



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministry of Higher Education and Scientific Research
جامعة عبد الحميد ابن باديس - مستغانم
Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculty of Sciences and Technology
قسم الهندسة الميكانيكية
Department of Mechanical Engineering



N° d'ordre : M...../GM/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Comportement mécanique d'une plaque stratifiée sous l'effet
d'interaction entaille-fissure.**

Présenté par :

❖ **Mekrabech** Samira

Soutenu le 25/06/2020 devant le jury composé de :

Président	Dr. M. Sahnoun.	M.C.A. Université de Mostaganem
Examineur	Mme. A. Belhachemi	M.A.A. Université de Mostaganem
Examineur	Mr. A. Rachid	Doctorant, Université de Mostaganem
Encadreur	Pr. D.Ouinas	Université de Mostaganem

Année Universitaire : 2019/2020

-ملخص-

تحت تأثير تركيز الضغوط في الكسر، يؤثر التمزق على المراحل الأكثر هشاشة؛ يبدو أن هذه الظاهرة هي نتيجة الآليات المختلفة المرتبطة بتنمية مناطق متصدعة صغيرة وكبيرة. تمت دراسة توزيع الإجهاد وإجراء تحلي لالتواء على صفائح مصنوعة من مواد مركبة هجينة ذات أبعاد متغيرة بدون شق ومع وجود شق باستخدام طريقة العناصر المحدودة. $[(\theta/-\theta)]$ تم ترتيب الصفائح الرقائقي بشكل متناظر بالطريقة المنظمة التالي يتم إظهار مقاومة التواء الألواح الرقائقي المعرضة للضغط أحادي كدالة لتوجهات الألياف ونسبة متباينة الحجم وحجم واتجاه الشق.

الكلمات المفتاحية : الشق،التواء، مواد مركبة، تحليل العناصر المحدودة

Résumé

Sous l'effet de concentration de contraintes dans les entailles la rupture touche les phases les plus fragiles; ce phénomène semble la conséquence des différents mécanismes liés au développement d'une large zone endommagée microfissurée. La distribution de contraintes dans une plaque stratifiée en composite en présence d'une entaille a été étudiée en utilisant la méthode des éléments finis.

Dans cette étude, une analyse de flambage a été effectuée sur des plaques de dimensions variables en matériau composite avec et sans entaille en utilisant le code Abaqus. Les plaques stratifiées ont été arrangées symétriquement de la manière ordonnée suivante $[(\theta/-\theta)]$. La résistance au flambage des plaques stratifiées soumises à la compression uni-axiale est mise en évidence en fonction des orientations des fibres, le rapport d'anisotropie, la taille et l'orientation de l'entaille.

Mots clés : Entaille, Flambage, Matériaux composites stratifiés, Analyse par éléments finis.

Abstract

As a result of stress concentration in the notches, the fracture affects the most brittle phases; this phenomenon seems to be the consequence of the various mechanisms linked to the development of large damaged micro-cracked area. The stress distribution in a composites laminate plate with a notch was studied using the finite element method. In this study a buckling analysis was carried out on plates of variable dimensions in the laminate plates were arranged symmetrically in the following orderly manner $[(\theta/-\theta)]$, the buckling resistance of laminated plates subjected to uniaxial compression in demonstrated as a function of the orientations of the fibers, the ratio of anisotropy, size and orientation of the notch.

Keywords: Notch, Buckling, Laminate composite materials, finite element analysis.

Remerciements

Je remercie **Dieu**, le tout puissant de m'avoir donné le courage et la volonté pour atteindre ce but.

Je dois exprimer remerciements à Mon encadreur **D. Ouinas** professeur à l'université de Mostaganem, pour ces efforts, ces conseils et le partage de ses compétences scientifiques durant les quarts années universitaires.

Mes remerciements sont adressés également au président du jury Mr **M. Sahnoun**, Maître de conférences A à l'université de Mostaganem d'avoir présidé examiné ce travail et d'avoir présidé ce jury.

J'adresse aussi mes remerciements membres de jury Mme **A. Belhachemi** et Mr **A. Rachid** pour participation au jury de ce travail.

Sans oublié Mr **A. Djaffel** docteur à l'université de Sidi-Bel Abbés, pