayant pas la rigidité du PVC, ils peuvent être réceptionnés sur les lieux d'utilisation sous forme de rouleaux. Ils sont déroulés en tranchée sur de grandes longueurs. Le polyéthylène est en général coloré en noir de carbone fortement dispersé (2.3 %), afin d'éviter un vieillissement prématuré. Il est extrudé sur mono-vis 15 ou 20 D, avec un taux de compression de 3 et une température entre 150°C (entrée) et 200°C (filière).

Le HDPE donne des produits plus rigides. On peut, par mélange avec le LDPE, obtenir des tubes de rigidités intermédiaires entre les rigidités des deux qualités de PE. Le mélange des granulés se fait en toutes proportions et l'extrusion ne donne pas lieu à des difficultés particulières [16].

L'extrusion des granulés sur mono-vis 20 à 25 D est faite à un taux de compression 3-3.5 et une température d'extrusion de 200° (entrée) à 240°C (filière). Les PE de moyenne densité sont aussi sollicités comme le HDPE dans des conditions similaires. Les applications sont nombreuses et intéressantes parmi lesquelles, il y a [11]:

- Conduites de transport de pétrole, fuel, gaz, eau salée;
- Conduite de transport de pâtes cellulosiques;
- Conduites de ventilation et de dépoussiérage; irrigation et drainage dans les cultures;
- Tubes de protection des câbles téléphonique.

3 Mode de Fabrication

3.1 Matériau étudié et modes d'obtention des éprouvettes

Les matériaux considérés sont des tubes en polyéthylène de haute densité (PEHD 100), de diamètres extérieur 200mm et intérieur 177,2mm destinés à la distribution de gaz naturel, ils sont de fabrication algérienne (Chiali).

Les caractéristiques mécaniques de ces matériaux dépendent étroitement du mode d'obtention des éprouvettes et donc du fini de surface. La préparation des éprouvettes, conformément à la norme ISO 178 fait appel au moulage et à l'extrusion ou à l'usinage. Au niveau de la transformation, une installation d'extrusion des profilés comprend l'extrudeuse, l'ensemble tête droite, la filière, le système de refroidissement avec calibrage éventuel, le système de tirage chenille ou corroieur à tapis et le système de réception du profilé terminé.

La Figure 1.2 montre une installation d'extrusion de tubes en PE. Elle se compose essentiellement d'un cylindre chauffé, appelé le corps, dans lequel est montée une vis d'Archimède. Sous l'action d'une puissance motrice, la vis d'Archimède assure les fonctions de transport de matière associé à un travail de malaxage du matériau plastique contre les parois intérieures du cylindre. Au bout de la vis est souvent intercalée une grille qui a pour rôle de retenir les corps étrangers et d'exercer une contre pression sur le produit améliorant ainsi la plastification. D'autre part de la grille est placée la tête boudineuse, sorte de chambre dans laquelle se regroupent les «boudins» sortant de la grille, ou bien s'écoule la matière

matière fondue (en cas d'absence de grille) avant de passer dans la filière proprement dite qui donnera la forme définitive à la matière plastique [11].

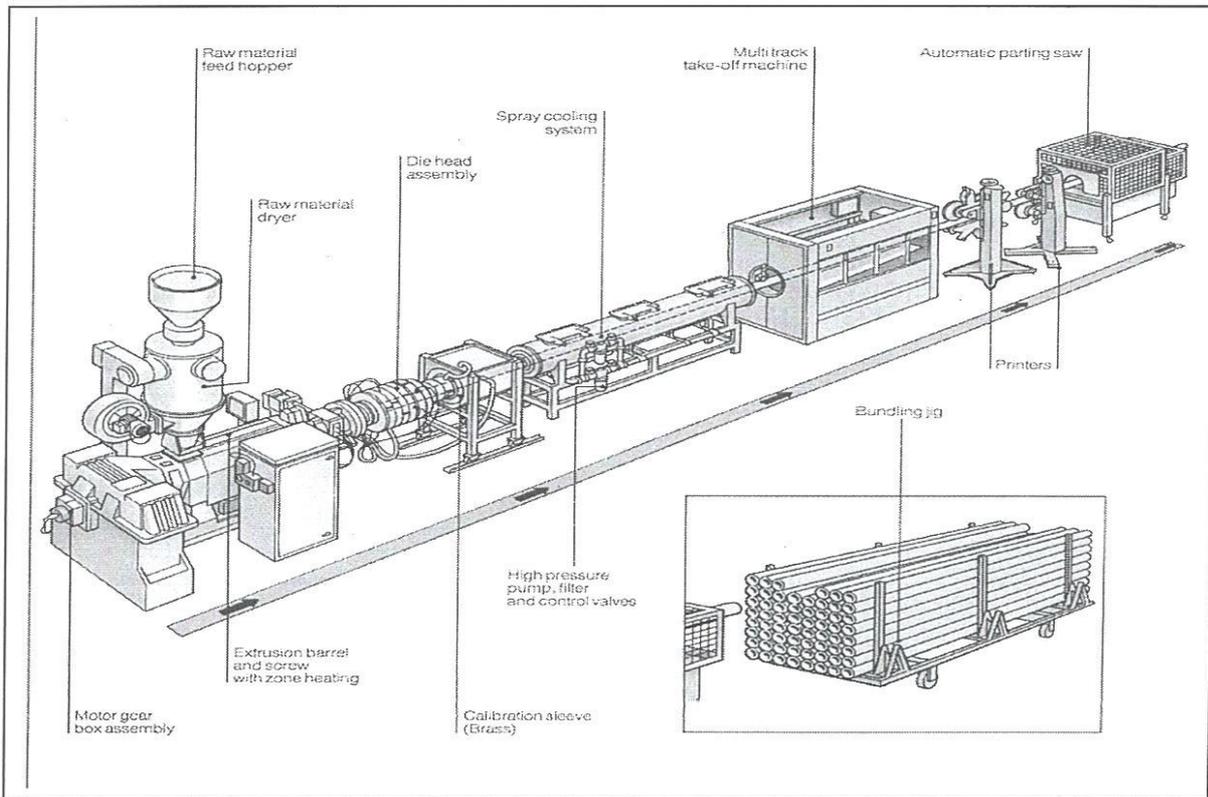


Figure 1.2 Vue d'ensemble d'une extrudeuse.

3.1.1 Extrusion de tubes

Pour la mise en forme des polymères l'extrusion est le procédé le plus utilisé, et en particulier les thermoplastiques. Ce procédé a pour objet la transformation de la matière thermoplastique en une masse visqueuse homogène, susceptible de s'écouler à débit constant à travers une filière, sous l'effet d'une pression pour fabriquer des produits finis ou des semi produits (films, plaques, tubes, profilés, isolation de câbles.....).

Les problèmes rencontrés lors de l'extrusion sont les difficultés liées à l'obtention d'une épaisseur homogène sur toute la périphérie du tube, et le contrôle de la température pour éviter tout échauffement préjudiciable à la qualité du produit [17].

3.1.1.1 L'extrudeuse

L'extrudeuse est une machine alimentée en matière pulvérulente par une trémie. L'extrudeuse mono vis, dans laquelle une vis de type Archimède tourne à l'intérieur d'un fourreau cylindrique, ce dernier est généralement muni de colliers chauffant électriques reliés à un ensemble de régulateurs qui régulent la température le long du fourreau.

La fonction principale de l'extrudeuse est de fondre le polymère, le mettre en pression et le mélange du polymère fondu, afin d'alimenter dans de bonnes conditions la filière en tête, qui donnera sa forme au produit fabriqué. Quelques valeurs indicatives de réglage de température d'extrusion du polyéthylène haute densité sont montrées dans le tableau 1.9.

Matière	Pression en MPa	Température en °C				
		zone d'alimentation	zone de compression	zone de pompage	tête	filière
PE haute densité	100-180	140	160	165	165	170

Tableau 1.9 Valeurs des températures d'extrusion [18].

D'après les observations qui ont été faites sur l'état du polymère dans la machine en régime permanent, on peut distinguer trois zones phénoménologiques (figure 1.3):

- la zone d'alimentation, ou le polymère est entièrement solide (en granulés ou en poudre, plus au moins compacté);
- la zone de plastification, ou coexistent le polymère encore solide et le polymère déjà fondu;
- la zone de pompage, ou le polymère est totalement fondu [17].

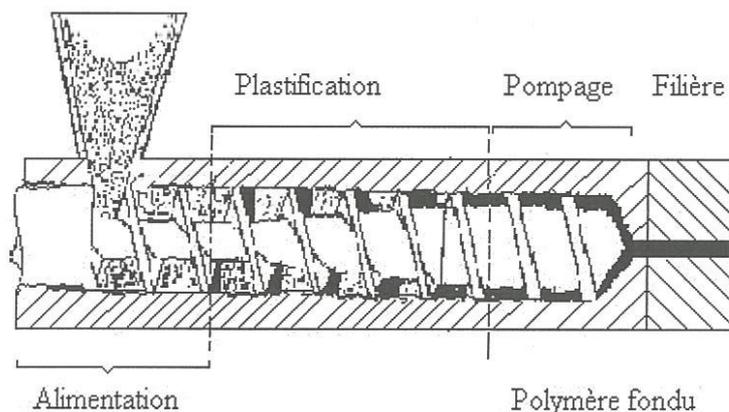


Figure 1.3 Extrudeuse mono vis [17].

3.1.1.2 La filière

Le rôle principal de la filière d'extrusion figure (1.4) est de fournir à la sortie de l'outillage un produit aux dimensions requises, uniforme en température. Ceci est particulièrement important pour les phases qui suivent l'extrusion proprement dite (étirage, conformation, refroidissement...), pour lesquelles toute hétérogénéité en sortie de filière ne pourrait qu'être aggravée et conduit éventuellement à un produit incorrect [17]. Le polymère fondu, est distribué autour d'un mandrin relié au corps de la filière par l'intermédiaire d'ailettes. En sortie, le tube passe dans une filière dite froide, ou conformateur, composée d'un anneau refroidi et percé de trous par lesquels l'eau sous pression vient figer la surface extérieure du tube tout en lubrifiant son déplacement. Une légère surpression appliquée à l'intérieur du tube permet de lui conserver la géométrie cylindrique et le plaquer sur la filière froide.

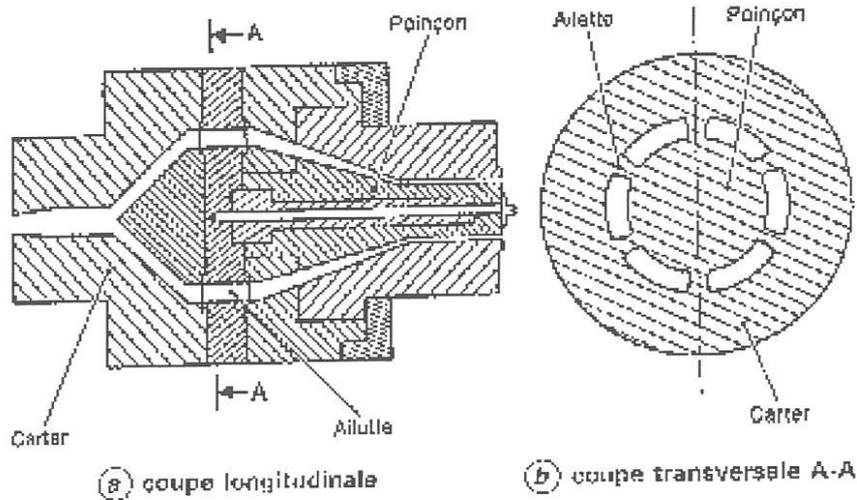


Figure 1.4 Filière de tubes [17].

3.1.1.3 Le refroidissement

Le refroidissement se fait par déplacement dans un ou plusieurs bacs d'eau avant d'être découpé à la longueur requise [14]. Plusieurs types de conformateurs dans lesquels les parois encore chaudes et déformables sont plaquées contre les faces refroidies du calibre par la pression de l'air à l'intérieur du tube ou par le vide créé, agissant de l'extérieur. Un des systèmes, nommé "conformation en bac d'eau sous vide", est très répandu. Il se compose d'un long réservoir fermé, rempli aux deux tiers d'eau froide constamment renouvelée. L'air au-dessus de l'eau est maintenu sous une dépression de 300 Pa [18]. Le calibrage dans un bac sous vide limite les efforts de frottement entre tube et calibre [14].

3.1.1.4 L'étirage

A la sortie de la filière le profil qui sort et pour que ne se déforme pas immédiatement, on le soumet à la traction ce qui contribue en partie au maintien de sa forme et de l'épaisseur des parois. L'effort de traction doit être ajusté à la vitesse de sortie du profil. Ce rôle est assuré par un dispositif de tirage qui agit sur le profil refroidi et dont la vitesse est réglée et contrôlée avec précision. Le dispositif de tirage conditionne les dimensions du profil et applique l'effort nécessaire au passage dans le conformateur. Pour les tubes, on utilise plus fréquemment les tireurs à chenilles.

Les tubes fabriqués par extrusion peuvent avoir des diamètres non conformés, ou non calibrés à l'extérieur ou à l'intérieur. Les dimensions des tubes non conformés sont réglées par la vitesse de tirage et la vitesse de refroidissement [18].

3.1.1.5 L'extrudat

Les tubes rigides sont sciés à la longueur désirée, une scie circulaire suit le profil dans son mouvement d'avance, elle est entraînée par le profil lui-même, et commandée automatiquement par un contacteur électrique. Les tubes souples sont dans la plupart des cas enroulés sur des bobines dont la rotation est liée à la vitesse de tirage.

3.1.2 Les produits obtenus

Les produits obtenus sont des tubes en polyéthylènes qui doivent avoir des surfaces extérieurs et intérieurs lisses et propres et être exemptes de défauts, tels qu'ils soient susceptibles d'être nuisibles à leur qualité, rayures, piqûres, grains, bulles, soufflures et criques.

Leur examen est effectué à l'œil nu, sur des éprouvettes ouvertes selon deux génératrices diamétralement opposées. Les extrémités des tubes doivent être coupées proprement et perpendiculairement à l'axe du tube. Les filets de repérage jaunes sont au moins au nombre de trois, répartis également sur la circonférence du tube figure (1.5). Ces filets doivent avoir une faible épaisseur et une faible largeur de façon à ne pas modifier les caractéristiques physiques et mécaniques des tubes. Le contrôle dimensionnel des tubes se fait automatiquement en ligne d'extrusion par scanner.

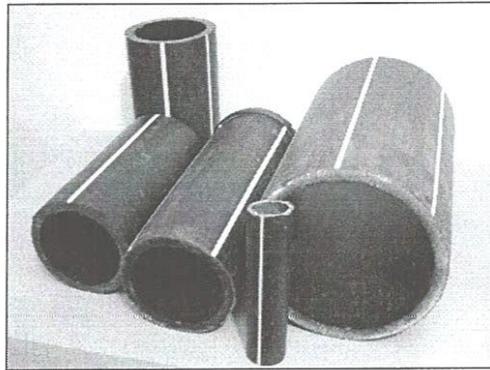


Figure 1.5 Tubes en PEHD pour distribution de gaz.

CHAPITRE 2

TRAVAUX REALISES DANS LE DOMAINE

Davide S.A. et autres [19] ont travaillé sur une méthode d'essai capable de mesurer le déclenchement de fissures sur un spécimen de polymère. La technique développée se compose d'expériences de flexion à trois-points sur des petites poutres rectangulaires suivi d'observations optiques de basse puissance pour identifier la longueur et la taille de la région fissurée, et par conséquent l'effort auquel les fissures deviennent évidentes. La technique est employée pour mesurer l'effort de déclenchement de fissure en fonction du temps à l'air libre et en glycol de diéthylène. L'environnement liquide influe sur le seuil d'effort auquel la fissure peut avoir lieu.

Pour ce qui est du travail des M.A. Rodriguez-Pérez et autres [20], il s'articule sur des procédures de conception expérimentales appliquées, des techniques d'analyse telles que la calorimétrie à balayage différentiel (DSC). Le but est de discuter de manière systématique, les facteurs influençant le procédé de mesure utilisé pour la caractérisation mécanique de plastiques en flexion trois points. Le nombre important de facteurs impliqués dans le procédé de mesure le rend difficile et pour cette raison que la méthode de Taguchi a été employée. Comme elle a été précédemment rapportée, cette méthode peut être d'un grand intérêt pour l'amélioration de la qualité des processus dans lesquels l'exécution dépend de beaucoup de facteurs. Elle peut être employée pour optimiser les paramètres donnant le nombre d'expériences nécessaires.

Nadjette KLIASS et Kamel CHAOUI [21] ont travaillé sur l'étude de la variance des propriétés mécaniques dans les tubes en HDPE en réalisant des essais de traction représentés en contrainte - déformation sur des éprouvettes préparées par dressage ou chariotage de tubes sous la forme de filaments parallélépipédiques. Les résultats obtenus montrent l'effet des hétérogénéités dues au processus de fabrication et qui font varier les propriétés mécaniques à travers les parois du tube, ainsi que l'effet de différents environnements sur quelques propriétés mécaniques. Les couches internes possèdent des propriétés plus importantes que les autres couches à cause de la présence des contraintes résiduelles positives. Les propriétés mécaniques se trouvent fortement influencées par les différents environnements utilisés notamment les solvants organiques.

S. Mammeri et autres [22] ont étudié les phénomènes de déformation et de rupture des tubes en HDPE sous sollicitations monotones et essai de choc, dans le cadre de la mécanique de la rupture. L'effet de l'usinage en fonction des positions des éprouvettes dans la paroi du tube a été étudié dans les cas de chariotage et d'alésage de filaments d'essais dans le but de retrouver les variations des propriétés mécaniques, l'opération d'alésage améliore l'allongement à la rupture et le module d'élasticité. En revanche, l'opération du chariotage fait diminuer le premier et donne un aspect inverse au second. Les résultats trouvés de la ténacité montrent que le premier type d'éprouvettes à entaille interne, présente la plus grande résistance au choc, suivi par les éprouvettes à entaille externe. Les données confirment l'existence d'une évolution de la microstructure à travers la paroi du tube due essentiellement au procédé de fabrication. Cette conclusion invite à prendre en charge cette variabilité lors du calcul des pressions de service et des effets de trafics routiers.

Nadjette KLIASS et autres [23] ont testées un filament taillé à partir des tubes de gaz en HDPE80 continue et uniforme a faible vitesse de coupe et à profondeur de passe optimale afin de réduire le flux de chaleur et pour éviter les modifications de structures, pour établir la distribution des propriétés mécaniques et morphologiques a travers la paroi du tube, les filaments de chaque couche subissent un essai de traction, les courbes (contrainte-déformation) montrent que le comportement mécanique du tube PEHD est composé de trois zones, il est constaté que les contraintes augmentent de l'extérieur vers des couches intérieures.

Jun Ma et autres [24] ont basés leurs travail sur la mesure de la ténacité sur des éprouvettes en flexion à entaille latérale SENB c'est une opération difficile à réaliser. L'utilisation des lames rasoirs est nécessaire, l'usinage d'une entaille facilite la propagation de deux types de fissures, fissures stable et fissures immédiatement propagées, ils ont étudiés l'influence de ces deux types de fissures sur le facteur de ténacité, ISO13586 et ASTM D5045-99 fournissant deux méthodes de mesure de ténacité en flexion à entaille latérale (SENB) et en essais (CT), quatre types de spécimens SENB, m-SENB, CT et DCB ont été utilisés, les auteurs ont constatés que m-SENB est la plus simple et la plus efficace pour les essais de ténacité.

H.B.H. Hamouda et autres [25] ont travaillées sur les processus d'endommagement en flexion de deux résines de polyéthylène (PE) en matériau souple et fragile. Les observations au microscope électronique à balayage et l'analyse chimique sont employées pour identifier les processus élémentaires impliqués dans le déclenchement et la propagation des fissures. Des deux résines considérées, seule la seconde montre une durée de vie dépendante de la progression de la fissure lente (SCG) (slow crack growth). La nature de la matrice du PE est un facteur prédominant. Les microfissures intra-sphérolitiques peuvent se propager. La propagation a lieu entre les lamelles, apparemment par a glissement des molécules. L'orientation des microfissures est perpendiculaire à l'effort de chargement. Les surfaces cryogéniques de rupture indiquent que la zone sphérolitique provoque des bandes discontinues de progression de la fissure (DCGB) (discontinuous crack growth bands). Dans un spécimen pré-fissuré, seule l'étape de DCGB a lieu en bout de fissure.

David J. Krzypow et autres [26] ont examinés le comportement cyclique uniaxial en traction/compression et l'état d'équilibre de contrainte/déformation de UHMWPE pour développer une relation constitutive cyclique pour UHMWPE. L'hypothèse de cycle résulte d'un changement permanent du rapport contrainte/déformation, c.-à-d., que l'état d'équilibre cyclique représente un nouvel état stabilisé. Les auteurs ont constaté que, comme d'autres polymères, le UHMWPE se ramollit essentiellement en traction qu'en compression.

M. El Fray et autres [27] ont vu les propriétés en fatigue du poly(aliphatic/aromatic-ester) (PED) des copolymères multibloc, évaluées par la méthode de mesure d'hystérésis. Cette méthode de la boucle d'hystérésis permet la numérisation et la détermination des relations de l'effort et de la contrainte avec les autres paramètres, l'énergie stockée, l'énergie perdue et le comportement dynamique en flexion. Les copolymères multibloc peuvent être considérés en tant que bons sujets pour des applications où les matériaux sont soumis à des déformations oscillantes.

L. Fatmi et autres [28] ont travaillé sur l'effet du cyclage du PEHD 80 suivi d'une traction jusqu'à rupture du matériau, à deux niveaux de chargement et à déplacement imposé pour un nombre de cycles allant de 1 à 10000 et à une vitesse donnée sur le comportement mécanique matériau et l'évolution de sa morphologie. Les courbes de comportements mécaniques obtenus montrent que le PEHD 80 présente des boucles hystérésis larges pour les premiers cycles, puis se rétrécissent avec l'augmentation du nombre de cycles, ils ont constaté également qu'un chargement à un niveau donné suivi d'un cyclage du matériau entraîne une augmentation de son module d'élasticité longitudinal. Cette augmentation peut être attribuée à l'augmentation de l'alignement des lamelles. Les observations au microscope optique ont montré une orientation des chaînes macromoléculaires parallèlement à l'axe de traction dont le degré d'alignement est fonction du niveau de chargement.

L. Cangémi et Y. Meimon [29] ont présenté une approche pour la modélisation du comportement des polymères semi cristallins, le modèle est basé sur l'utilisation de la thermodynamique des systèmes ouverts introduisant une équation de couplage mécanique entre une phase solide et une phase fluide suivi par une formulation élastoviscoplastique permettant de décrire la variation du volume des polymères semi cristallins et leurs sensibilité à la vitesse de sollicitation et à la contrainte moyenne, la modélisation est confrontée aux résultats d'essais de traction effectués sur deux types de polymères semi cristallins utilisés dans l'industrie pétrolière.

B. Hichem [30] a étudié l'influence de différents paramètres de la mise en oeuvre sur la cristallisation et les propriétés physiques des polymères étudiées, les polymères choisis sont des polyoléfines : le Polyéthylène Haute Densité (PEHD) et le Polypropylène. Les différents paramètres considérés sont la vitesse et la température d'injection.

F. Mujika [31] a exposé la différence entre l'essai de flexion à trois points et l'essai de flexion à quatre points, il a constaté que expérimentalement les modules de flexion obtenus par des essais de flexion trois-points et quatre points sont différents pour le même spécimen. La pente de la courbe de charge-déplacement augmente à mesure que la charge augmente dans les deux essais, montrant une dégradation apparente du spécimen. Le travail actuel analyse l'effet de la variation de la charge provoquée par la variation d'entre appuis. Ces effets ont été analysés par la théorie classique des poutres sans tenir compte des effets de cisaillement. Des différences expérimentales supérieures à 5% pour le module de flexion ont été obtenues pour le même spécimen testé en flexion trois-points et à quatre-points, en utilisant deux spécimens de composé différent. Après corrections basées sur l'analyse développée, les différences relatives entre les modules d'essais à trois-points et à quatre points pour le même spécimen étaient au-dessous de 1% pour les deux spécimens.

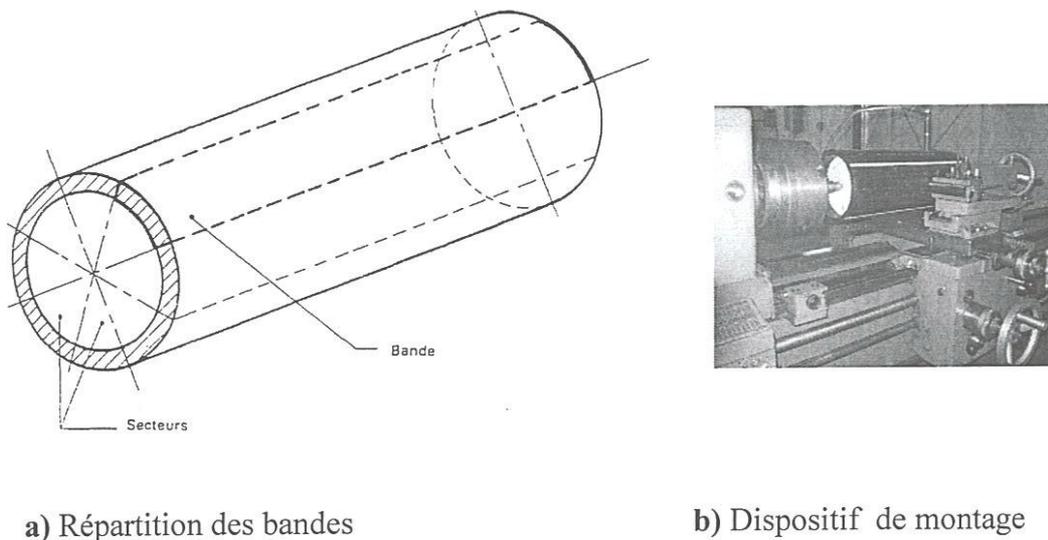
CHAPITRE 3

PROCEDURE EXPERIMENTALE

1 Procédures expérimentales

1.1 Eprouvettes obtenues par usinage

Dans une première étape on prélève par découpage du tube à l'aide d'une lame montée sur le porte outils et d'un dispositif de répartition des bandes de dimensions égales le long de la circonférence du tube (figure 3.1a), des précautions particulières ont été prises afin d'éviter toute déformation de ce dernier.



a) Répartition des bandes

b) Dispositif de montage

Figure 3.1 Localisation des bandes et moyen de leur obtention.

Pour répondre à cette exigence un montage spécifique a été réalisé figure (3.1b), l'exécution de l'opération est réalisée sur un tour universel de type ALMO dotée d'un moteur électrique d'une puissance de 5 KW. La figure (3.2) montre la forme et les dimensions des échantillons à obtenir par usinage.

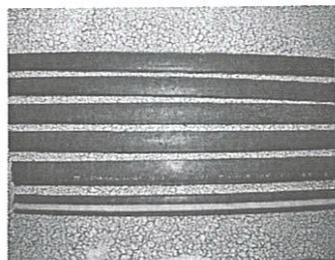


Figure 3.2 Echantillons obtenus

1.2 Régime de coupe et état de surface

Après plusieurs essais et analyse des résultats, nous retenons le régime de coupe donnant le meilleur état de surface pour :

En l'ébauche :

$$V_c=355\text{tr/min}, f=63\text{mm/tr}, a_p=2\text{mm}$$

Pour la finition :

$$V_c=90\text{tr/min}, f=16\text{mm/min}, a_p=0,5\text{mm}$$

L'état de surface est mesuré à l'aide d'un rugosimètre de type SurfTest SJ-301, marque Mitutoyo (figure 3.3)

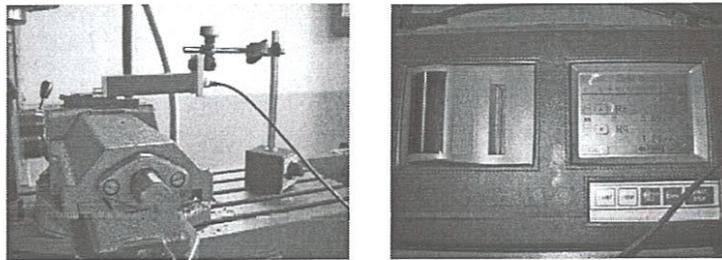


Figure 3.3 Rugosimètre utilisé

1.3 Dimensions des éprouvettes

Les éprouvettes utilisées sont parallélépipédiques (figure 3.4), de dimensions prévues par la norme ISO13586 reportées sur le Tableau 3.1.

Matériaux	b (mm)	W (mm)	$L_t=8*W$ (mm)	$L=4*W$ (mm)
PE100	4	10	80	40

Tableau 3.1 Dimensions des éprouvettes.

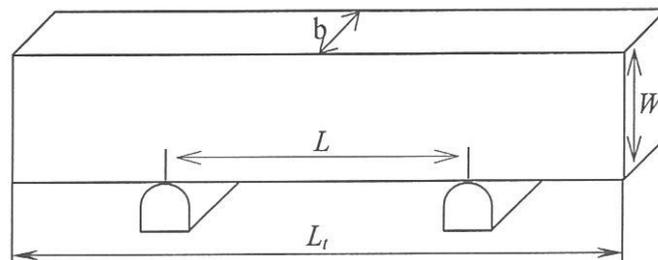


Figure 3.4 Epreuve parallélépipédique

Où

b : est l'épaisseur de l'éprouvette en (mm)

L_t : est la longueur totale de l'éprouvette en (mm) ; $L_t = 8 * W$

W : est la largeur de l'éprouvette en (mm) ; $b = 4$ (mm)

L : est la distance entre appuis en (mm) ; $L = 4 * W$

1.4 Usinage des éprouvettes

L'usinage a été réalisé sur une fraiseuse PMO équipée d'une fraise à 6 dents, la figure 3.5 montre la forme des éprouvettes obtenues.

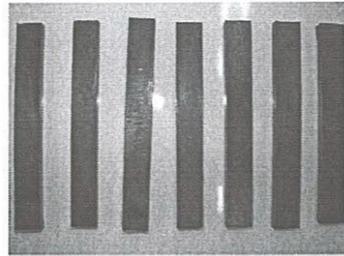


Figure 3.5 Eprouvettes de flexion sans entaille

1.5 Préparation des entailles et des fissures

1.5.1 Réalisation de l'entaille en V

La réalisation de l'entaille est une opération délicate et demande une grande précision, elle nécessite l'utilisation d'une fraise d'angle à 45° et un axe de montage sur une fraiseuse. (figure 3.6)

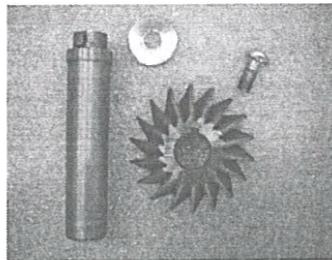


Figure 3.6 Moyens utilisés

L'usinage de l'entaille se fait à $V_c = 355 \text{tr/min}$, $a_p = 0,5 \text{mm}$ et $f = 25 \text{mm/tr}$ à une profondeur de 2mm pour la gamme d'éprouvettes (figure 3.7).

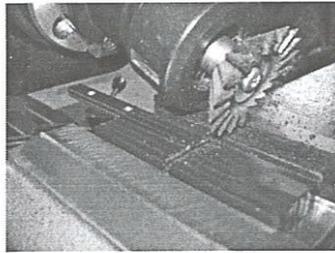


Figure 3.7 Usinage de l'entaille.

1.5.2 Réalisation de la fissure

Le dispositif utilisé pour réaliser les fissures est monté sur une fraiseuse afin de maîtriser les différents déplacements et avoir une meilleure exactitude de la longueur de fissure $a = 0.5 ; 1.5$ et $4,5$ mm (figure 3.8).

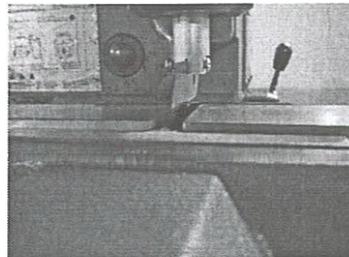


Figure 3.8 Réalisation de la fissure.

1.6 Banc d'essais

Les essais de flexion trois points statiques et cycliques sont réalisés sur une machine d'essai universelle de type ZWICK ROELL Z005, d'une capacité de 5 KN, pilotée par un ordinateur dont le traitement des résultats est effectué à l'aide du logiciel testxpert figure (3.9).

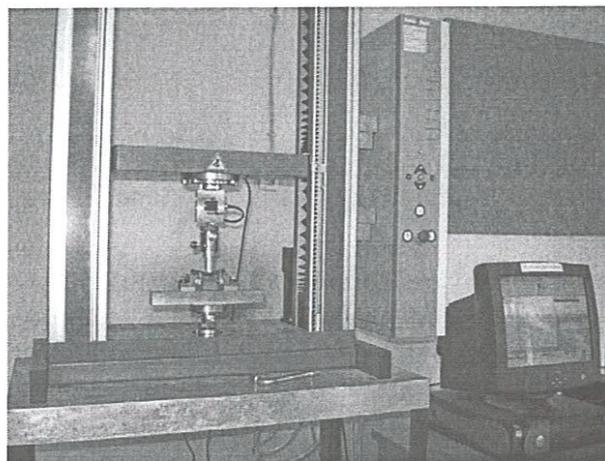


Figure 3.9 Banc d'essais.

2 Essais statiques

Ils traduisent une charge croissante sur l'éprouvette jusqu'à l'effort maximal. Les tests sont effectués sur les échantillons à température ambiante et à vitesse d'essais imposée à 2mm/min.

2.1 Résultats obtenus

Les courbes de comportement charge-flèche obtenues expérimentalement pour des éprouvettes entaillées sans fissure sont illustrées sur la figure 3.10.

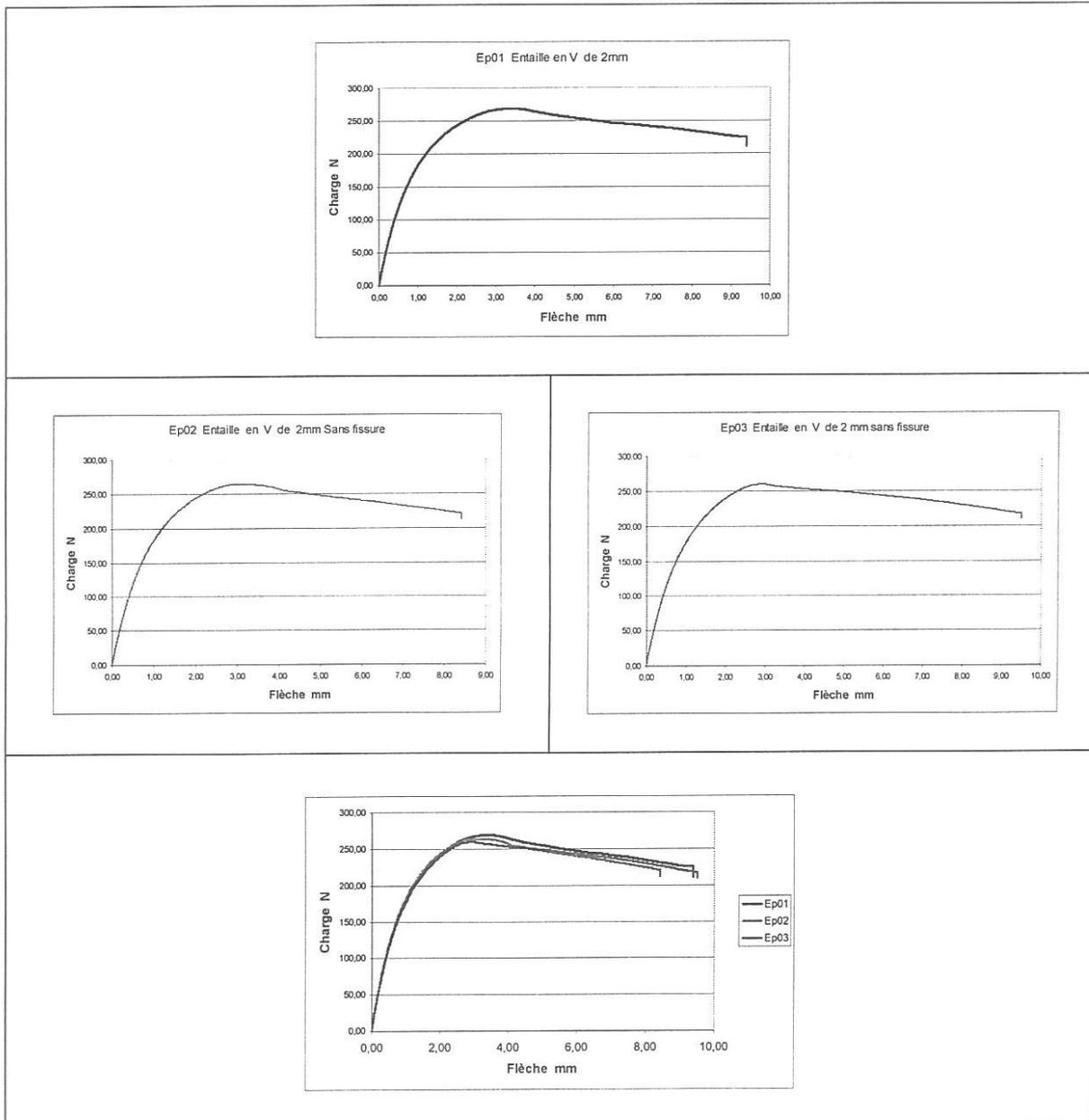


Figure 3.10 Courbes charges – flèches en flexion 3 points statique
Eprouvettes entaillée en V de 2mm de profondeur,
sans fissure pour $V = 2\text{mm/min}$.

De même nous représentons sur les figures 3.11 à 3.13 les courbes de comportement charge-flèche obtenues expérimentalement pour trois éprouvettes entaillées et fissurées à $a = 0.5$; 1.5 et 4.5 mm.

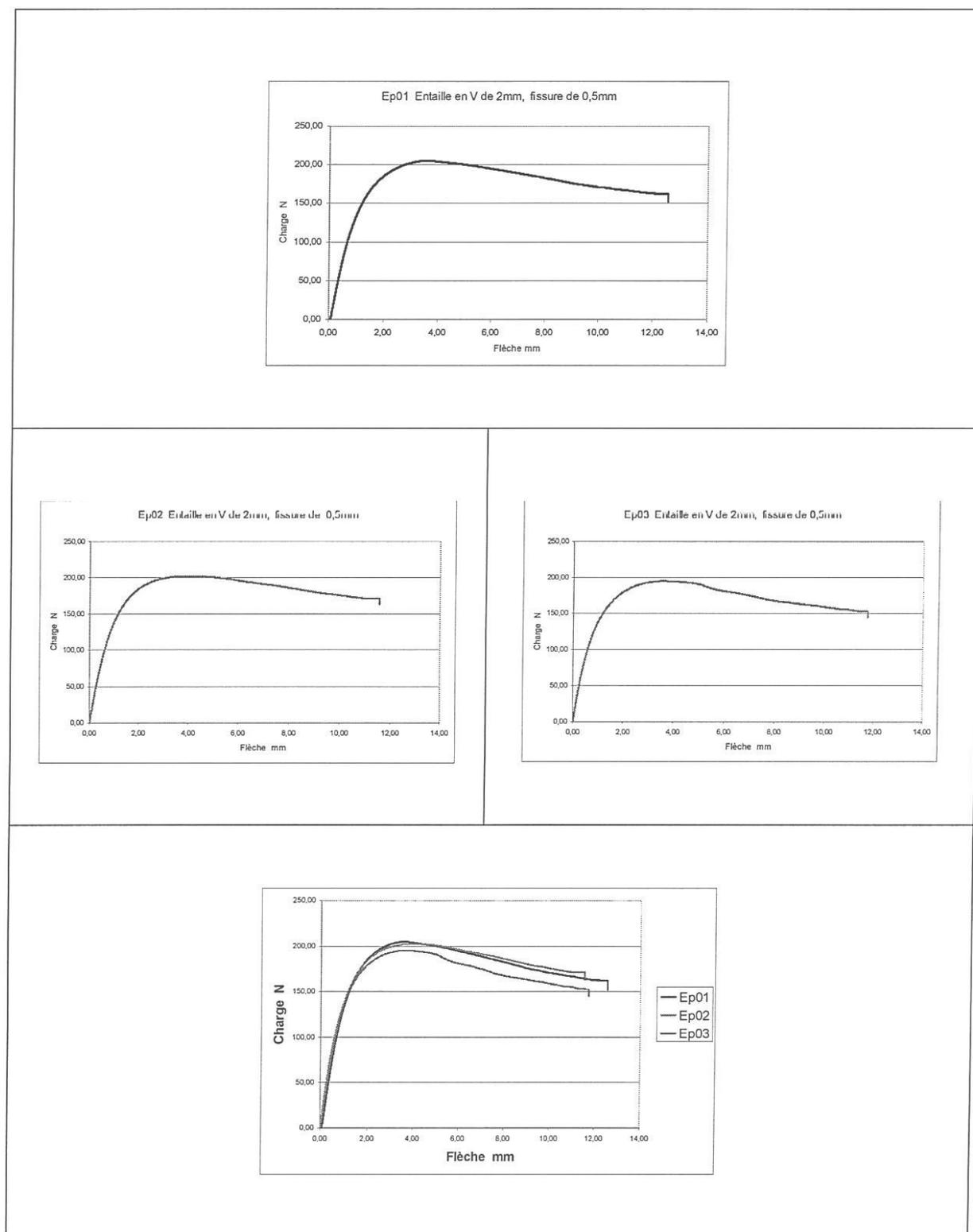


Figure 3.11 Courbes charges – flèches en flexion 3 points statique
Eprouvettes entaillée en V de 2mm de profondeur
et fissurées à $a = 0.5$ mm pour $V=2$ mm/min.

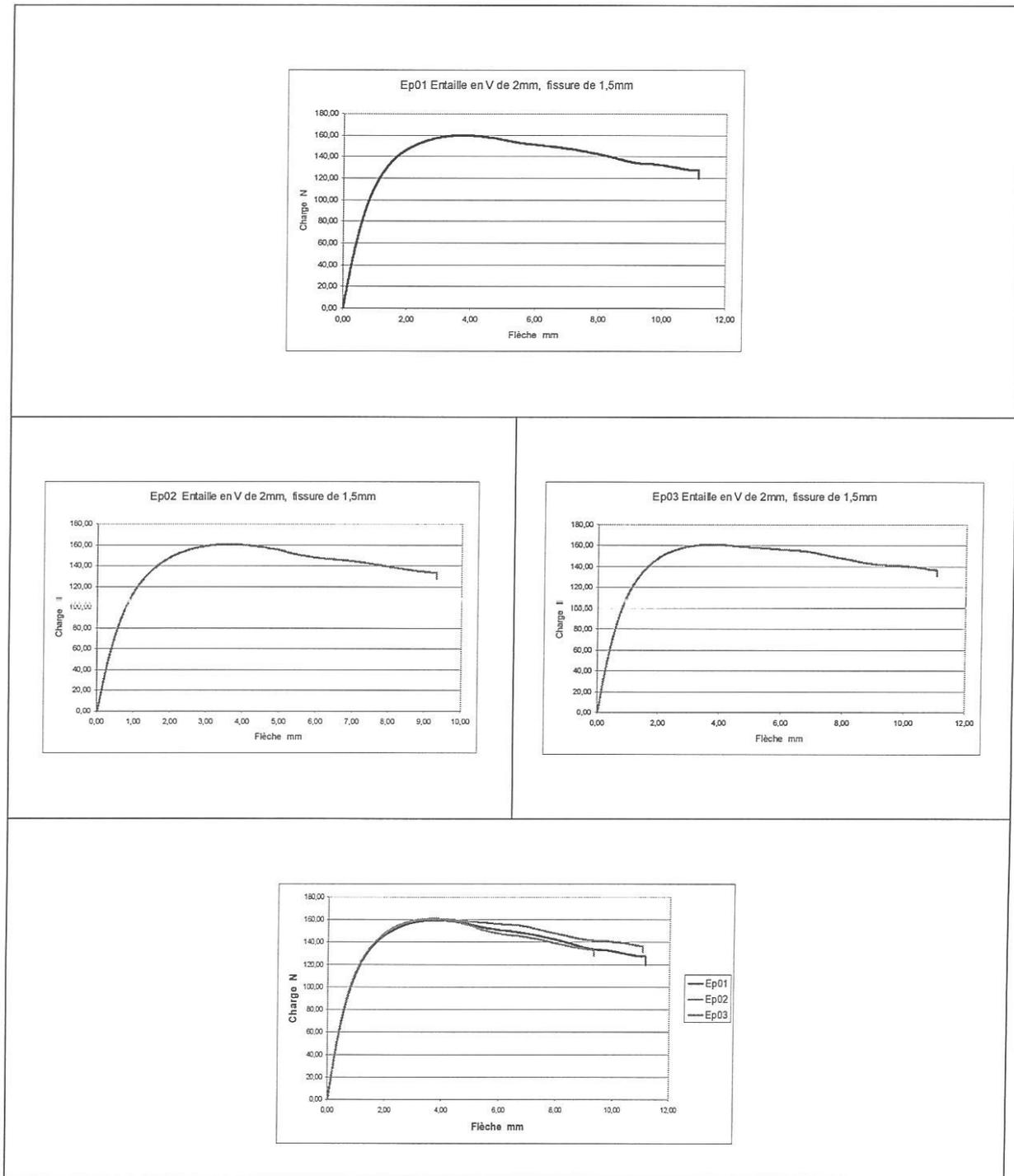


Figure 3.12 Courbes charges – flèches en flexion 3 points statique
Eprouvettes entaillée en V de 2mm de profondeur
et fissurées à $a = 1.5$ mm pour $V=2$ mm/min.

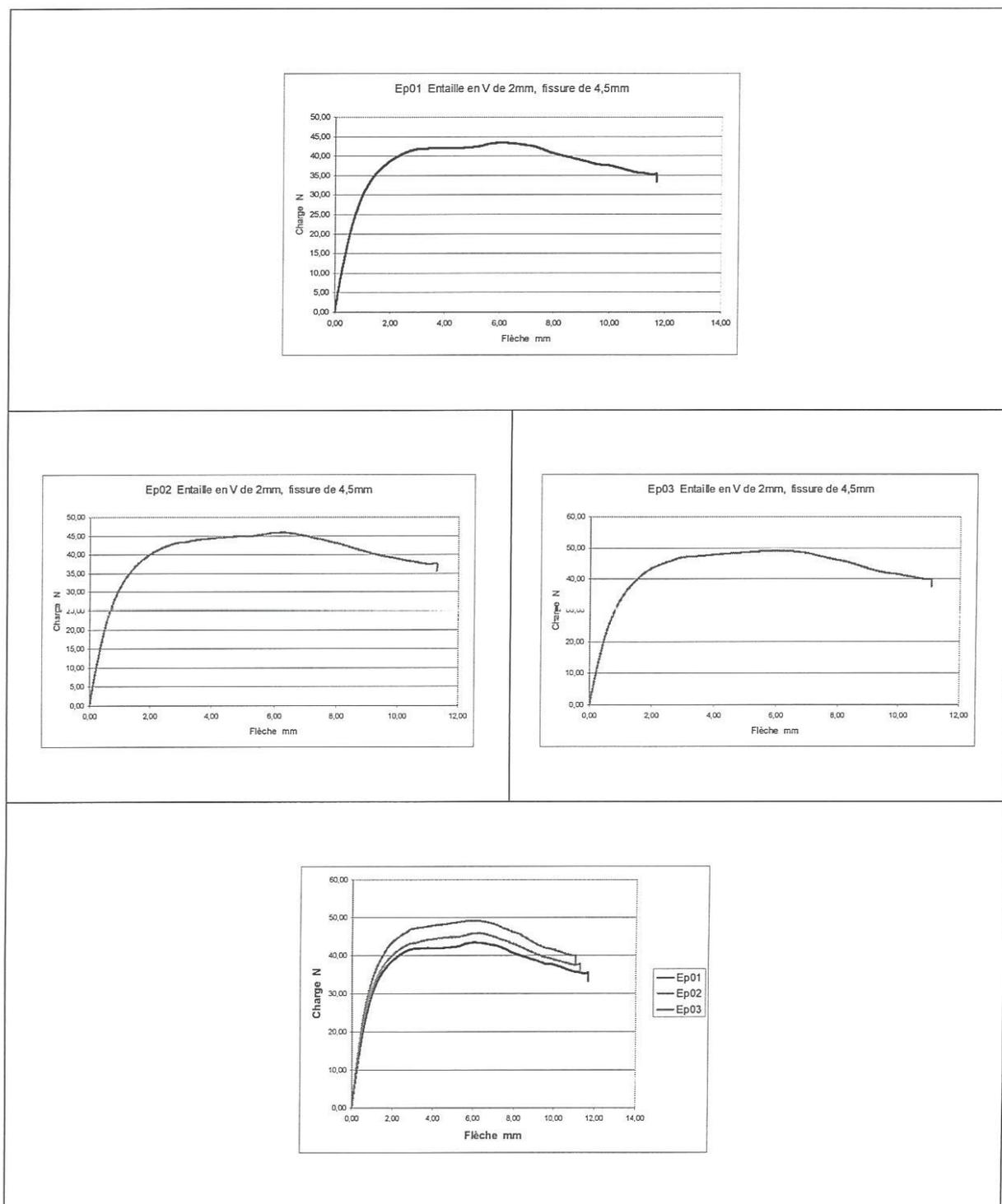


Figure 3.13 Courbes charges – flèches en flexion 3 points statique
Eprovettes entaillée en V de 2mm de profondeur
et fissurées à $a = 4.5$ mm pour $V=2$ mm/min.

Un graphe récapitulatif regroupant les courbes de comportement charge-flèche obtenues expérimentalement pour les différentes séries d'éprouvettes testées est montré à la figure 3.14.

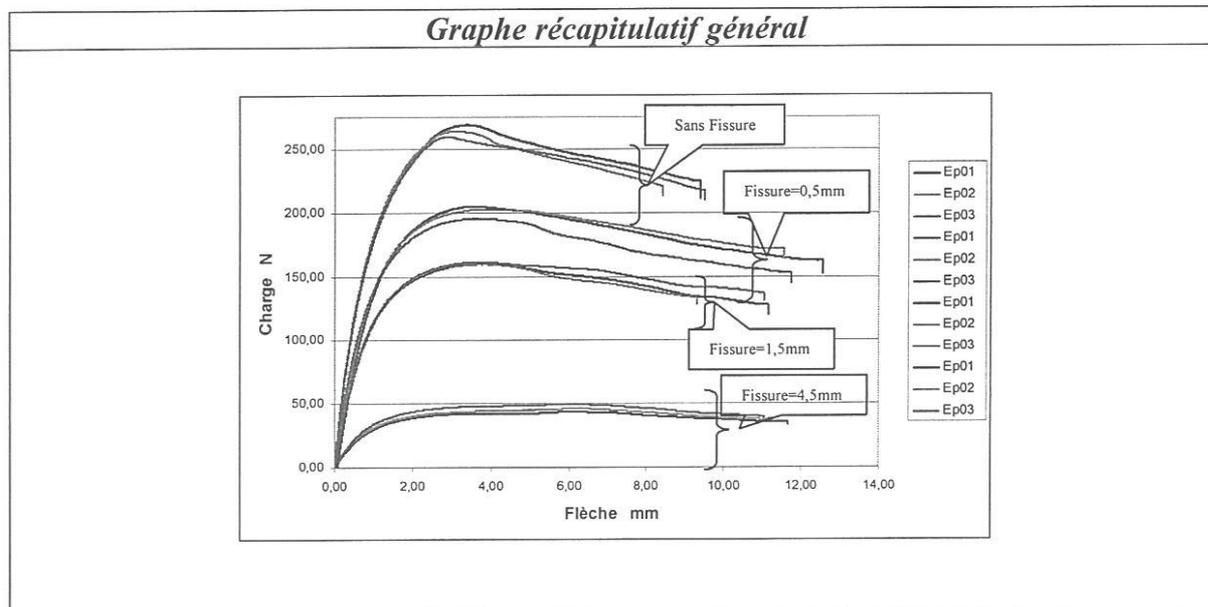


Figure 3.14 Courbes récapitulatives charges – flèches en flexion 3 points statique
Éprouvettes entaillées en V de 2mm de profondeur
Saines et fissurées pour $V = 2\text{mm/min}$.

Nous reportons sur le tableau 3.2 les valeurs moyennes des efforts maximaux obtenues pour les éprouvettes entaillées de 2mm de profondeur avec et sans fissures.

Eprouvettes	F_{\max} (N)			
	a=0	a=0,5mm	a=1,5mm	a=4,5mm
01	269,020	204,969	159,858	43,522
02	263,648	202,604	160,487	45,946
03	259,716	195,358	161,117	49,196
Moyenne	264,128	200,977	160,487	46,221

Tableau 3.2 Éprouvettes entaillées avec et sans fissures

2.2 Analyse des résultats

Le graphe récapitulatif figure 3.14 fait apparaître une très faible dispersion des résultats pour chaque famille d'éprouvettes testées. Ces résultats montrent la maîtrise des techniques expérimentales employées. L'augmentation de la valeur de la fissure entraîne une diminution du ligament à casser et donc une baisse de la valeur de la charge à la rupture.

2.3 Mécanismes de rupture

Les observations microscopiques sont faites sur un microscope optique de type hundert WETZLAR, d'un agrandissement de 400 fois (figure 3.15). L'examen des surfaces des éprouvettes avant et après essai des éprouvettes saines et fissurées fait montrer dans le cas des éprouvettes saines un allongement des macromolécules qui s'alignent dans le sens de l'étirement de l'éprouvette figure (3.16).

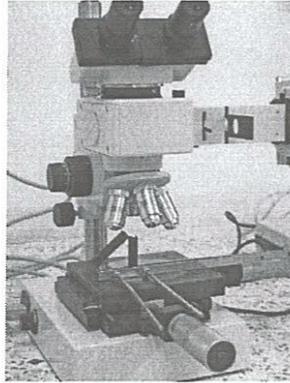


Figure 3.15 Microscope optique.

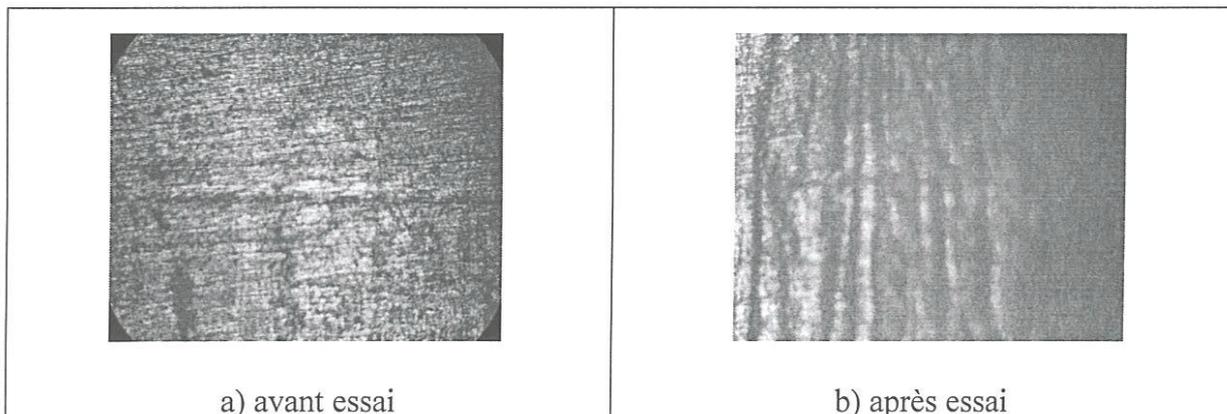


Figure 3.16 Structure du matériau sain.

Dans le cas du matériau fissuré différentes surfaces ont été identifiées (figure 3.17) : surface d'entaille, surface entaillée / surface fissurée et surface fissurée / surface de propagation de la fissure. Après essai nous remarquons une absence de modification de structure de la surface entaillée. Par contre l'alignement des macromolécules commence à la surface fissurée et se propage dans la matière de l'éprouvette.

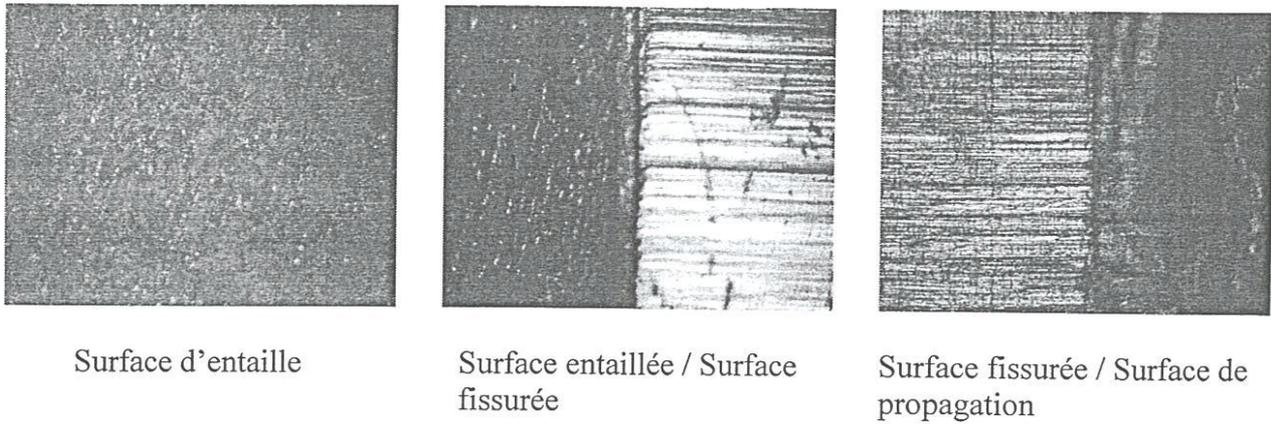


Figure 3.17 Faciès de rupture du PEHD100 fissuré après essai de flexion 3 points statique

3 Essais cycliques

3.1 Déroulement des essais

Dans le but de voir l'influence du type de chargement d'une part sur le comportement mécanique et d'autre part sur l'évolution de la morphologie de ces matériaux, nous avons procédé dans un premier temps à une caractérisation du matériau en flexion 3 points statique à une vitesse d'essai de 2 mm/min (figure 3.9). Ces essais ont servi de base pour la fixation des paramètres d'essais de flexion cyclique.

Les niveaux de chargement (N_{ch}) retenues sont (0,6 ; 0,7 et 0,8) de la charge à la limite élastique ($N_{ch}=F/F_e$) (Tableau 3.6), pour un nombre de cycles de 100, 1000, 10000 par niveau de chargement et par longueur de fissure (Tableau 3.7). Une fois que les valeurs des flèches ont été déterminées et introduites à la machine, l'essai peut être lancé. Des capteurs de force et de déplacement permettent de suivre au cours de cyclage l'évolution du comportement mécanique du matériau.

Fissure a (mm)	F_e (N)					
	Valeur			Flèche f		
	$F_e / Epr01$	$F_e / Epr02$	$F_e / Epr03$	f / Epr01	f / Epr02	f / Epr03
0,5	86,66	84,44	80,00	0,56	0,49	0,43
1,5	61,60	62,40	64,00	0,42	0,41	0,44
4,5	14,67	16,67	17,20	0,36	0,39	0,37

a) Valeurs de F_e .

Fissure a (mm)	Valeurs de chargements calculés et flèches correspondantes						
	Valeur $F=0.6*F_e$ (N)			Flèche f (mm)			Flèche de test
	F / Epr01	F / Epr02	F / Epr03	f / Epr01	f / Epr02	f / Epr03	
0,5	52,00	50,66	48,00	0,35	0,27	0,23	0,28
1,5	36,96	37,44	38,40	0,24	0,24	0,25	0,24
4,5	8,80	10,00	10,32	0,20	0,21	0,21	0,21

b) Niveau de chargement $F=0.6*F_e$.

Fissure a (mm)	Valeurs de chargements calculés et flèches correspondantes						
	Valeur $F=0.7*F_e$ (N)			Flèche f (mm)			Flèche de test
	F / Epr01	F / Epr02	F / Epr03	f / Epr01	f / Epr02	f / Epr03	
0,5	60,66	59,11	56,00	0,40	0,32	0,27	0,33
1,5	43,12	43,68	44,80	0,28	0,28	0,29	0,28
4,5	10,27	11,67	12,04	0,24	0,25	0,25	0,25

c) Niveau de chargement $F=0.7*F_e$.

Fissure a (mm)	Valeurs de chargements calculés et flèches correspondantes						
	Valeur $F=0.8*F_e$ (N)			Flèche f (mm)			Flèche de test
	F / Epr01	F / Epr02	F / Epr03	f / Epr01	f / Epr02	f / Epr03	
0,5	69,33	67,55	64,00	0,45	0,38	0,32	0,38
1,5	49,28	49,92	51,20	0,33	0,32	0,34	0,33
4,5	11,74	13,34	13,76	0,28	0,30	0,29	0,29

d) Niveau de chargement $F=0.8*F_e$.

Tableau 3.6 Valeurs des flèches imposées en (mm).

Fissures a (mm)	Niveau de chargement								
	$0.6 * F_e$								
	Nombre de cycles								
	100			1000			10000		
	Vitesse de chargement (mm/min)			Vitesse de chargement (mm/min)			Vitesse de chargement (mm/min)		
	2	100	500	2	100	500	2	100	500
0.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3

a) Niveau de chargement $F=0.6*F_e$.

Fissures a (mm)	Niveau de chargement								
	0.7 * F _e								
	Nombre de cycles								
	100			1000			10000		
	Vitesse de chargement (mm/min)			Vitesse de chargement (mm/min)			Vitesse de chargement (mm/min)		
	2	100	500	2	100	500	2	100	500
0.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3

b) Niveau de chargement $F=0.7* F_e$.

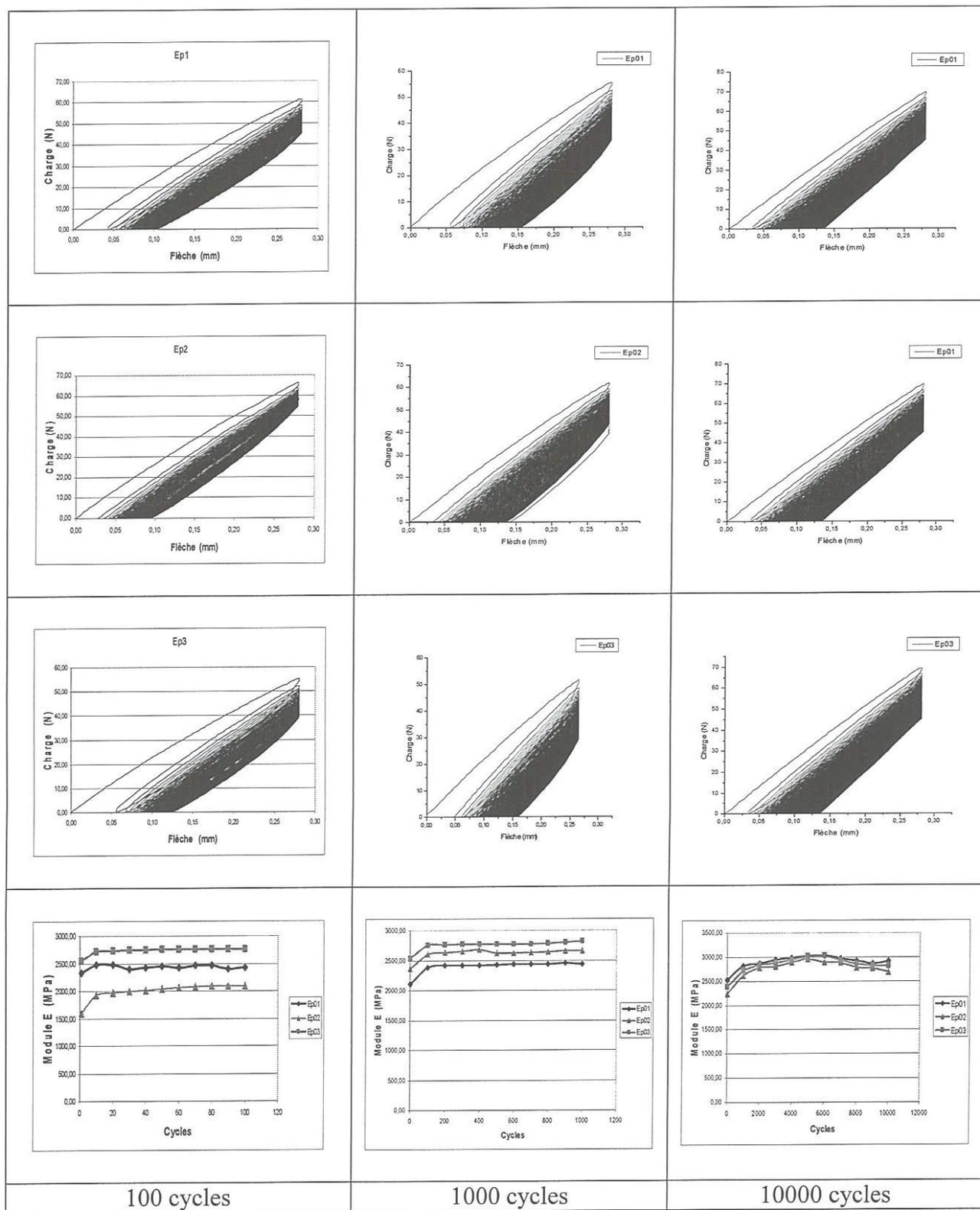
Fissures a (mm)	Niveau de chargement								
	0.8 * F _e								
	Nombre de cycles								
	100			1000			10000		
	Vitesse de chargement (mm/min)			Vitesse de chargement (mm/min)			Vitesse de chargement (mm/min)		
	2	100	500	2	100	500	2	100	500
0.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
1.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4.5	3	3	3	3	3	3	3	3	3

c) Niveau de chargement $F=0.8* F_e$.

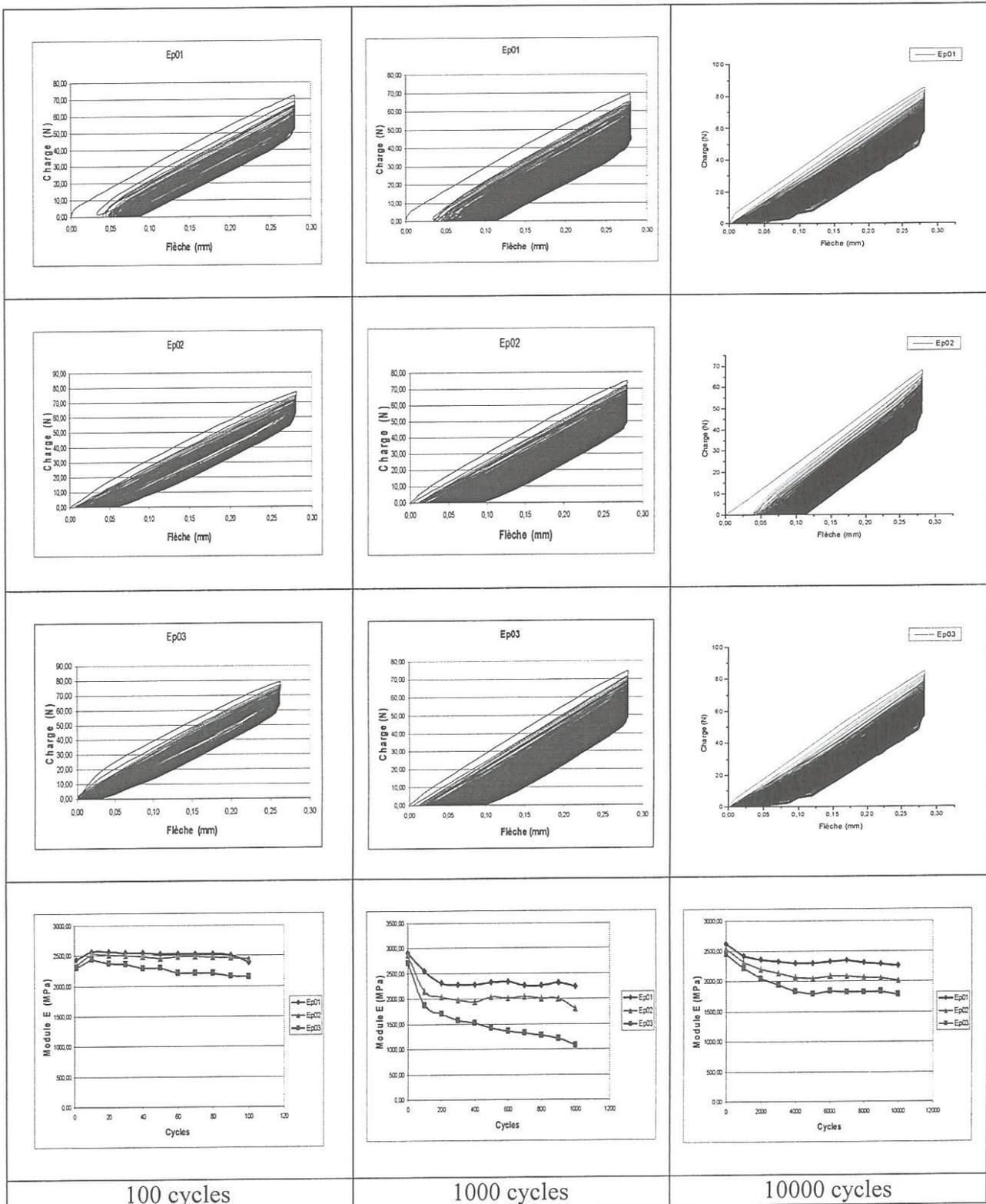
Tableau 3.7 Planning des essais.

3.2 Résultats obtenus

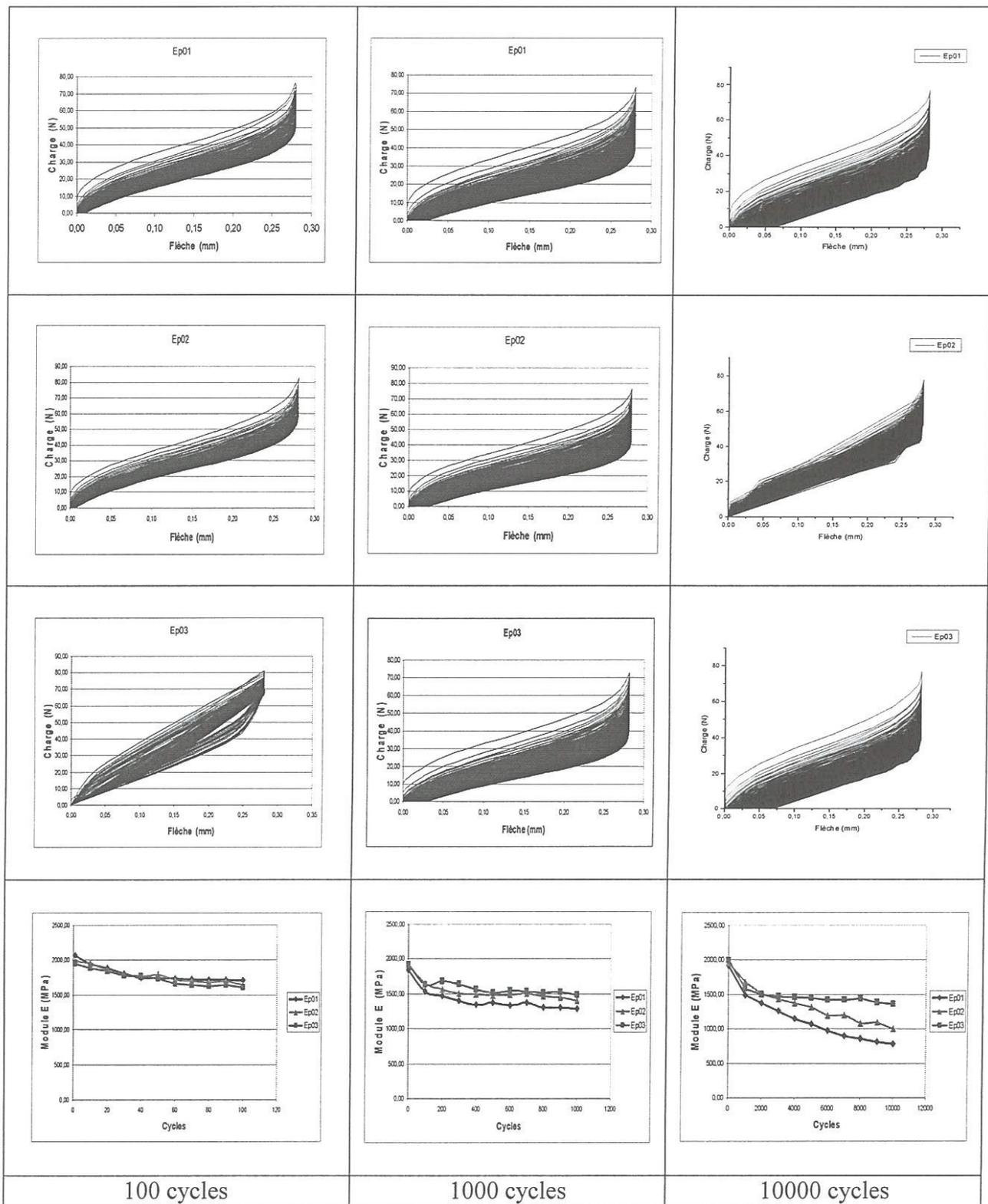
Durant l'essai de flexion 3 points cyclique, nous avons enregistré la force instantanée (F) en fonction de la flèche (f) pour un nombre de cycles donné, une vitesse retenue, une fissure et un niveau de chargement choisis. Les figures 3.18 montrent un exemple des résultats obtenus pour un jeu de données. (Voir Annexe pour les autres résultats)



a) $a=0,5\text{mm}$ $V=2\text{mm/min}$ $F=0,6*F_e$



$$a=0,5\text{mm } V=100\text{mm/min } F=0,6 \cdot F_e$$

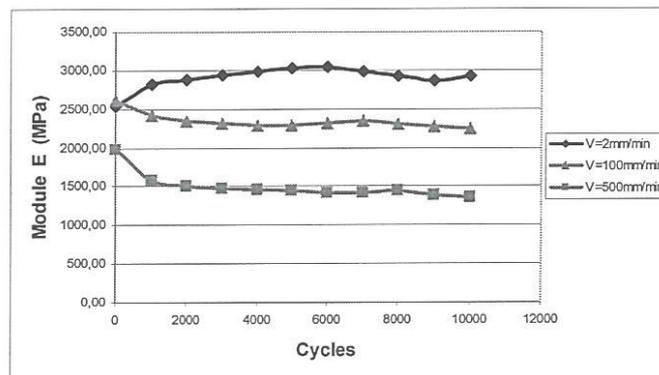


$a=0,5\text{mm}$ $V=500\text{mm/min}$ $F=0,6*F_e$

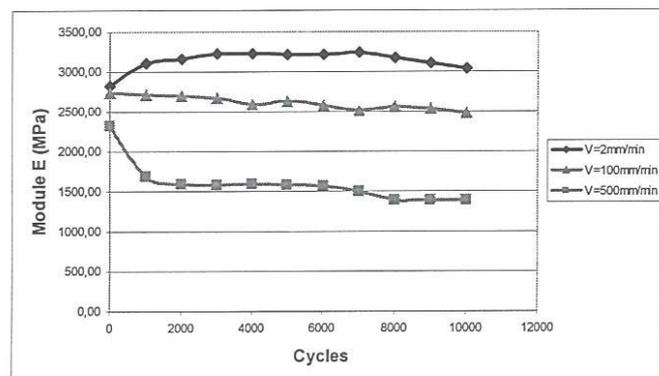
Figure 3.18 Courbes de comportement mécanique expérimental Charge-flèche en flexion trois point cyclique

3.3 Analyse et discussion des résultats point de vue comportement

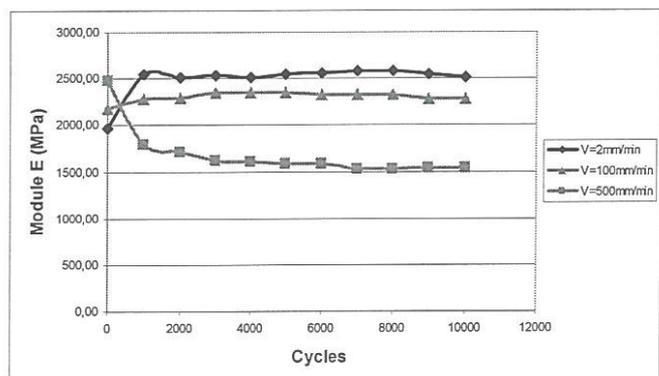
Pour pouvoir analyser ces résultats nous avons jugé utile de voir l'influence de deux paramètres important à savoir la vitesse et le niveau de chargement sur le comportement mécanique expérimental du matériau considéré. Nous reportons sur les figures 3.19 et 3.20 l'effet des deux paramètres en fonction du nombre de cycles.



a- $F=0.6 \cdot F_e$.

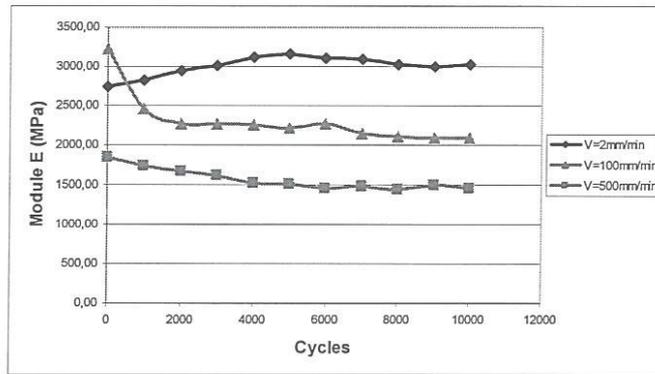


b- $F=0.7 \cdot F_e$.

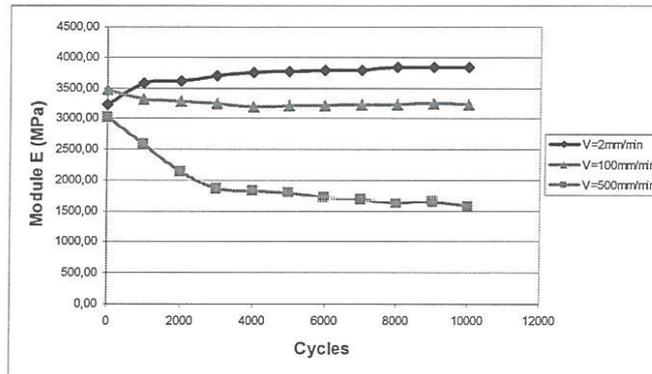


c- $F=0.8 \cdot F_e$

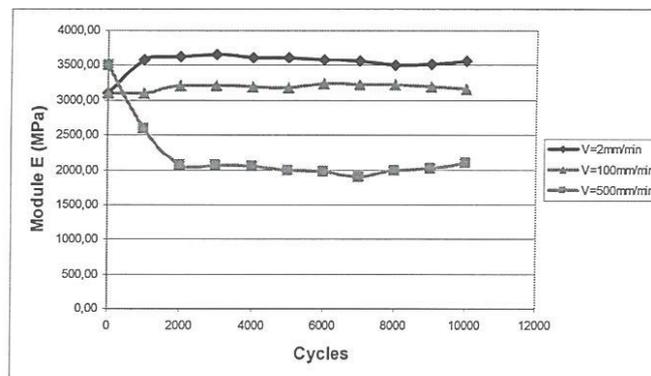
a) pour $a = 0.5 \text{ mm}$



a- $F=0.6 \cdot F_e$.

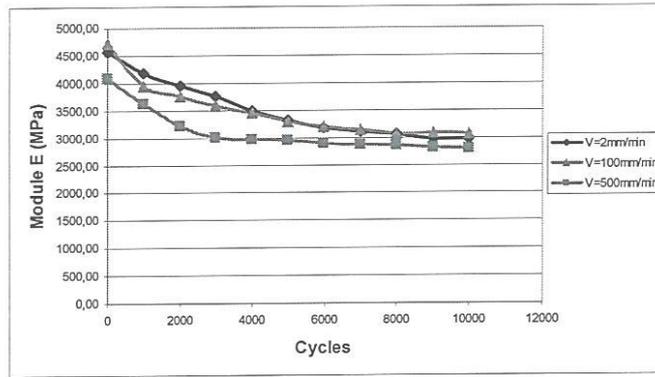


b- $F=0.7 \cdot F_e$.

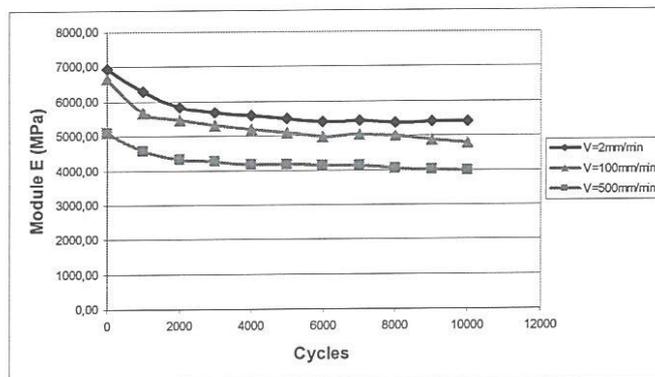


c- $F=0.8 \cdot F_e$.

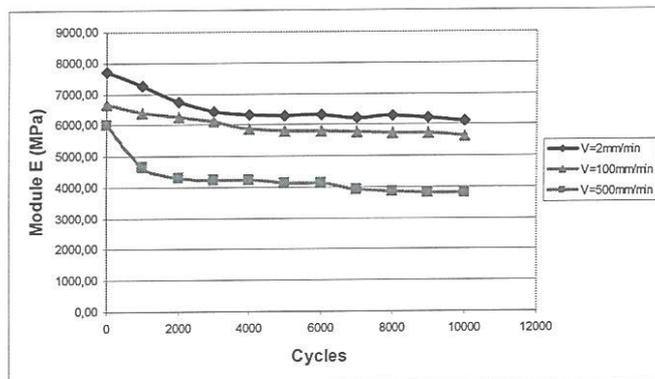
b) pour $a = 1.5 \text{ mm}$



a- $F=0.6 \cdot F_e$.



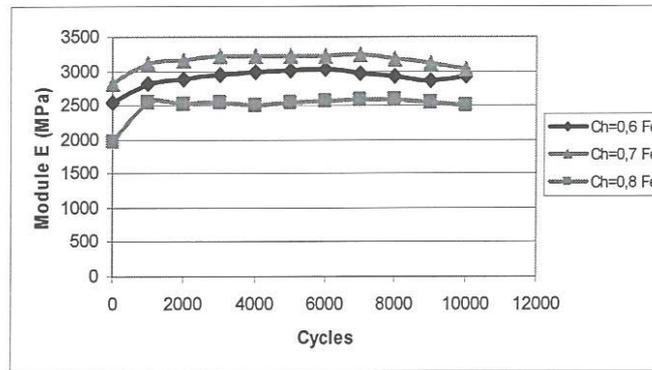
b- $F=0.7 \cdot F_e$.



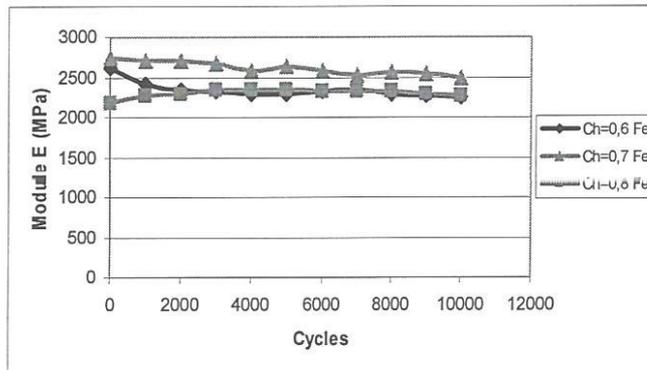
c- $F=0.8 \cdot F_e$.

c) pour a = 4.5 mm

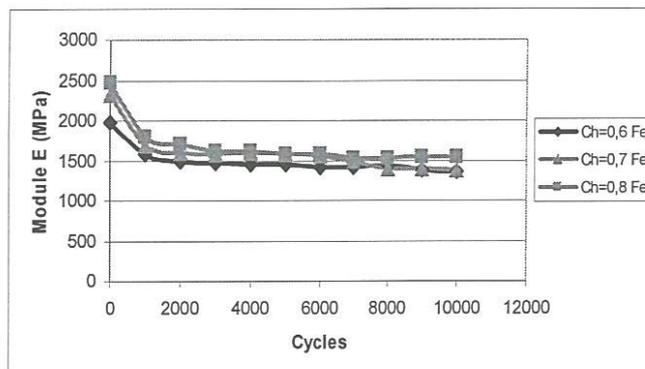
Figure 3.19 Influence de la vitesse d'essais sur l'évolution du module d'élasticité en flexion trois points cyclique pour N=10000cycles



a- V=2mm/min.

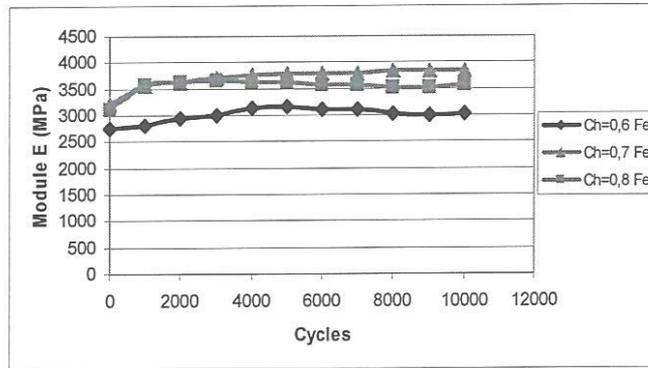


b- V=100mm/min.

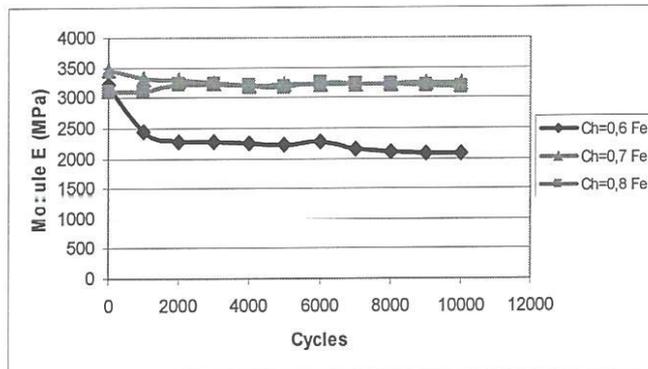


c- V=500mm/min.

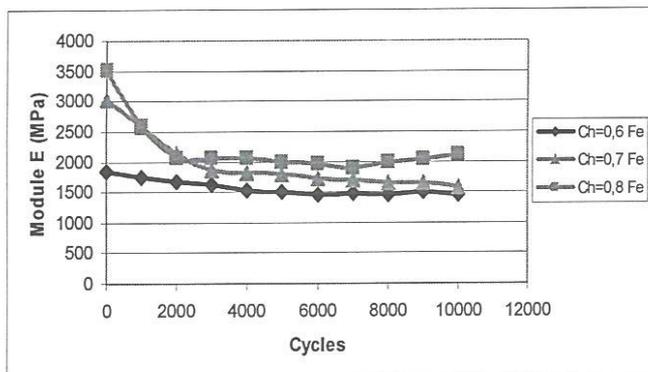
a) pour a = 0.5 mm



a- V=2mm/min.

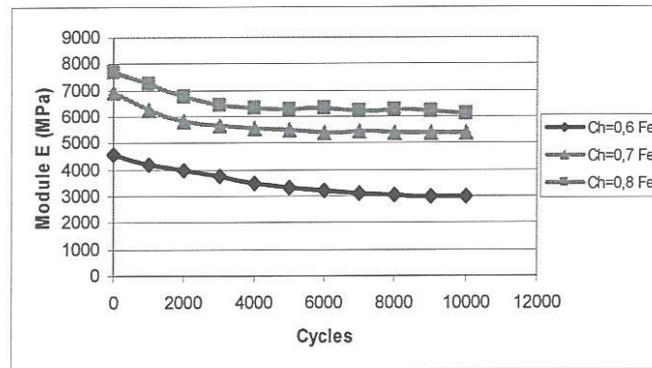


b- V=100mm/min.

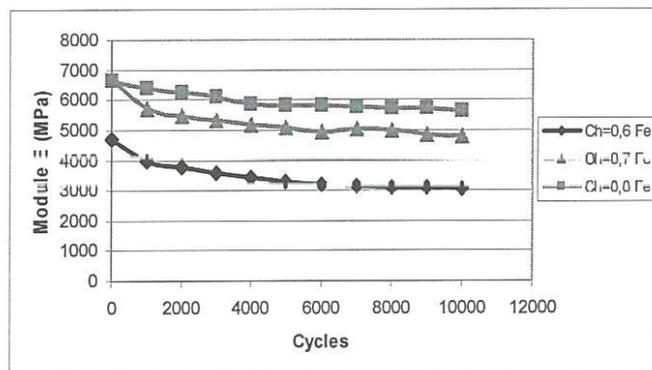


c- V=500mm/min.

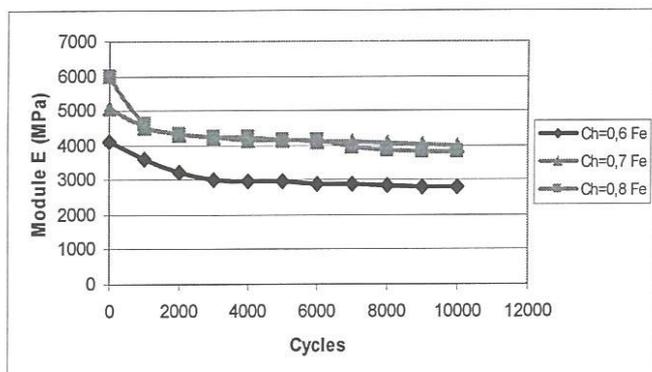
b) pour a = 1.5 mm



a- V=2mm/min.



b- V=100mm/min.



c- V=500mm/min.

c) pour a = 4.5 mm

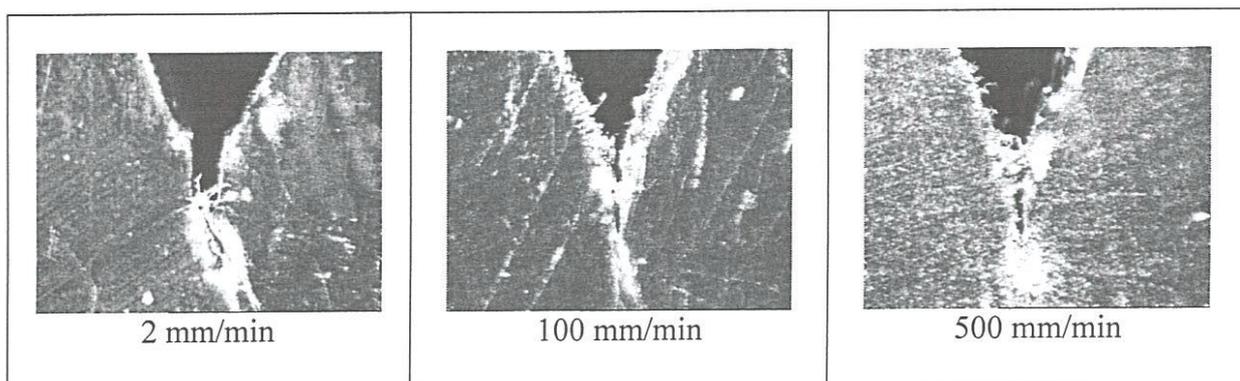
Figure 3.20 Influence du niveau de chargement sur l'évolution du module d'élasticité en flexion trois points cyclique pour N=10000cycles.

* Pour ce qui est de l'effet de la vitesse d'essai sur l'évolution du module d'élasticité longitudinal, nous constatons que l'augmentation de la vitesse entraîne une dégradation de la valeur du module dès les premiers cycles, ce qui peut être expliqué par un ramollissement du matériau lié à une désorganisation des molécules du matériau et ce pour les vitesses et les niveaux de chargement considérés. Cette constatation est valable pour des longueurs de fissure de 0.5 et 1.5 mm. Pour une fissure de 4.5 le matériau se ramollit dès les premiers cycles pour les différentes vitesses et différents niveaux de chargement retenus.

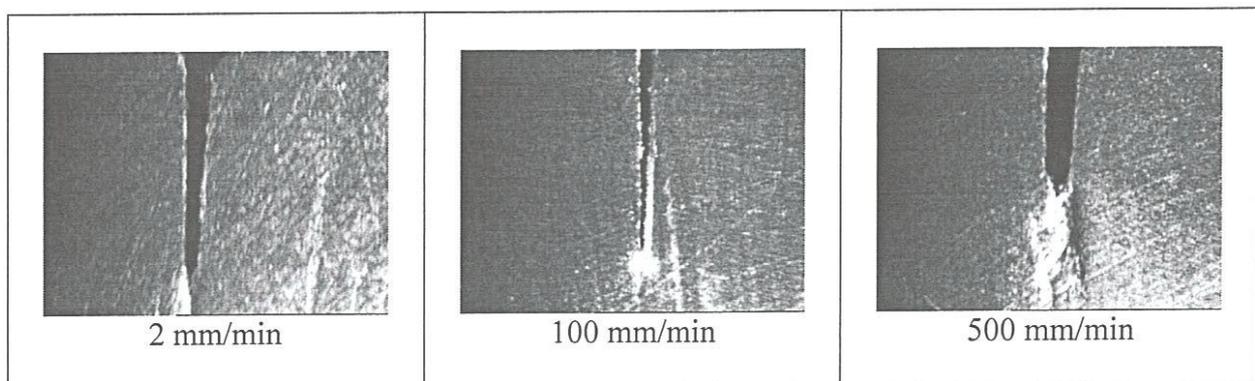
* Pour ce qui est de l'effet du niveau de chargement sur l'évolution du module d'élasticité longitudinal, nous constatons que pour une vitesse de 2 mm/min et une fissure de 0,5 mm le matériau se durcit dès les premiers cycles et tend à se stabiliser pour la suite du cyclage. Pour des vitesses de 100 et 500 mm/min et pour les longueurs de fissures considérées un ramollissement du matériau est observé dès les premiers cycles, puis un comportement constant.

3.4 Mécanismes de ruptures point de vue endommagement

La figure 3.21 représente les mécanismes de ruptures et d'endommagement observés pour un niveau de chargement, un nombre de cycles, différentes longueurs de fissure et à une vitesse d'essai.



a) pour $a = 0.5$ mm



b) pour $a = 1.5$ mm

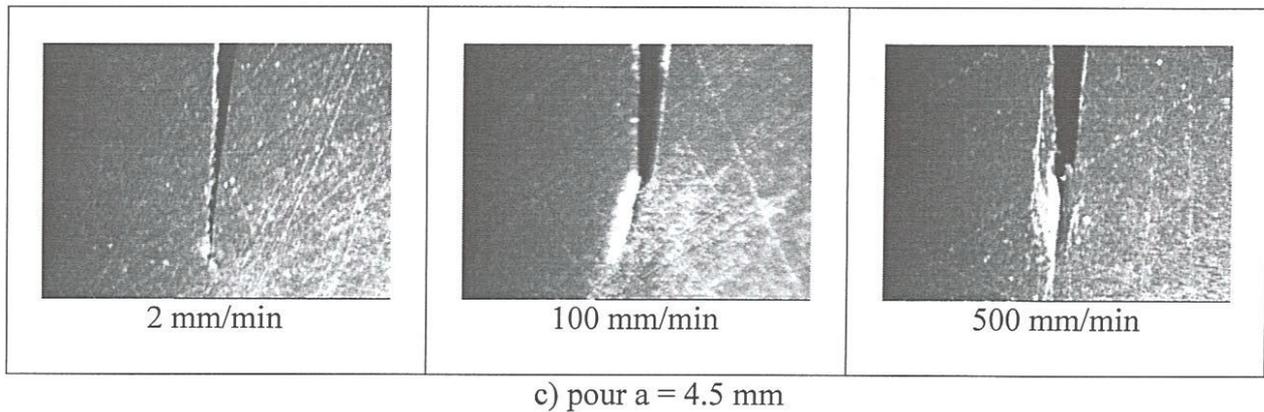


Figure 3.21 Ruptures et mécanismes observés sur un échantillon d'éprouvettes testées $F=0.7*F_e$

Il ressort de ces observations qui restent à vérifier avec d'autres compléments d'observations que les premiers mécanismes de ruptures apparaissent au fond de fissures (zone blanchâtre) et que cette zone est plus étendue pour les faibles fissures. Pour ce qui est de la structure du matériau nous remarquons que l'augmentation de la vitesse entraîne une meilleure organisation des chaînes macromoléculaires.

Conclusion

Cette étude entre dans le cadre de la contribution à la connaissance du comportement mécanique expérimental d'un polymère haute densité PEHD 100 soumis à des sollicitations statiques et cycliques en flexion 3 points.

L'étude retenue préconise dans un premier temps la connaissance du matériau considéré sous les aspects de: la chimie, la physique et la mécanique d'où l'intérêt du premier chapitre.

Cette partie est complétée par l'examen d'un ensemble de travaux de recherches réalisés dans le domaine afin de connaître les problèmes de comportement liés aux différents types de chargement au quel un tel matériau peut être soumis lors de son utilisation usuelle.

La réalisation des essais cycliques sur le matériau étudié en flexion trois points est basée sur une caractérisation du matériau en flexion trois points statique. Différents niveaux de chargement ont été considérés pour différentes longueurs de fissures et différentes vitesses d'essais.

Les résultats des essais de flexion trois points statiques ont montré que l'augmentation de la valeur de la fissure entraîne une baisse de la valeur de la charge à la rupture.

Les essais de flexion 3 points cyclique mènent à une dégradation de la valeur du module dès les premiers cycles pour vitesse d'essai élevée et ce les niveaux de chargement considérés. Cette remarque est valable pour des longueurs de fissure de 0.5 et 1.5 mm. Pour une fissure de 4.5 le matériau se ramollit dès les premiers cycles pour les différentes vitesses et différents niveaux de chargement retenus.

Pour les faibles vitesses et fissure (2 mm/min et 0,5 mm) le matériau se durcit dès les premiers cycles et tend à se stabiliser pour la suite du cyclage. Pour des vitesses plus élevées de 100 et 500 mm/min le matériau présente un ramollissement dès les premiers cycles, puis une stabilité des chaînes macromoléculaires conduisant à un comportement stationnaire du matériau, et que l'augmentation de la vitesse entraîne une meilleure organisation des chaînes macromoléculaires.

Les observations microscopiques ont montrés que les ruptures apparaissent au fond des fissures.

REFERENCES

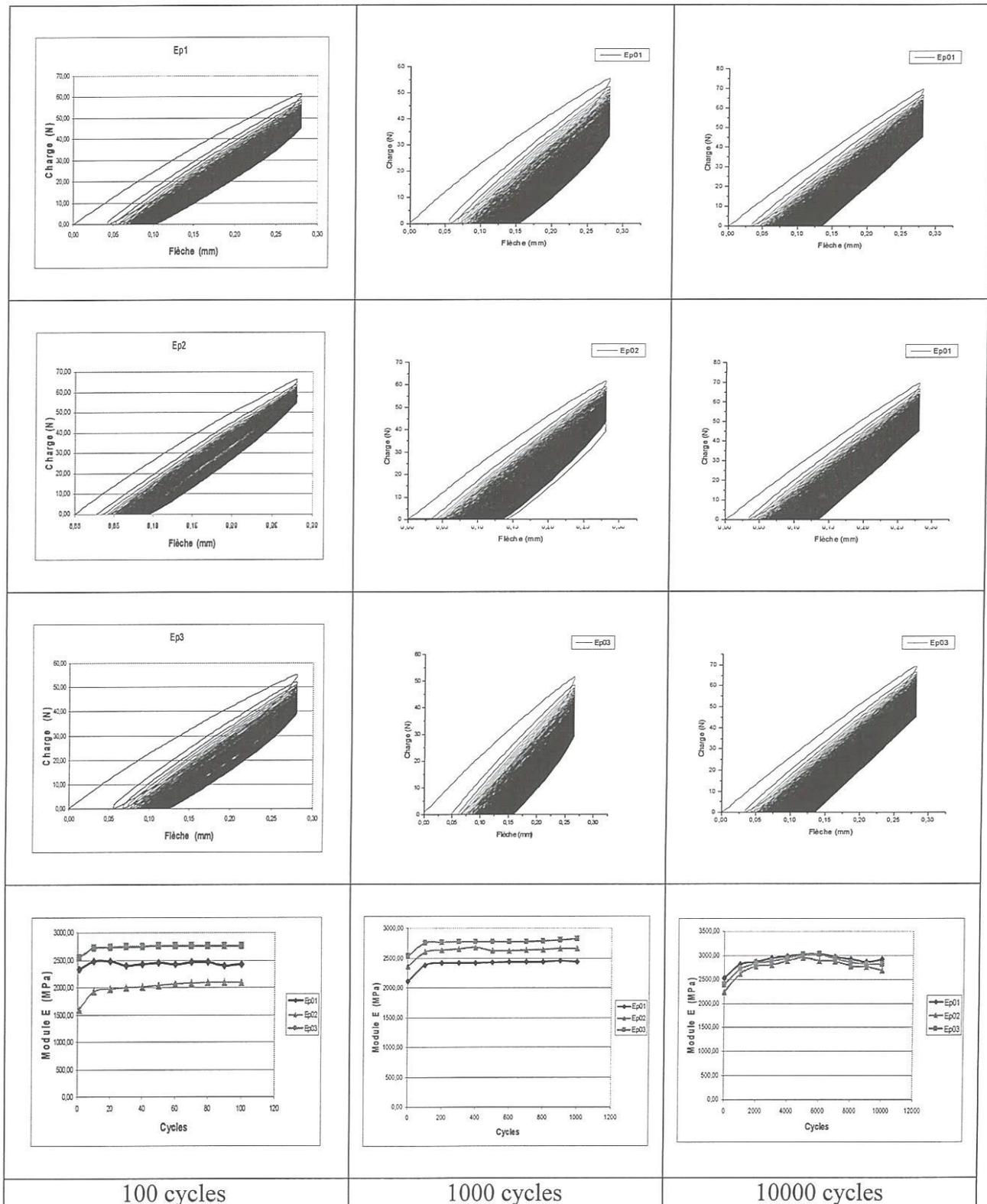
BIBLIOGRAPHIQUES

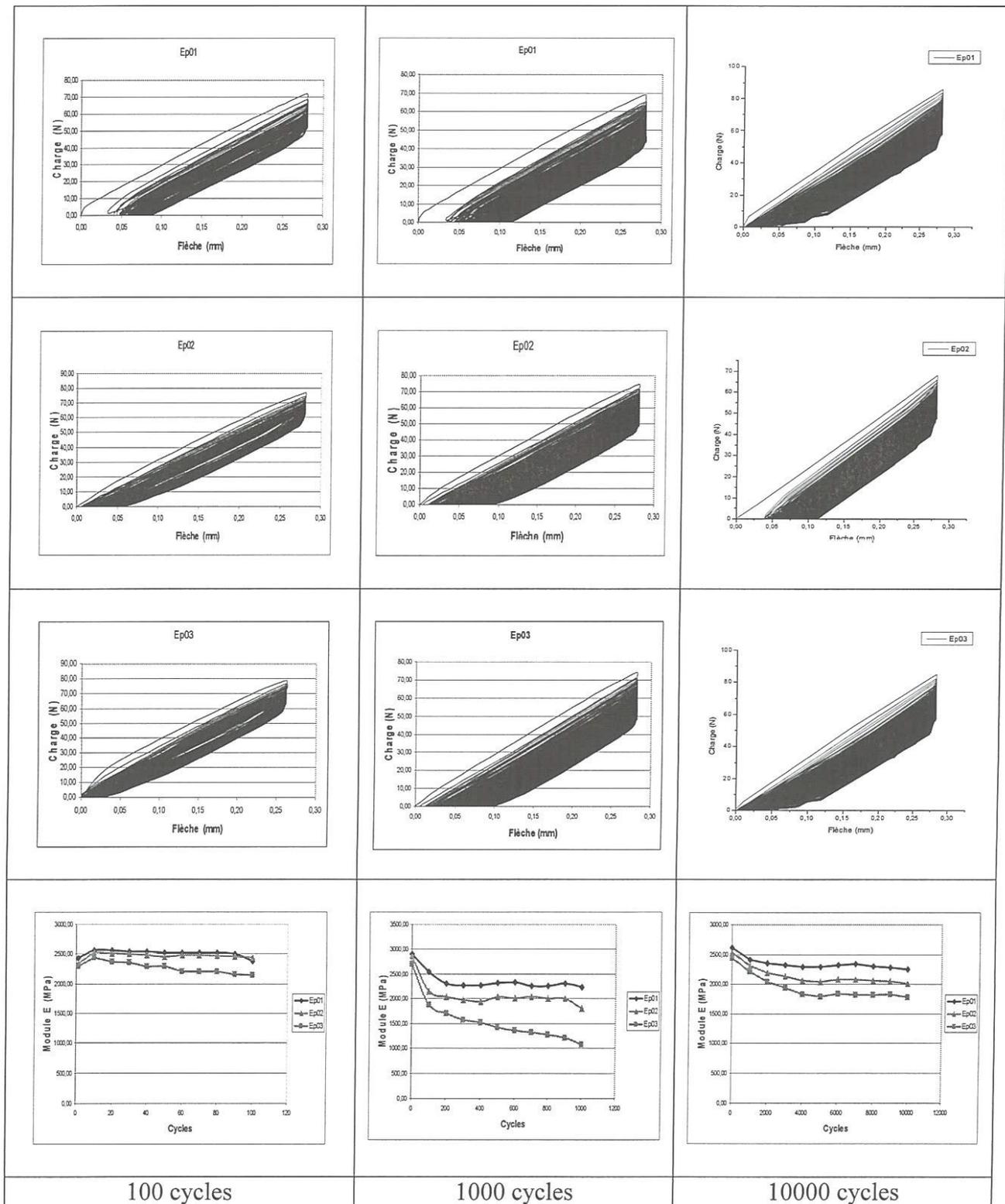
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **ELHEM GHORBEL**, Approche expérimentale pour la modélisation du comportement mécanique des matériaux métalliques et organiques, thèse Génie mécanique, Université de Marne la vallée, France (2001).
- [2] **RAJENDRA K., KRISHNASWAMY**, Analysis of ductile and brittle failures from creep rupture testing of high-density polyethylene (HDPE) pipes, *Polymer* 46 (2005) 11664-11672.
- [3] **HUBERT L., DAVID L., SEGUELA R., VIGIER G., DEGOULET C., GERMAIN Y.**, Physical and mechanical properties of polyethylene for pipes in relation to molecular architecture. I. Microstructure and crystallisation kinetics, *Polymer* 42 (2001) 8425-8434.
- [4] **Wikipédia**
URL: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Poly%C3%A9thyl%C3%A8ne>
Site consulté le 10 février 2007.
- [5] **Encyclopédie ENCARTA (2006)** (cédérom). Paris : Microsoft.
Configuration : PC, 3 CD-ROM
- [6] **KURZ W., MERCIER J.P., ZAMBELLI G.**, Traité des matériaux, Tome 1, Lausanne (1995).
- [7] **Pages perso-orange**
URL: <http://pagesperso-orange.fr/chimie.sup/polymeres/GENERALITESPOLYMERES.html>
Site consulté le 21 mai 2007.
- [8] **M. BNOUAZEGUE et M. KERMICHE**, Etude de l'effet de la vitesse de changement et la propagation de la fissure dans PEHD, Mémoire d'ingénieur d'état en mécanique, Université de Badji Mokhtar, Annaba (1999).
- [9] **ASHBY M.F., JONES D.RH.**, Matériaux 2, Microstructure et mise en oeuvre, Dunod, Paris (1991).
- [10] **e.m.c.2**
URL: <http://e.m.c.2.free.fr/matieres-plastiques.htm>
Site consulté le 21 mai 2007.
- [11] **N. KIASS**, Etude et analyses de l'effet des contraintes résiduelles sur le comportement mécanique de tube en PEHD, Mémoire de magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba (2001).
- [12] **J. P. TROTGNON ; M. PIPERAUD ; J. VERDU ; Et A. DOBRACZYNSKI**, Matières plastiques, Les polyoléfines, Nathan, Paris, Avril (1992).
- [13] **REYNALD DOSSOGNE**, Polyéthylène haut densité PE-HD, technique de l'ingénieur, AM3315, Mise à jour (2000).
- [14] **BALOU D., FABRITTIUS E., GILLES A.**, Chimie, Tome 2, Ellipse édition Marketing S. A., (1999).
- [15] **N. HAMLAOUI**, Etude expérimentale du comportement mécanique du PEHD 80 soumis a des sollicitations statique et cyclique, Mémoire de magister, Université de 08 Mai 1945, Guelma (2006).
- [16] **J. BAST**, Matières plastique II, Technologie-Plasturgie, Lavoisier (1982).
- [17] **DERIQUEHEM B.**, Pratique des plastiques et composites, Dunod, (2003).
- [18] **CARREGA M. et all.**, Matériaux industriels : Matériaux polymères, Dunod, Paris, (2000).
- [19] **DAVIDE S.A. De FOCATIIS et C. PAUL BUCKLEY**, Determination of craze initiation stress in very small polymer specimens, *Polymer Testing* 27 (2008) 136–145.

- [20] **M.A. RODRIGUEZ-PEREZ , L.O. ARCOS Y RABAGO, A. GONZALEZ , J.A. DE SAJA**, Improvement of the measurement process used for the dynamic mechanical characterization of semi crystalline polymers in three point bending, *Polymer Testing* 22 (2003) 63–76.
- [21] **NADJETTE KIASS et KAMEL CHAOUI**, Nouvelle approche expérimentale du comportement mécanique des tubes en polyéthylène, 1^{er} Congrès Constantine, Algérie Décembre (2002).
- [22] **S. MAMMERI**, Etude de la variabilité des propriétés mécaniques dans les tubes en polyéthylène de haute densité destinés à la distribution du gaz naturel, Mémoire de magister, Université de Badji Mokhtar, Annaba (2003).
- [23] **NADJETTE KIASS, RABIA KHELIF, BOUBAKER BOUNAMOUS, ABDELAZIZ AMIRAT et KAMEL CHAOUI**, Etude expérimentale des propriétés mécaniques et morphologie dans un tube de gaz en HDPE-80, *Mécanique et Industries* 7,423-432 (2006).
- [24] **JUN MA, QING QI, JESSICA BAYLEY, XU-SHENG DU, MAO-CHANSON MO et LI-QUN ZHANG**, Development of SENB toughness measurement for thermoset resins, *Polymer Testing* 26 (2007) 445–450.
- [25] **H.B.H. HAMOUDA, M. SIMOES-BETBEDER, F. GRILLON, P. BLOUET, N. BILLON, R. PIQUES**, Creep damage mechanisms in polyethylene gas pipes, *Polymer* 42 (2001) 5425-5437.
- [26] **DAVID J. KRZYPOW, CLARE M. RIMNAC**, Cyclic steady state stress-strain behavior of UHMW polyethylene, *Biomaterials* 21 (2000) 2081-2087.
- [27] **M. EL FRAY, V. ALTSTÄDT**, Fatigue behaviour of multiblock thermoplastic elastomers. 1. Stepwise increasing load testing of poly(aliphatic/aromatic-ester) copolymers, *Polymer* 44 (2003) 4635–4642.
- [28] **L. FATMI, A. ROULI, N. HAMLAOUI**, Cyclic loading effect on the mechanical behaviour and morphology of the high density polyethylene, *ISSN 1392-1207. Mechanika*. 2007. Nr.5(67).
- [29] **LAURENT CANGEMI, YVES MEIMON**, Une approche méso-macro continue pour la modélisation du comportement des polymères semi-cristallins à usage structural, *Mécanique et Industries* 3 (2002) 557-570.
- [30] **BOUREGHDA HICHEM**, Etude de l'influence de la mise en forme sur la cristallisation et les propriétés physiques des polymères, Mémoire de magister, Université de Batna (2006).
- [31] **F. MUJKA**, On the difference between flexural moduli obtained by three-point and four-point bending tests, *Polymer Testing* 25 (2006) 214–220.

Annexe



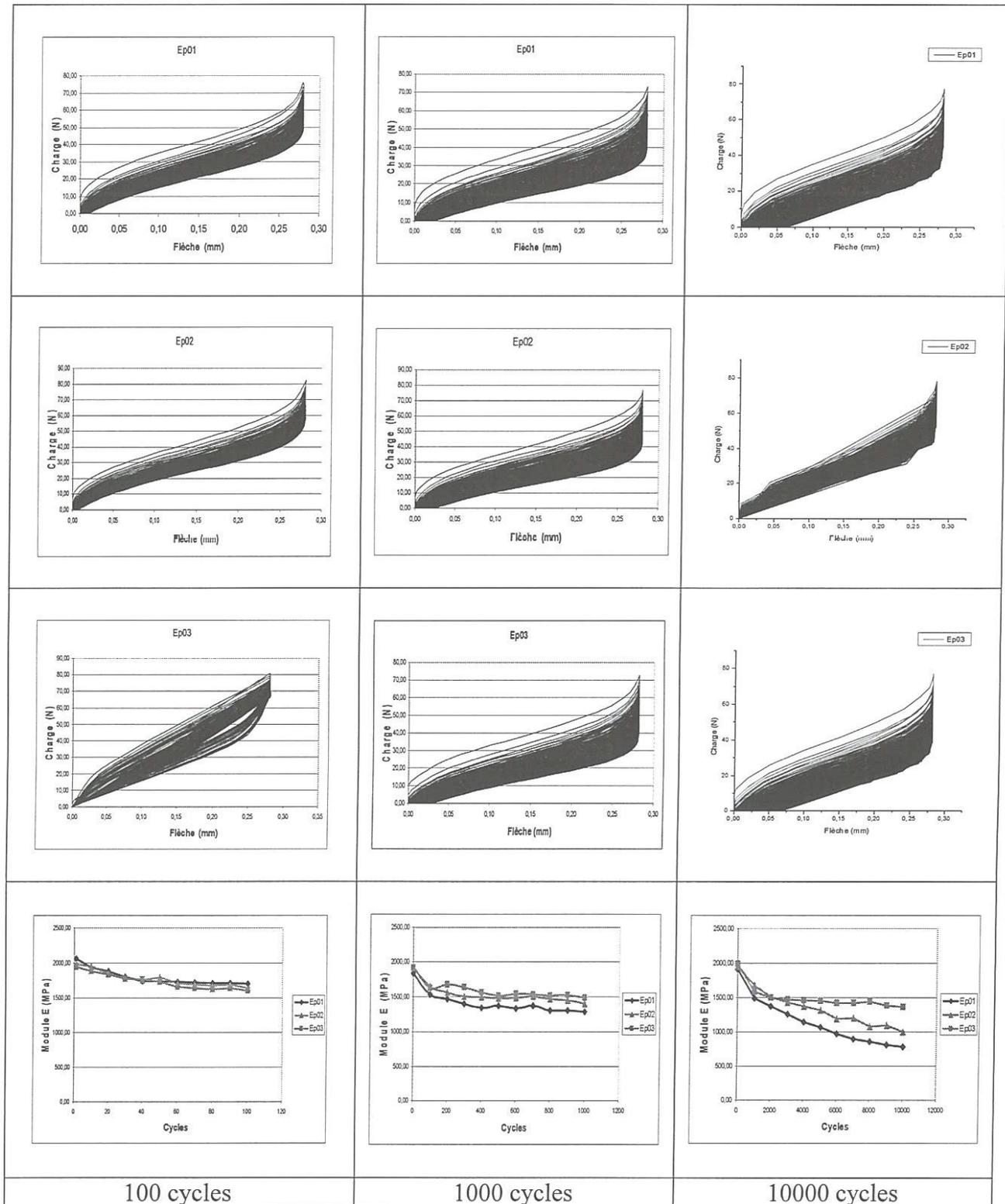


100 cycles

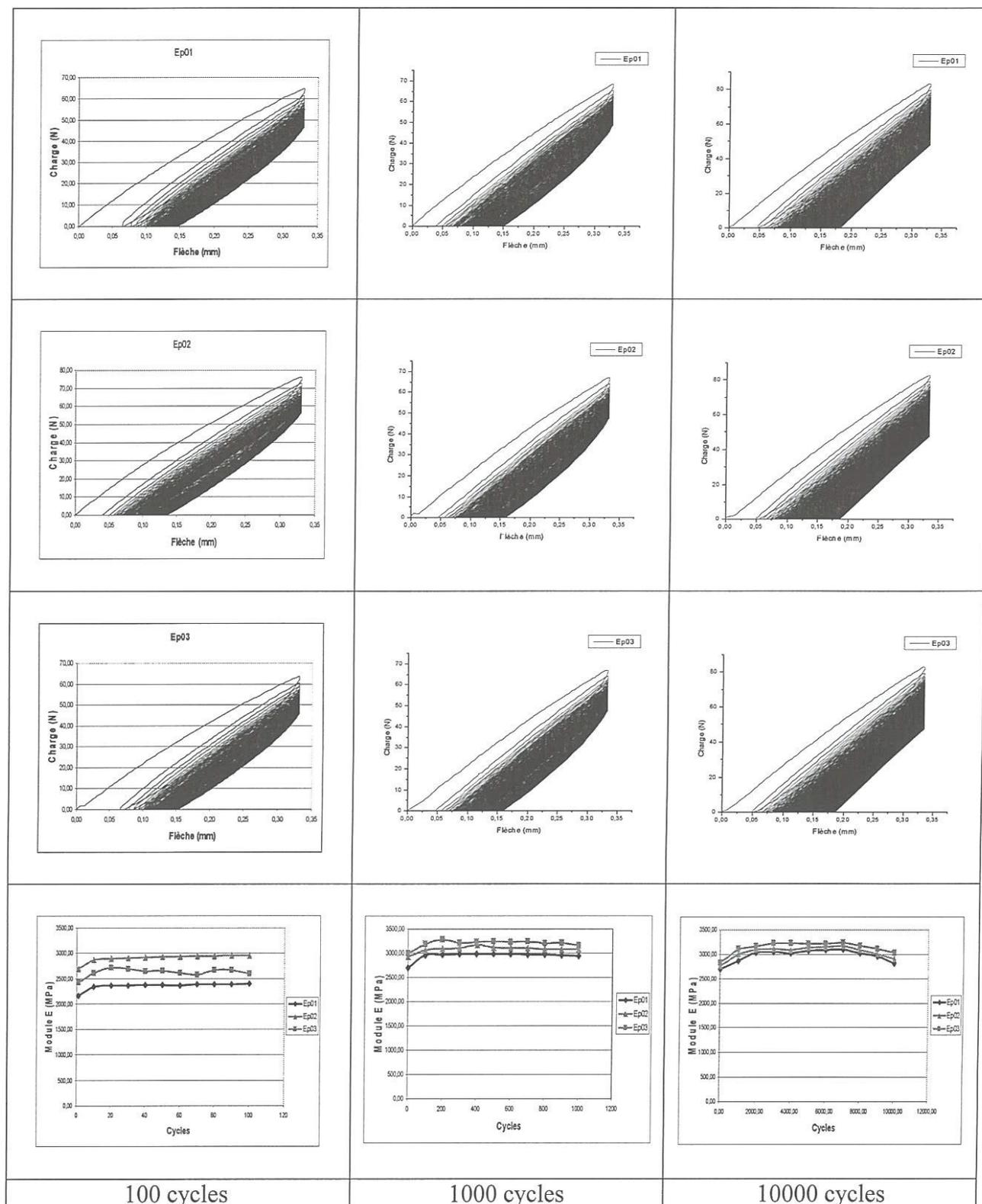
1000 cycles

10000 cycles

$a=0,5\text{mm}$ $V=100\text{mm/min}$ $F=0,6 \cdot F_e$



$a=0,5\text{mm}$ $V=500\text{mm/min}$ $F=0,6 \cdot F_c$

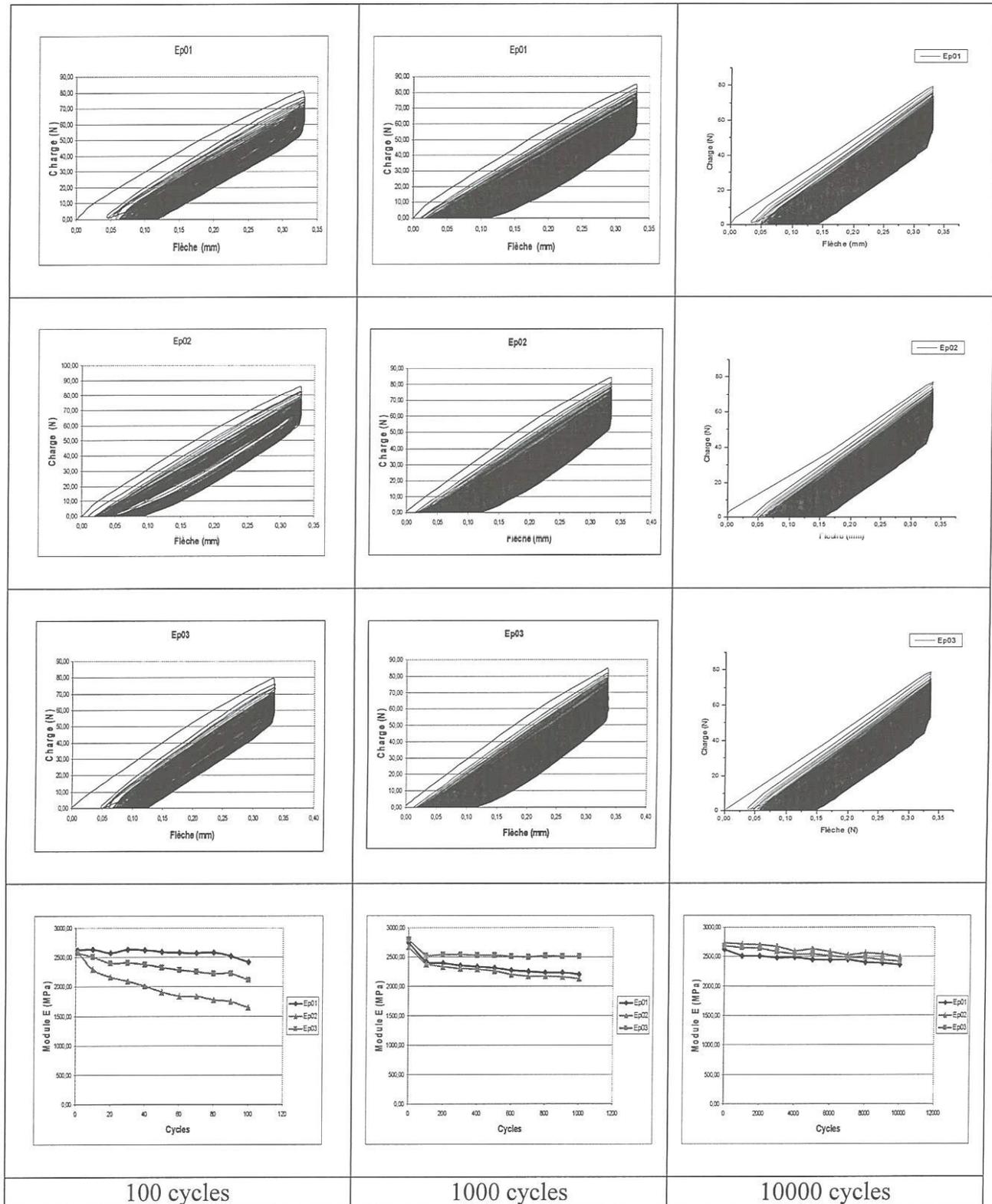


100 cycles

1000 cycles

10000 cycles

$$a=0,5\text{mm } V=2\text{mm/min } F=0,7*F_e$$

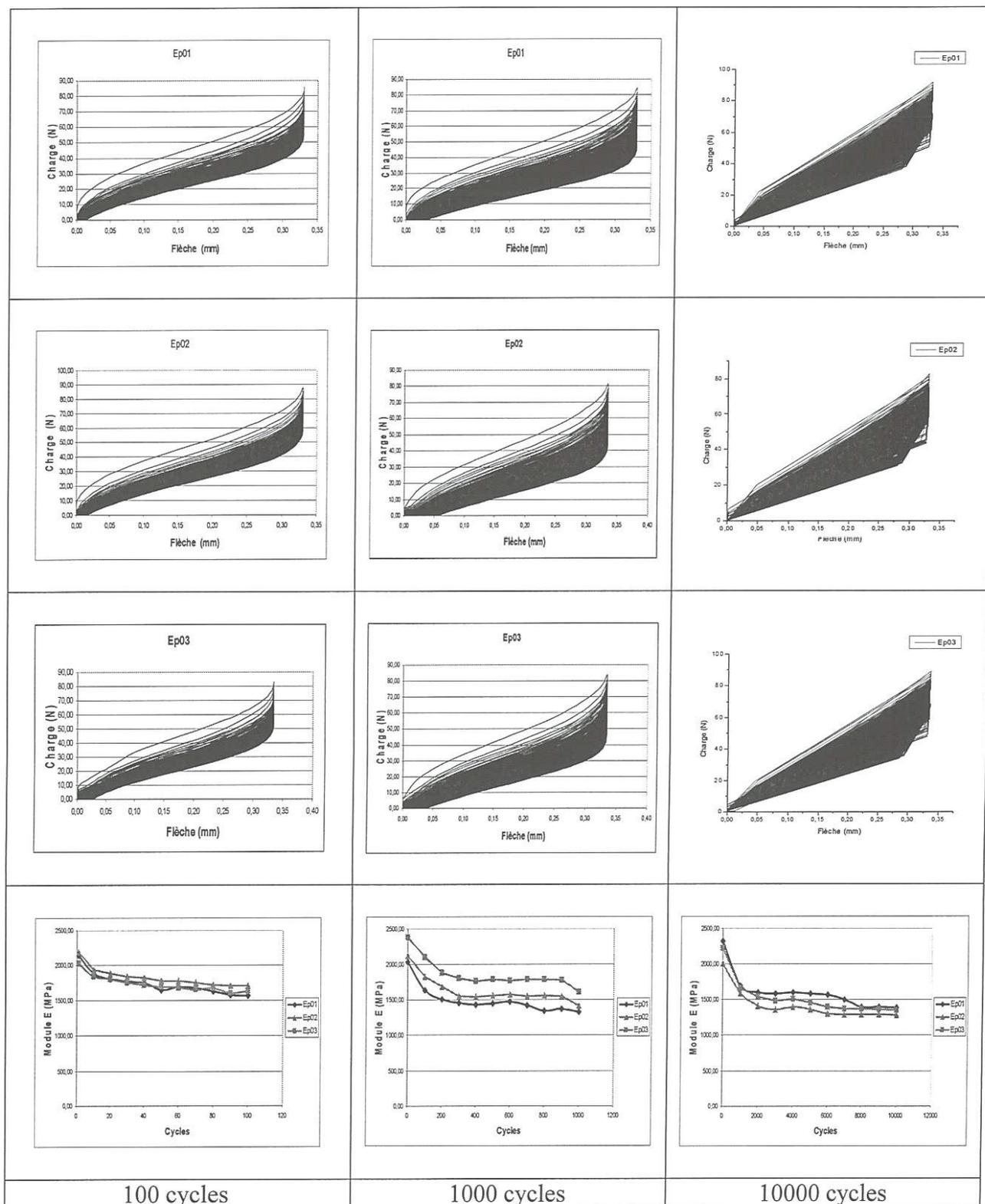


100 cycles

1000 cycles

10000 cycles

$$a=0,5\text{mm } V=100\text{mm/min } F=0,7 \cdot F_e$$

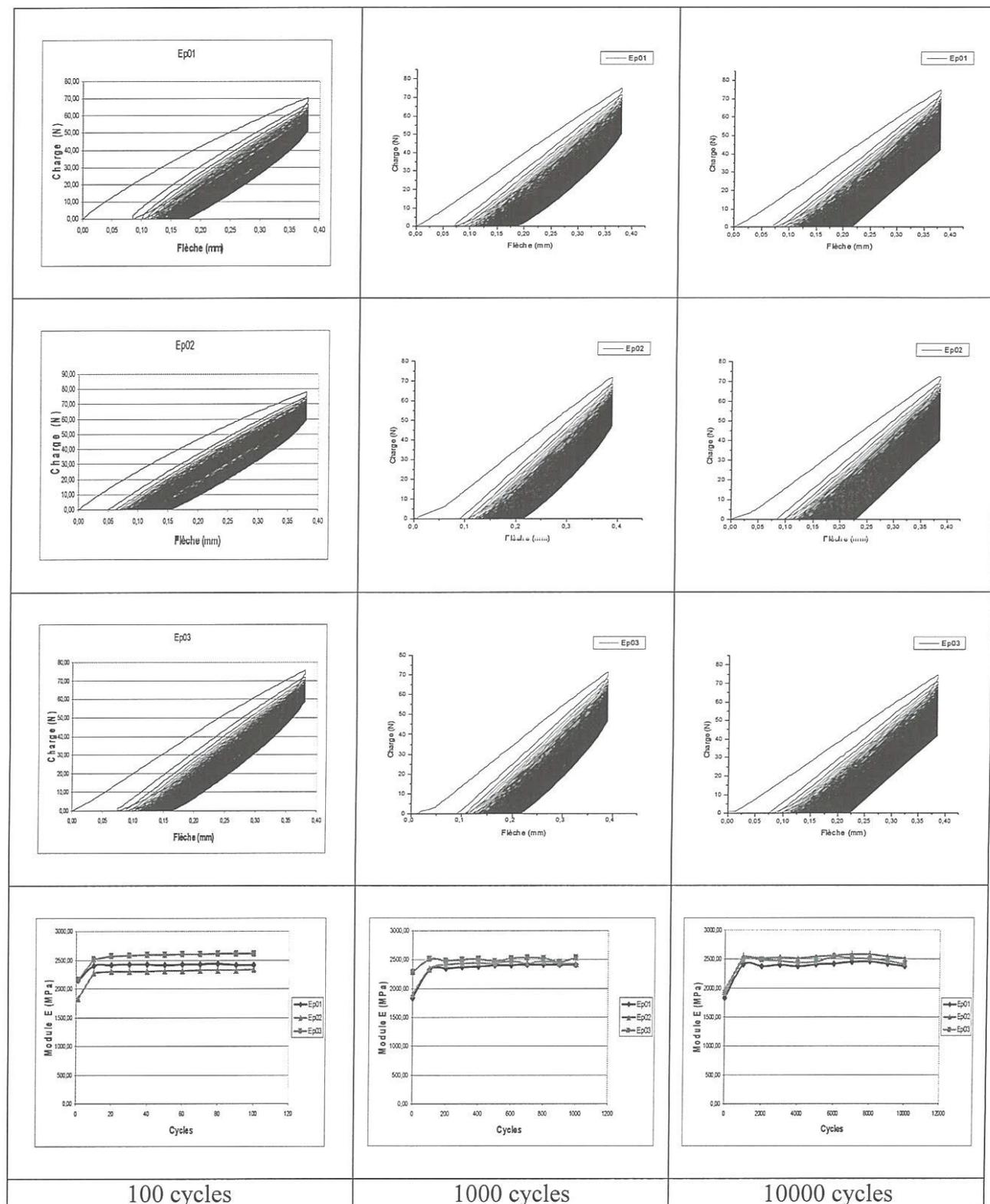


100 cycles

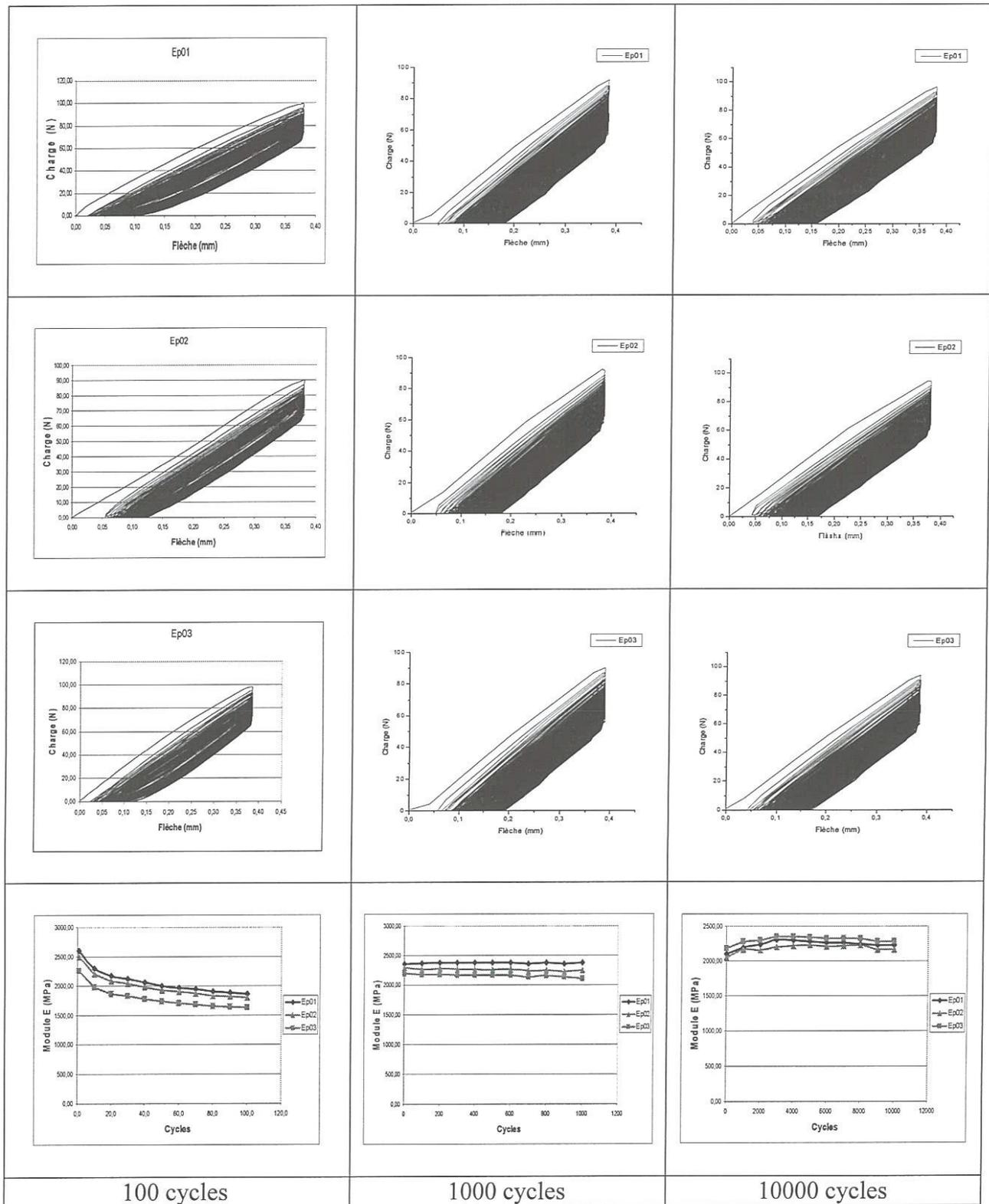
1000 cycles

10000 cycles

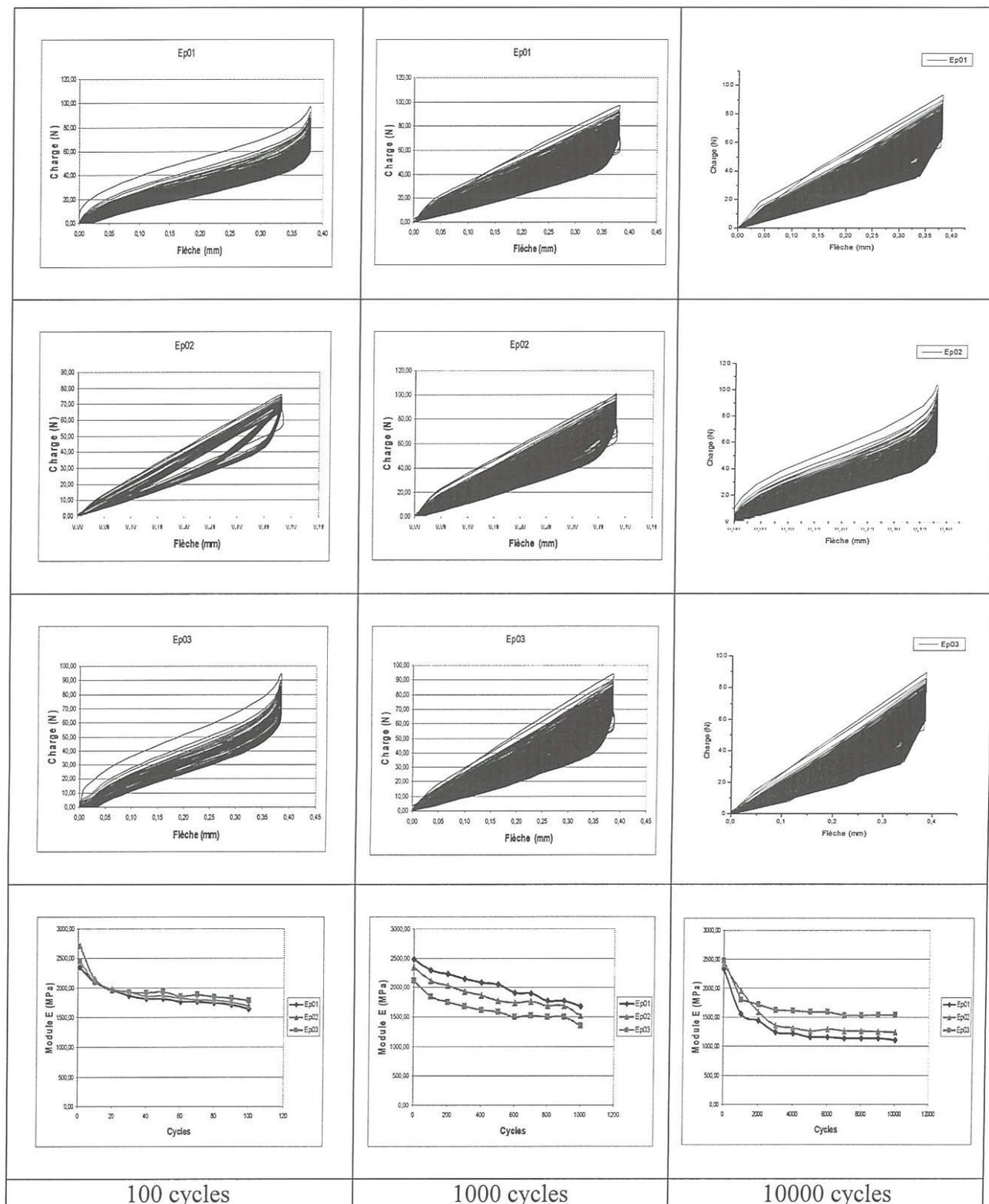
$a=0,5\text{mm}$ $V=500\text{mm/min}$ $F=0,7*F_e$



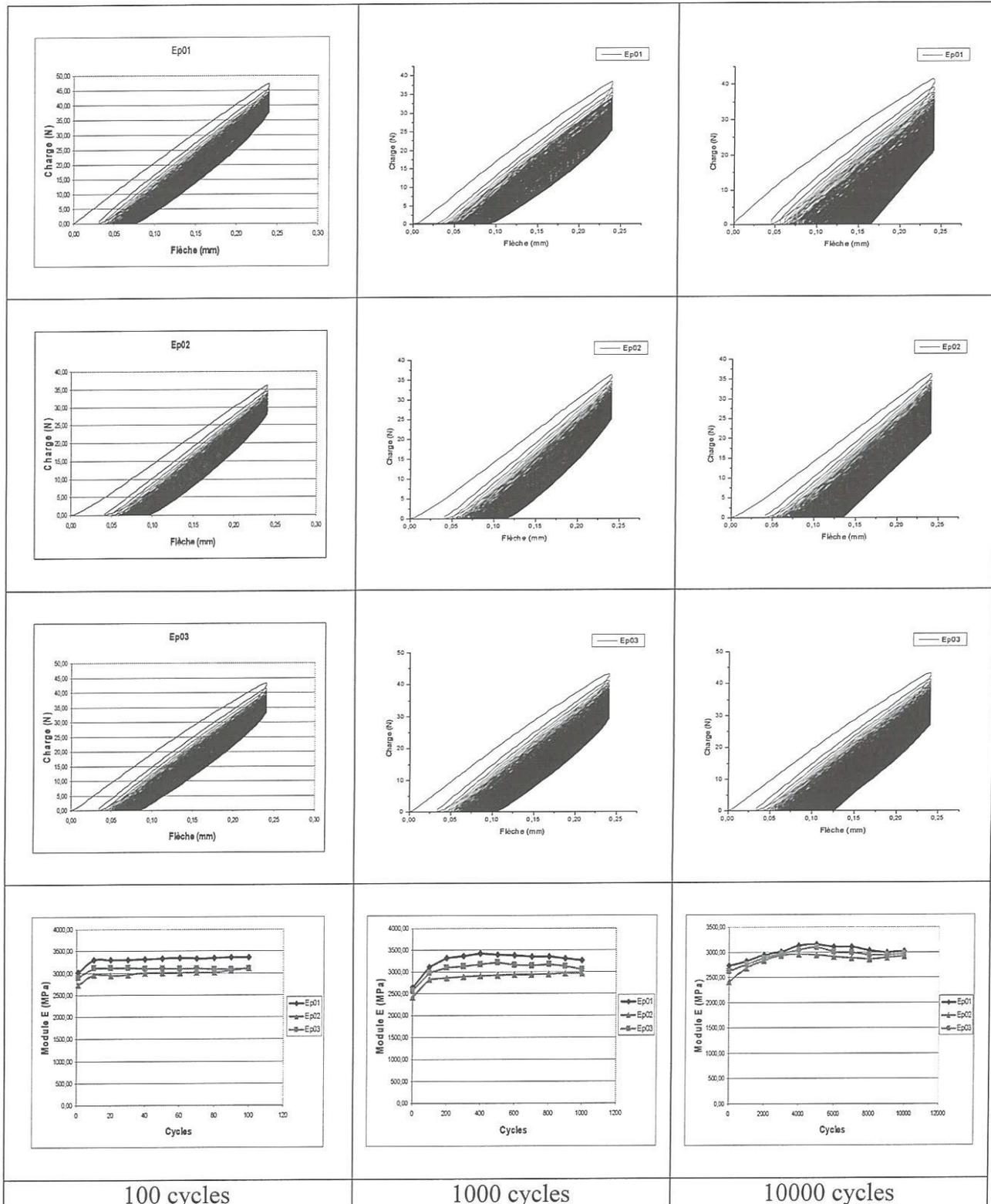
$a=0,5\text{mm}$ $V=2\text{mm/min}$ $F=0,8 \cdot F_c$



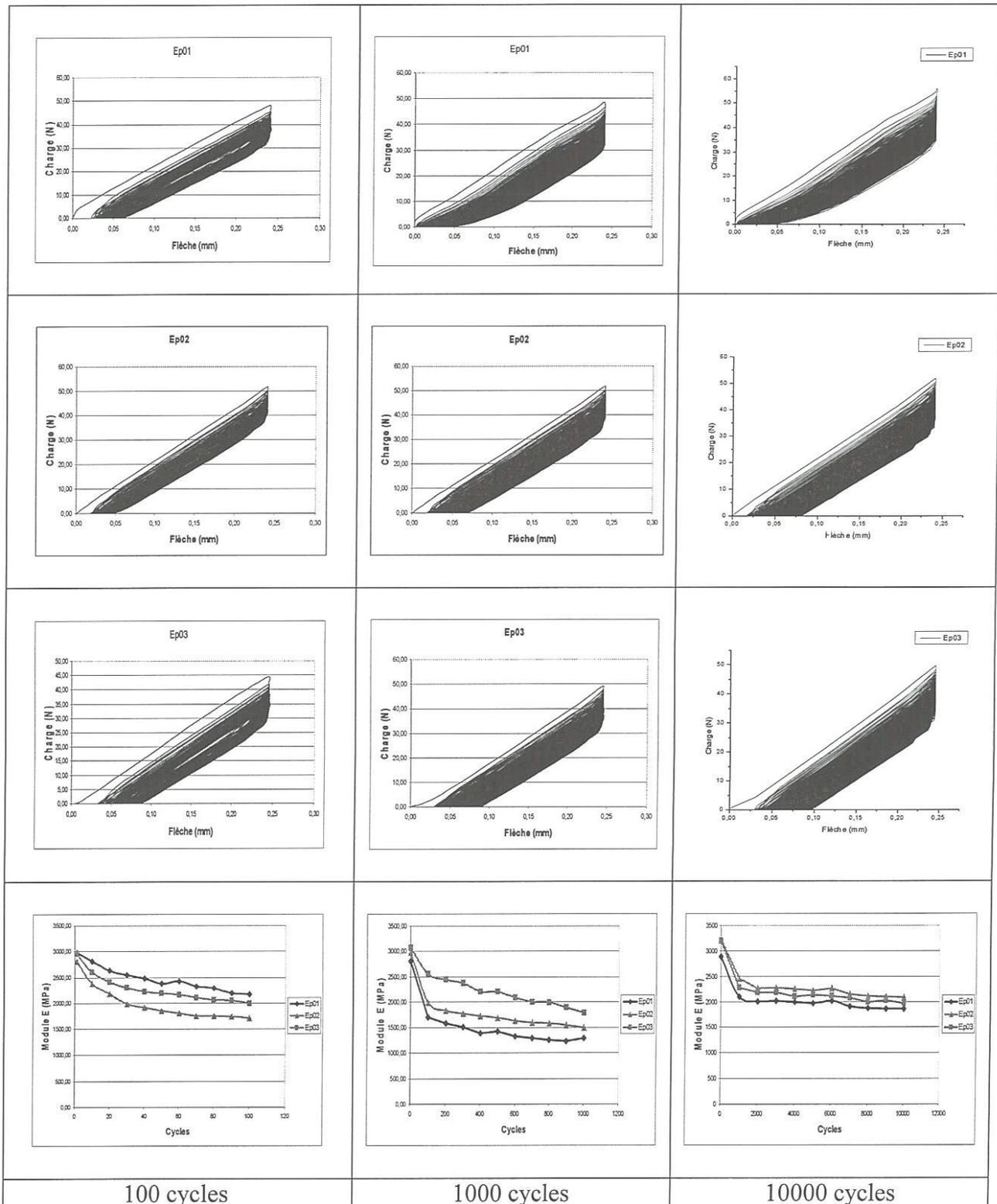
$a=0,5\text{mm } V=100\text{mm/min } F=0,8*F_e$



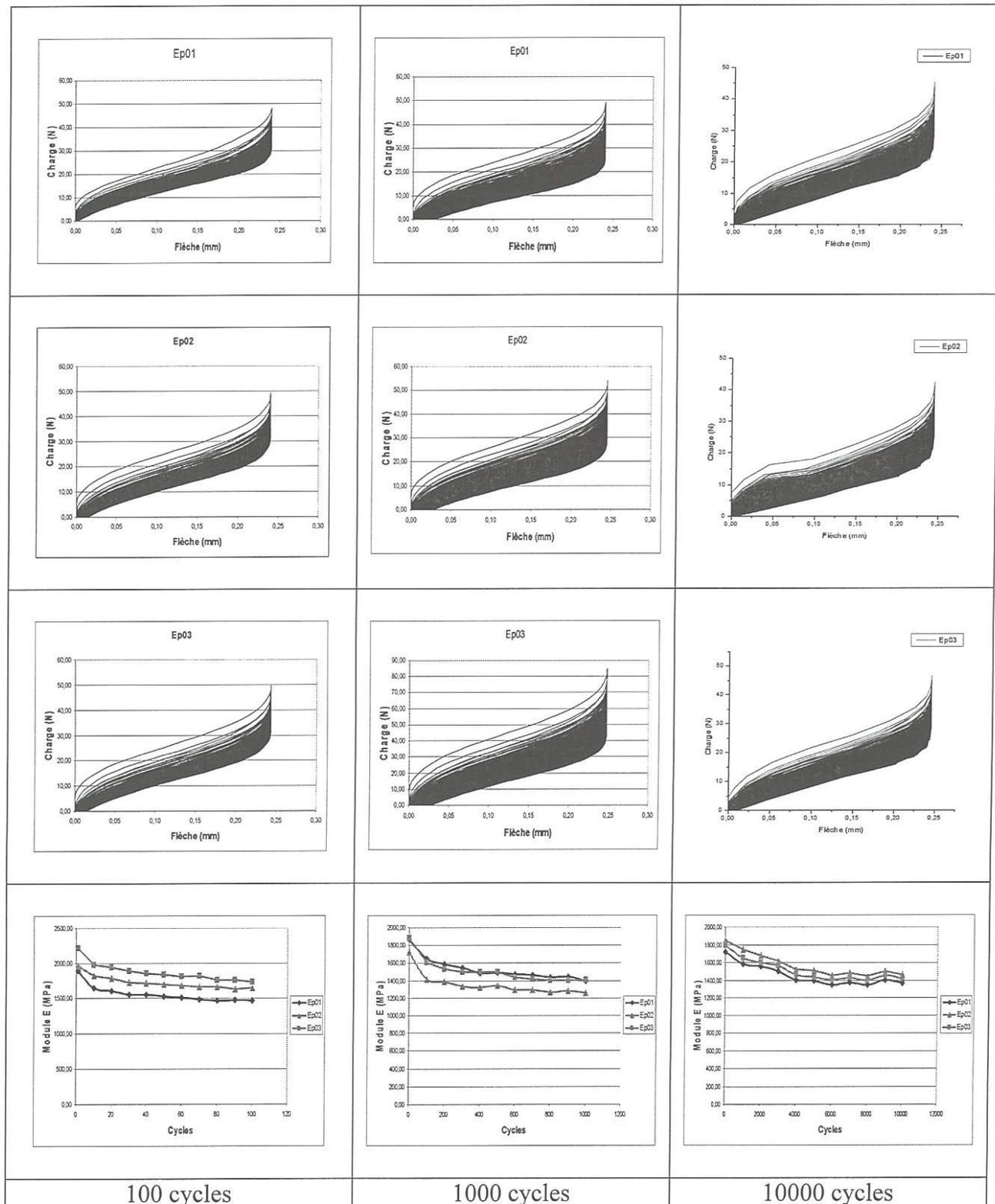
$a=0,5\text{mm}$ $V=500\text{mm}/\text{min}$ $F=0,8*F_e$



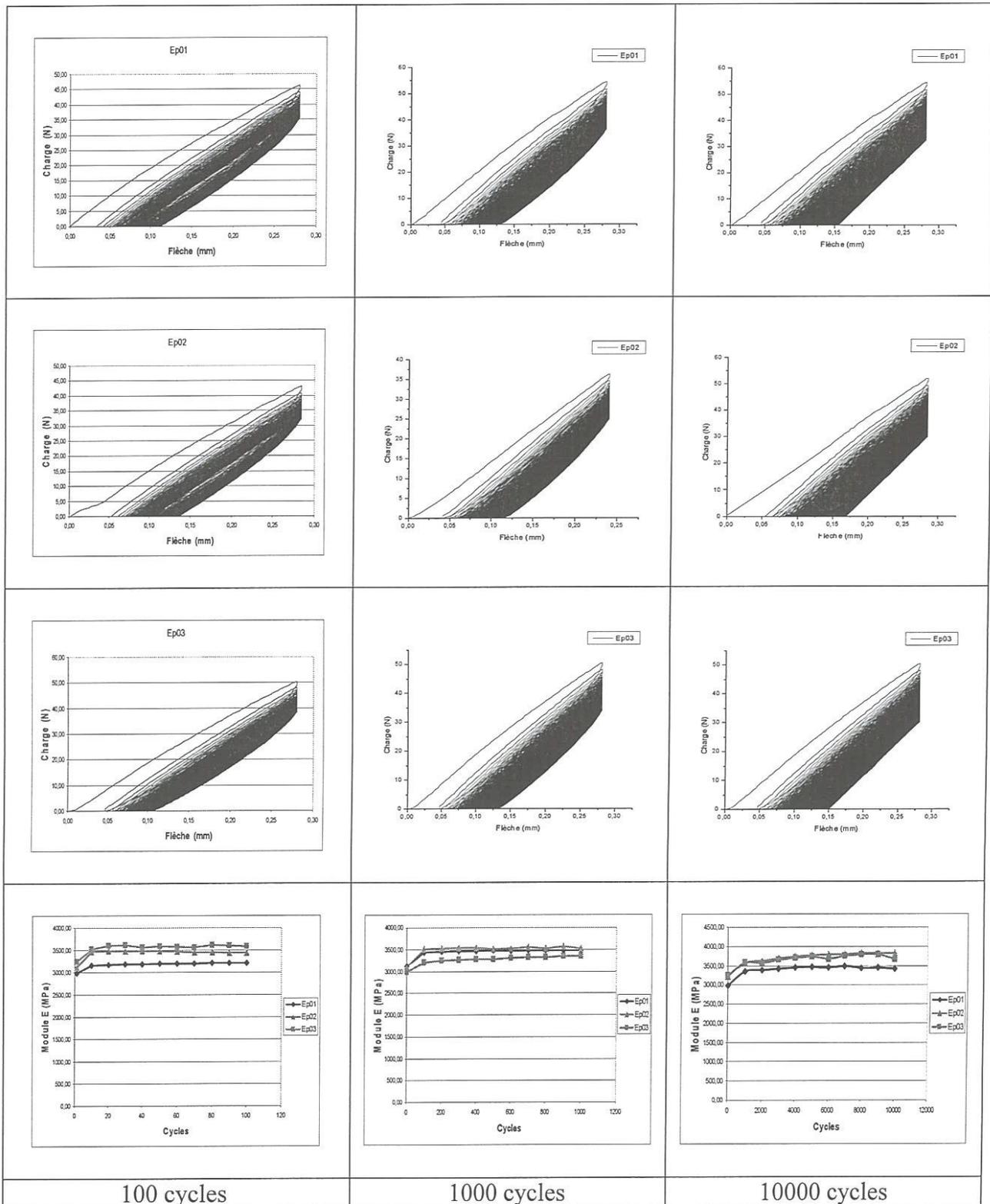
$a=1,5\text{mm}$ $V=2\text{mm/min}$ $F=0,6 \cdot F_e$



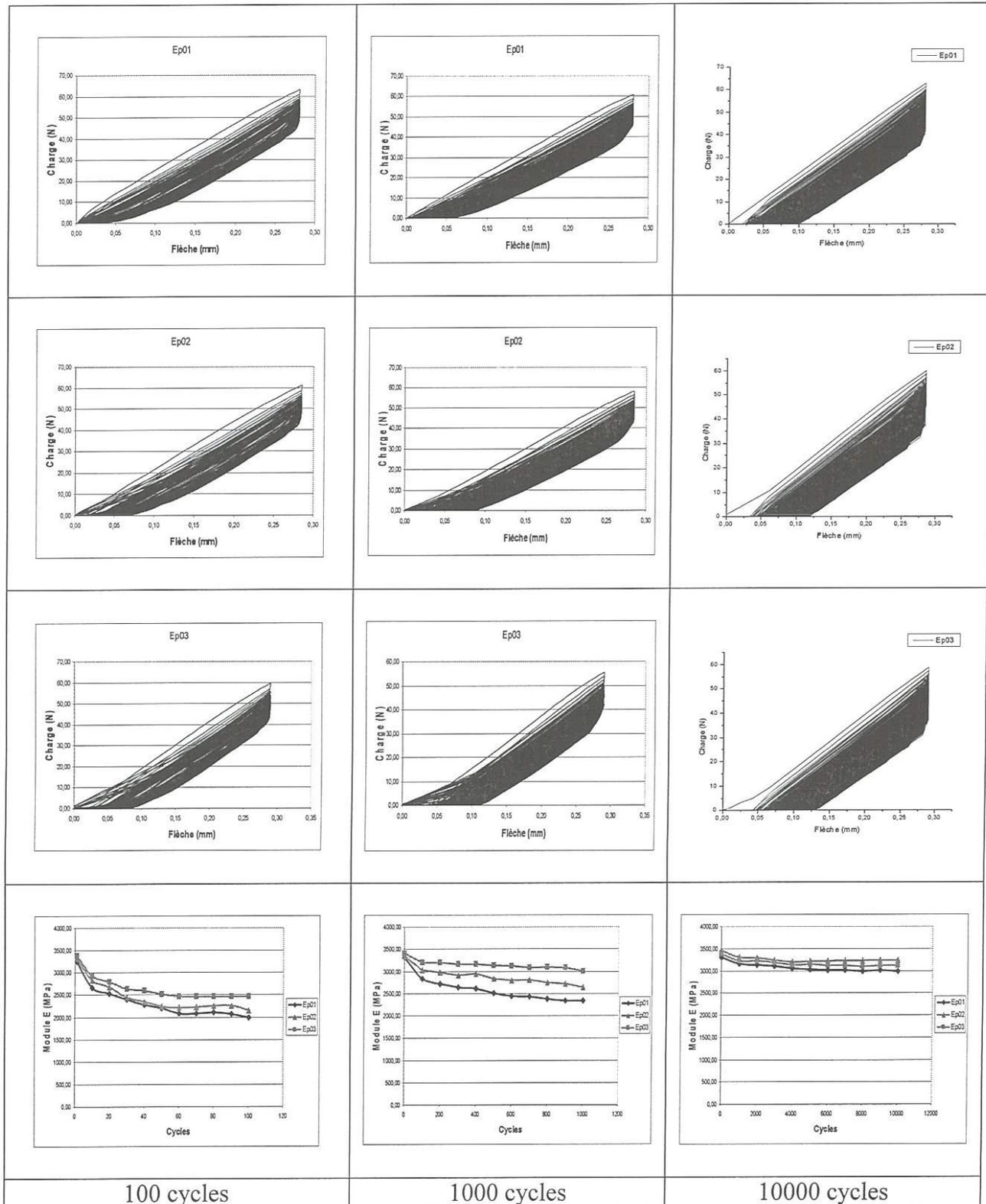
$a=1,5\text{mm}$ $V=100\text{mm/min}$ $F=0,6 \cdot F_e$

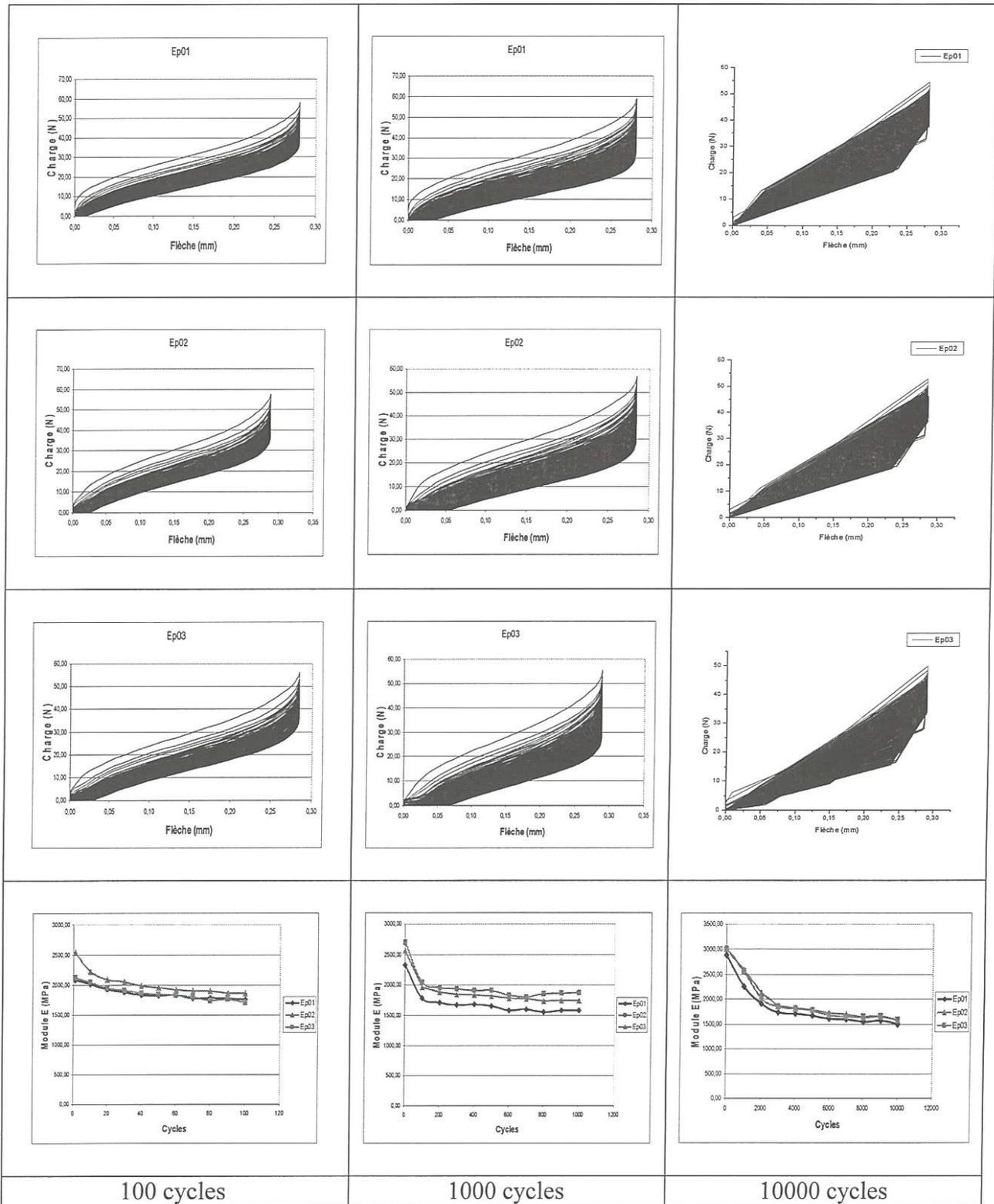


$a=1,5\text{mm}$ $V=500\text{mm/min}$ $F=0,6 \cdot F_e$

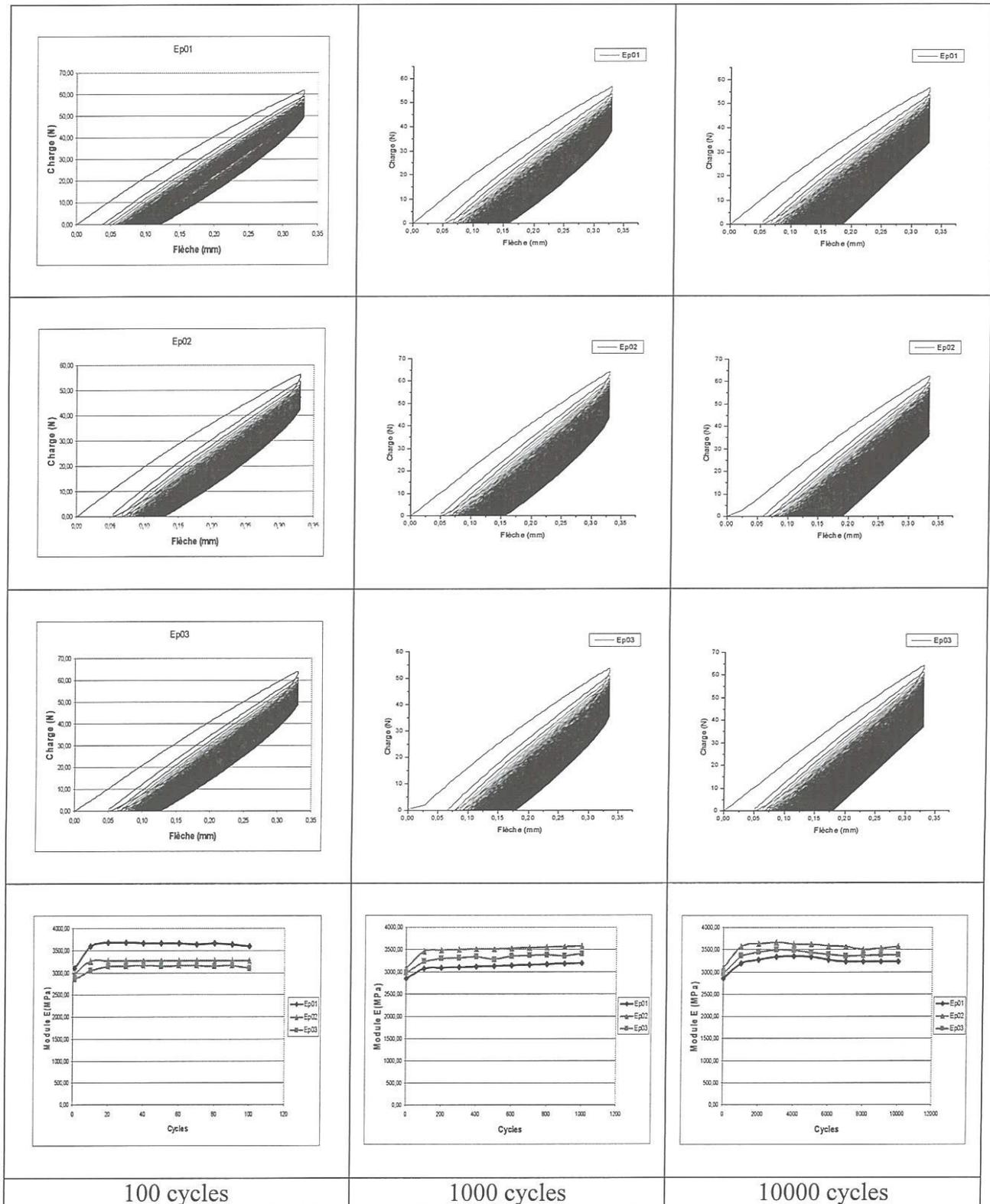


$a=1,5\text{mm}$ $V=2\text{mm/min}$ $F=0,7 \cdot F_e$

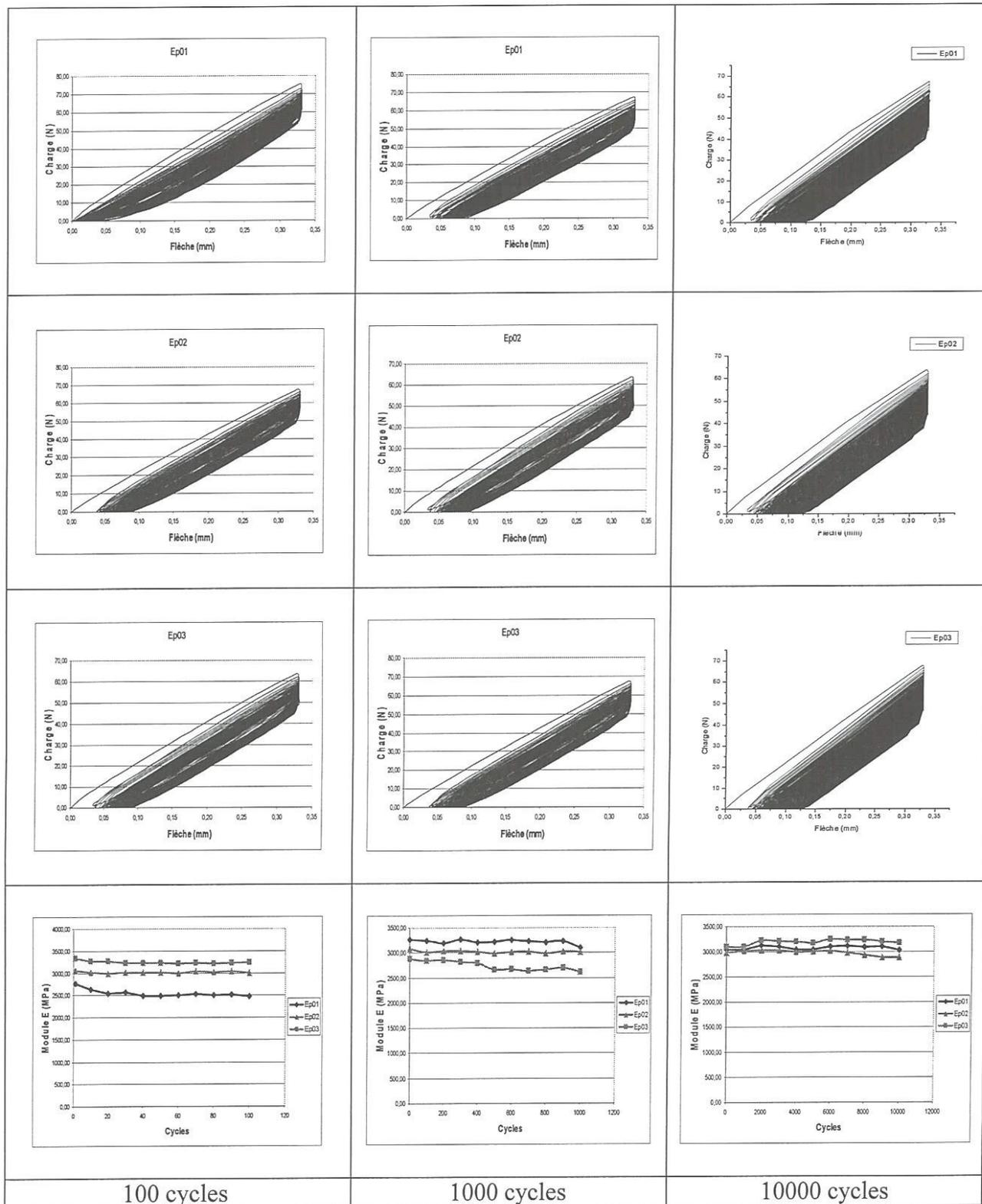




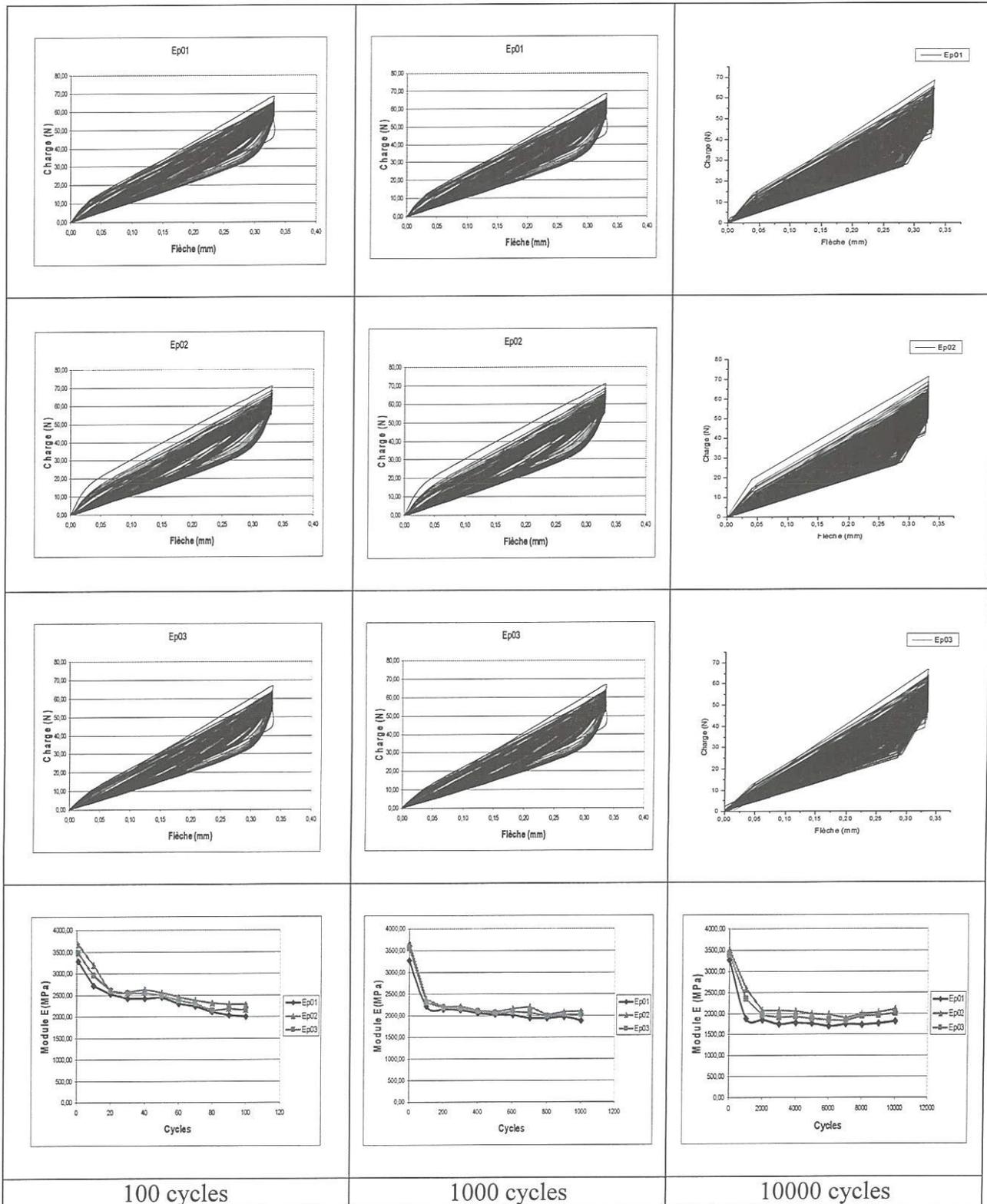
$a=1,5\text{mm}$ $V=500\text{mm/min}$ $F=0,7*F_e$



$a=1,5\text{mm}$ $V=2\text{mm/min}$ $F=0,8 \cdot F_e$



$a=1,5\text{mm } V=100\text{mm/min } F=0,8 \cdot F_e$

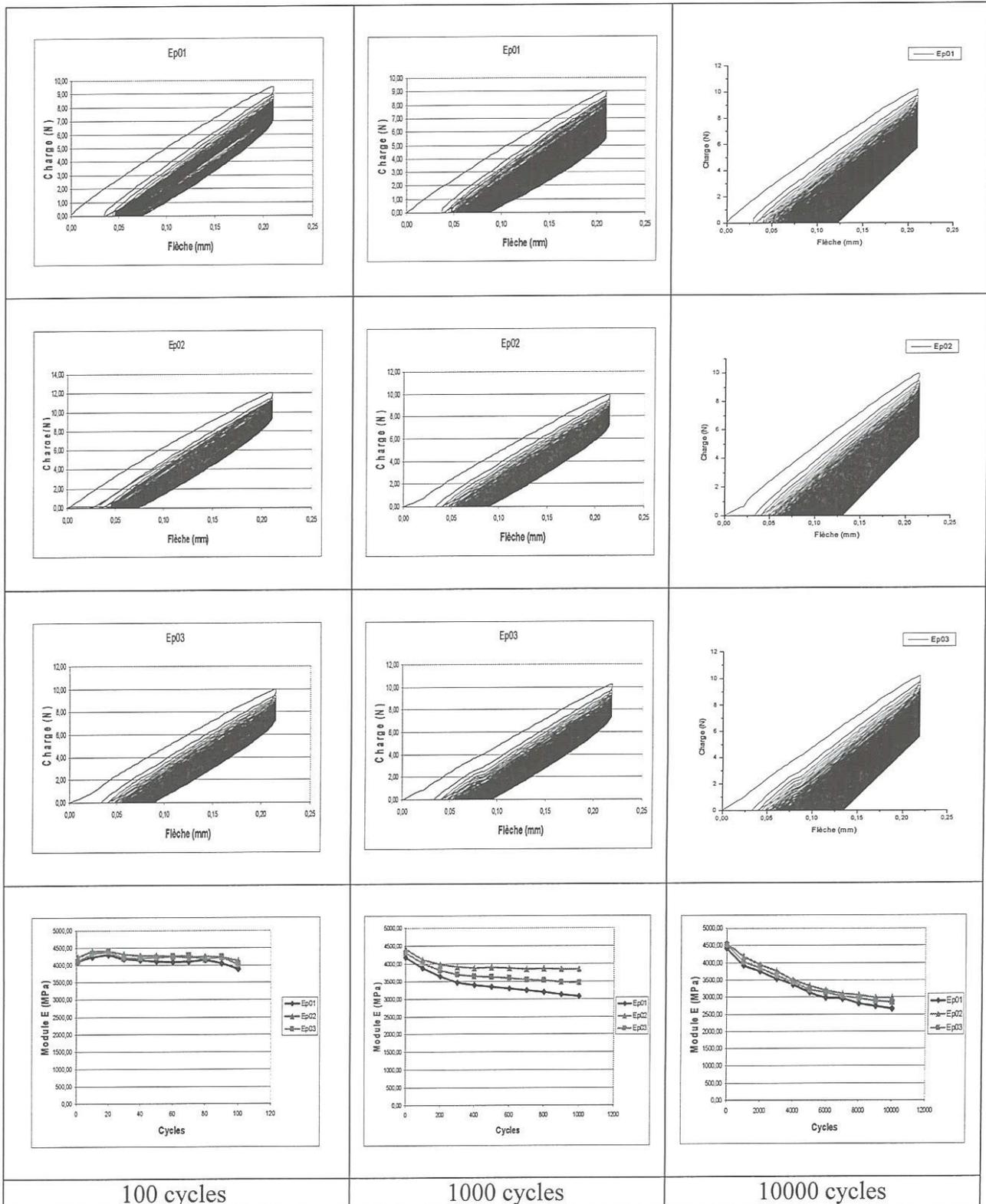


100 cycles

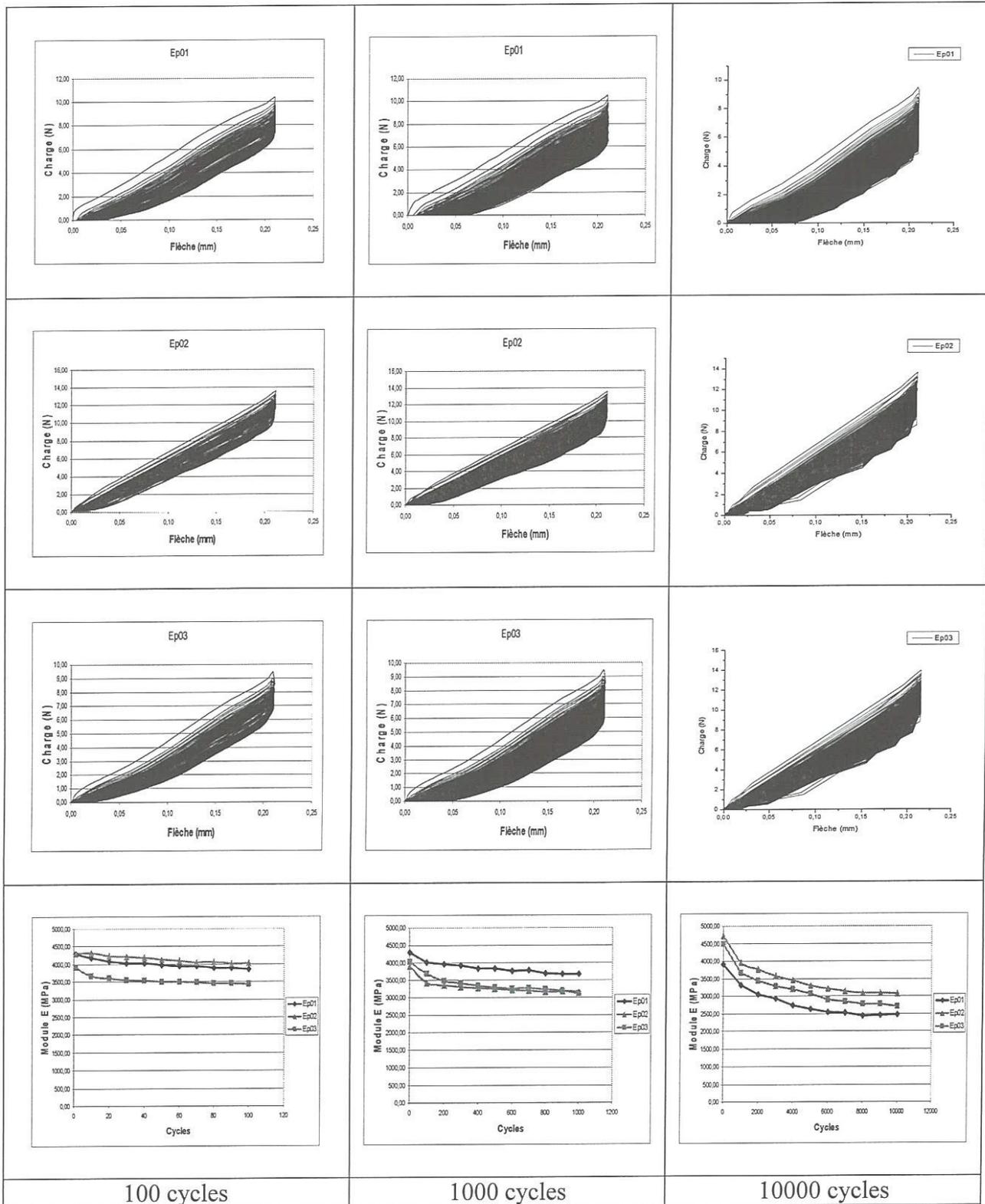
1000 cycles

10000 cycles

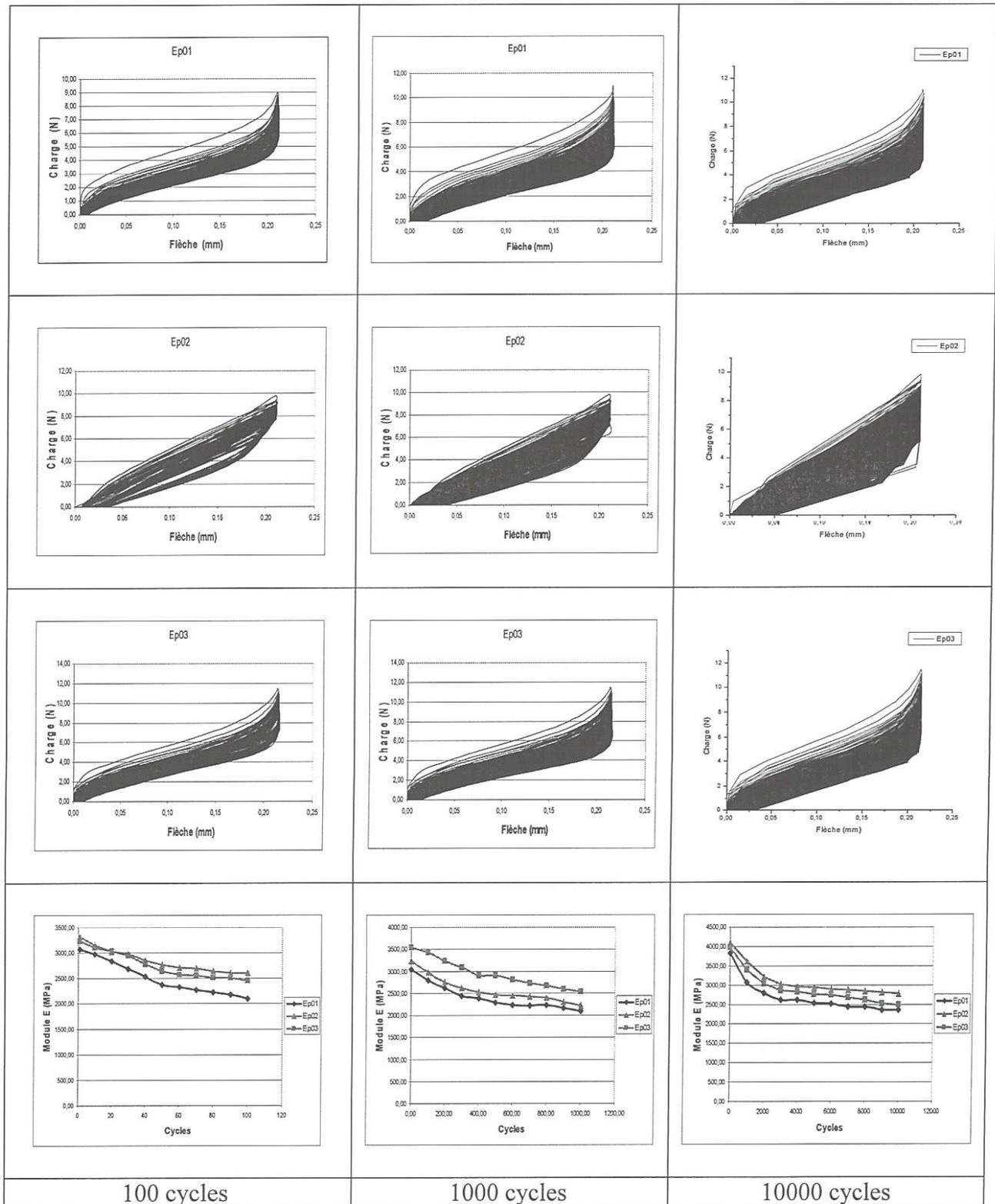
$$a=1,5\text{mm } V=500\text{mm/min } F=0,8 \cdot F_c$$



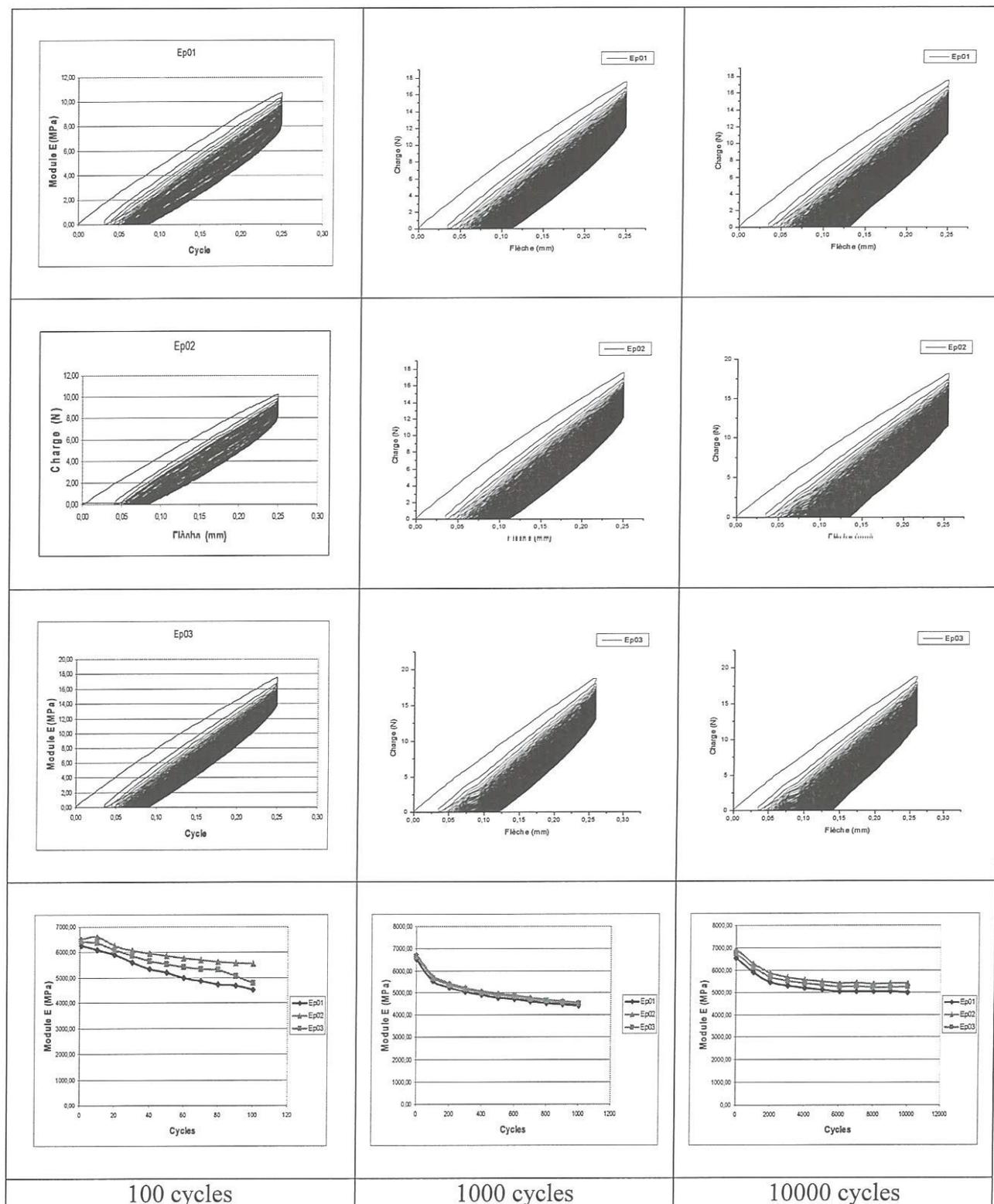
$a=4,5\text{mm}$ $V=2\text{mm/min}$ $F=0,6*F_e$



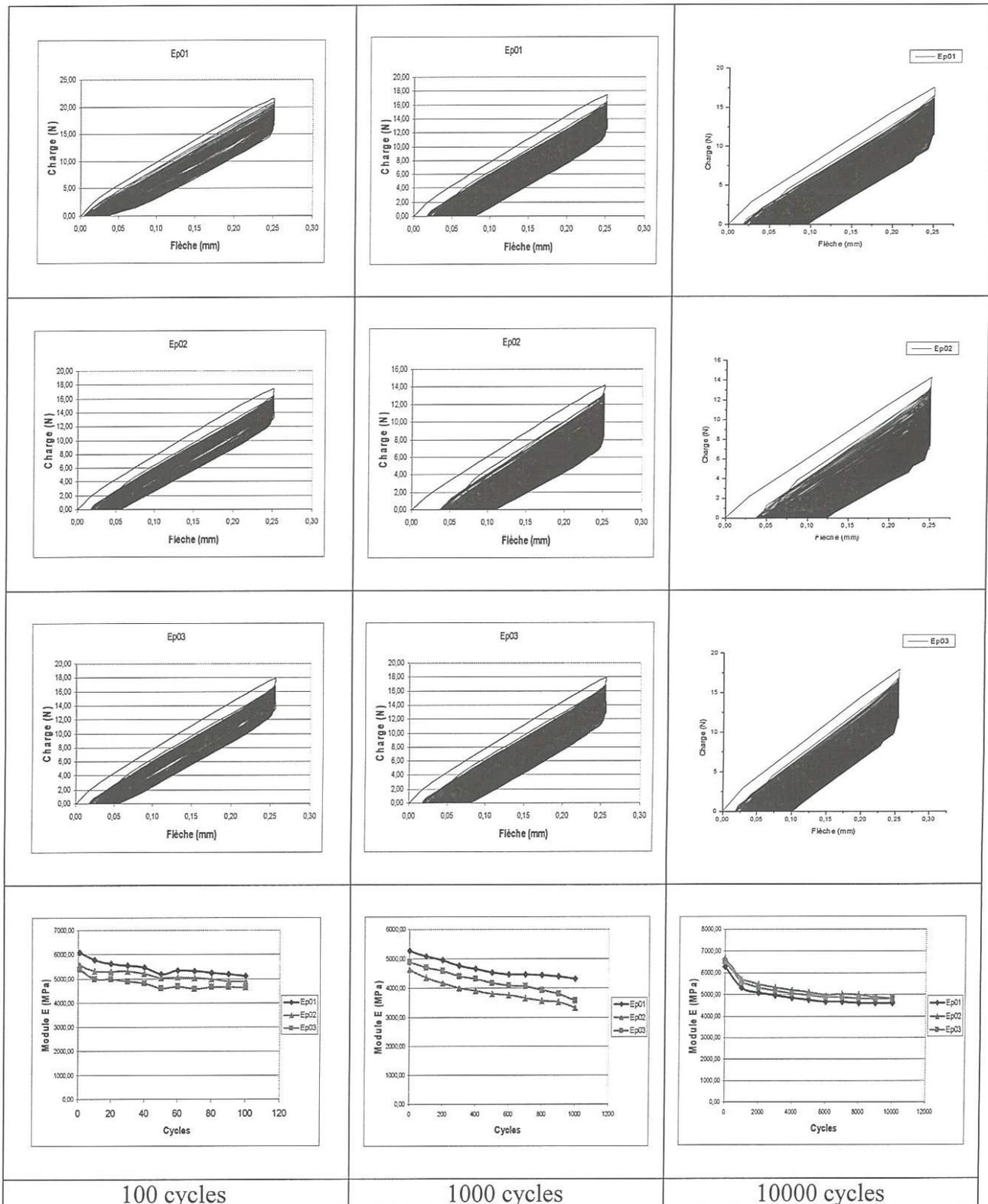
$a=4,5\text{mm}$ $V=100\text{mm/min}$ $F=0,6*F_e$

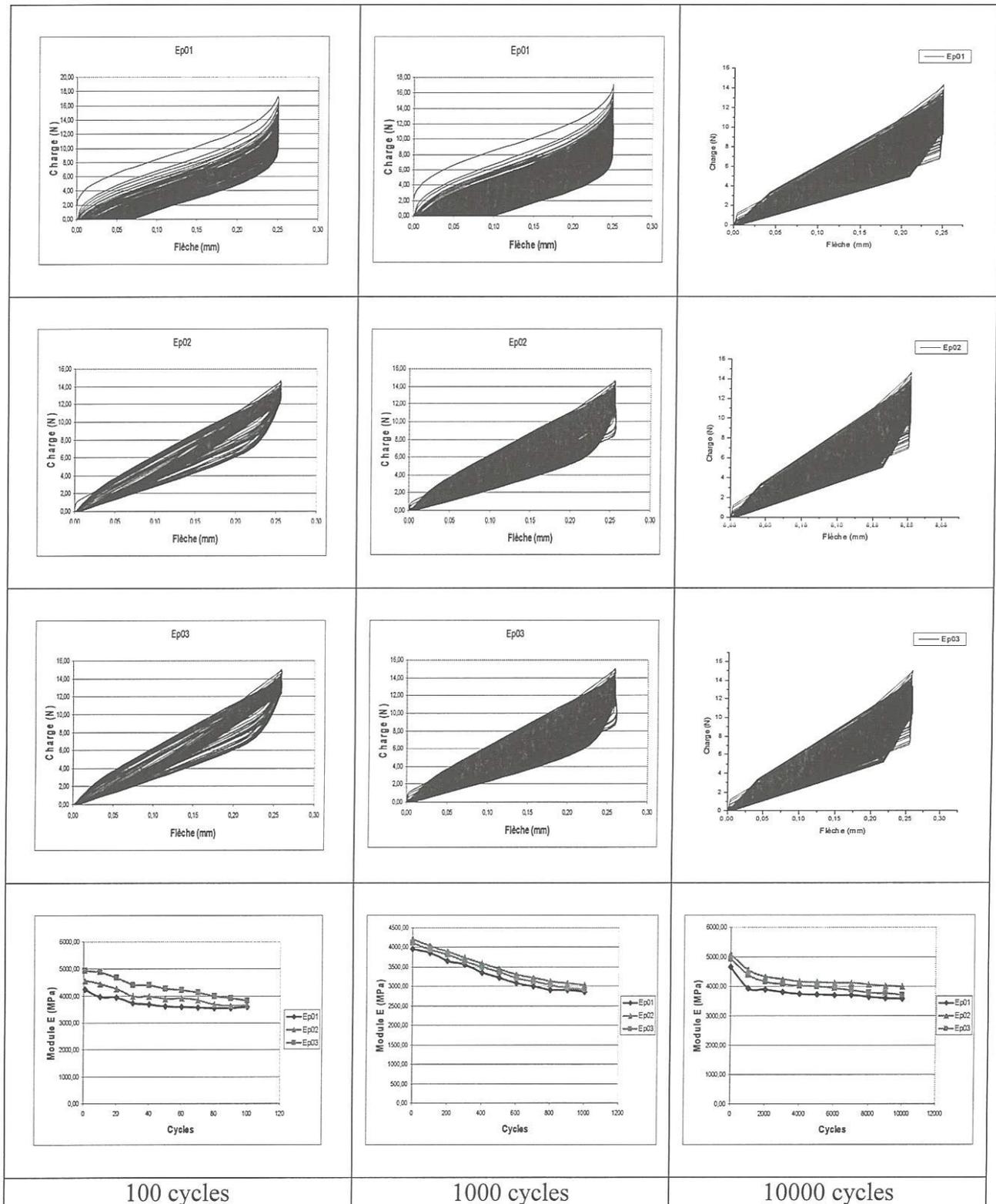


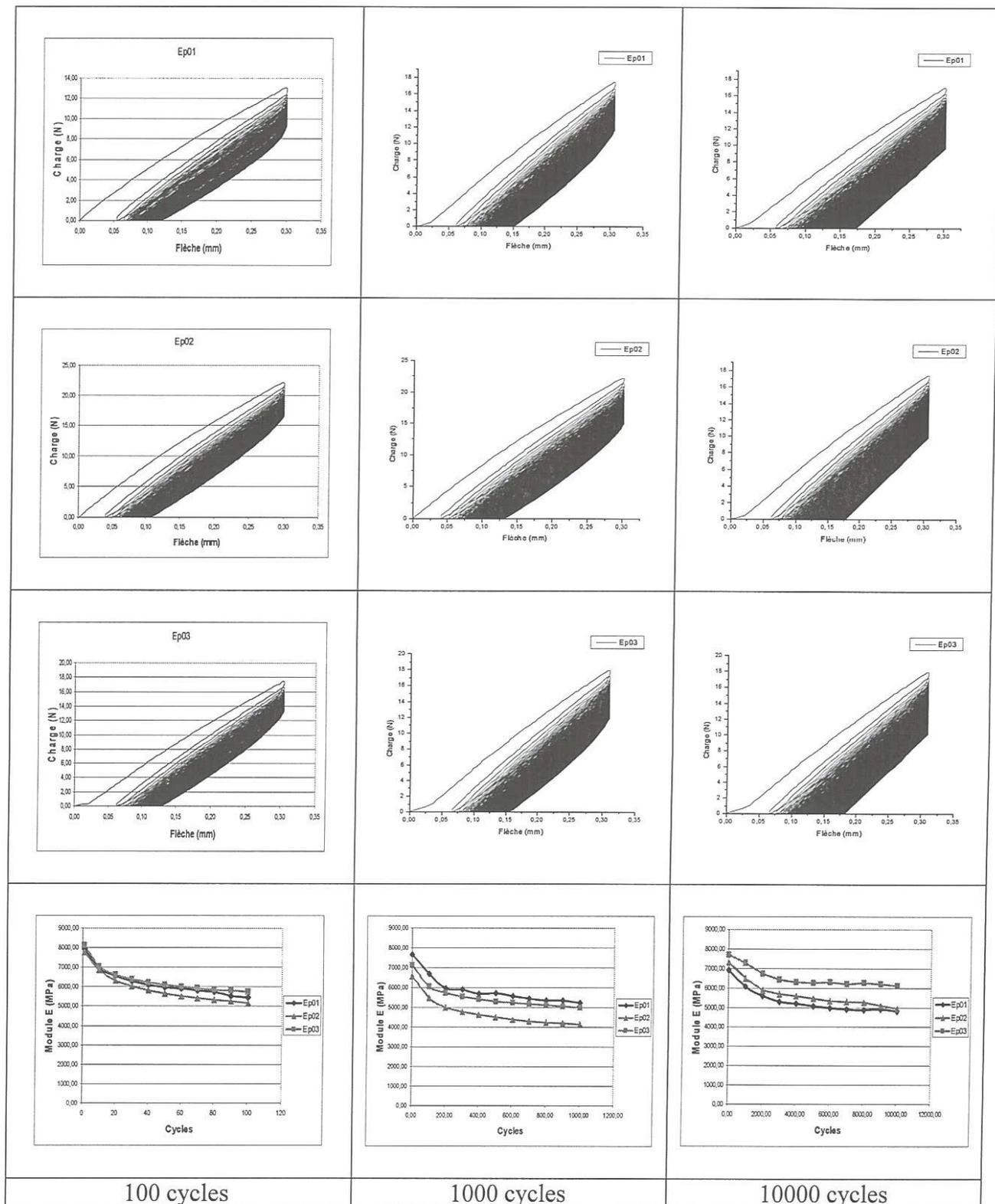
$$a=4,5\text{mm } V=500\text{mm/min } F=0,6*F_e$$

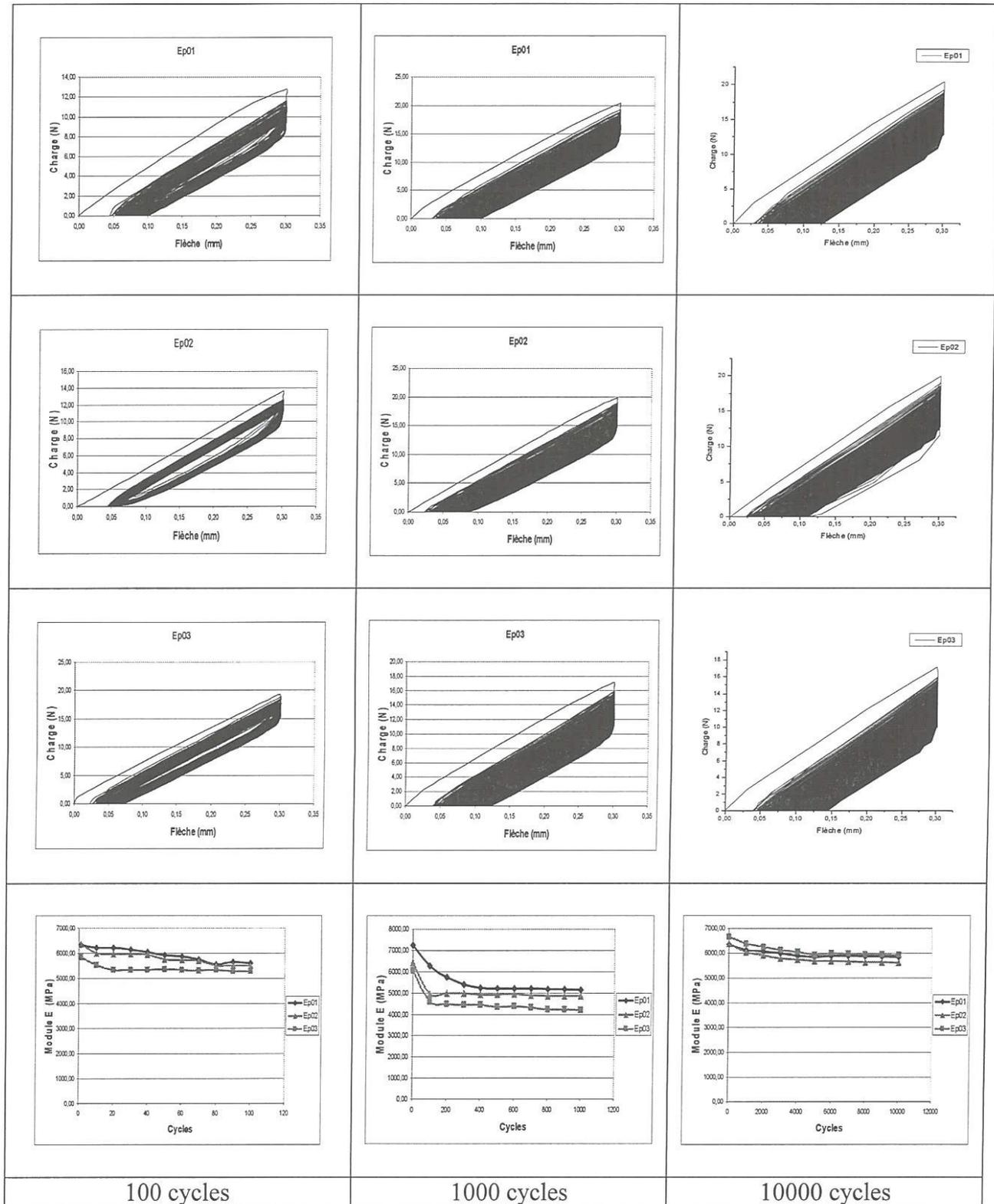


$a=4,5\text{mm}$ $V=2\text{mm/min}$ $F=0,7 \cdot F_e$

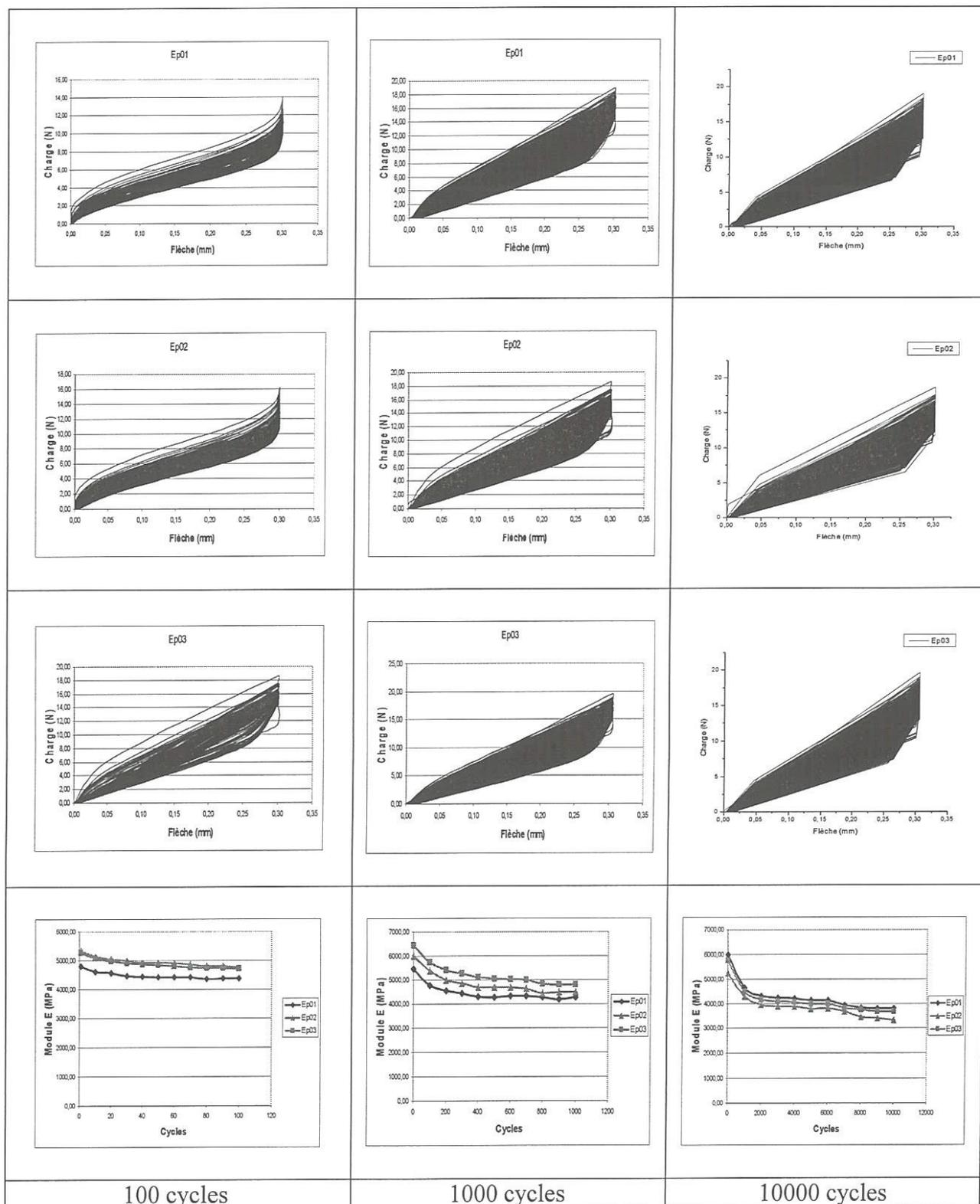








$a=4,5\text{mm}$ $V=100\text{mm/min}$ $F=0,8*F_e$



100 cycles

1000 cycles

10000 cycles

$a=4,5\text{mm}$ $V=500\text{mm/min}$ $F=0,8*F_e$

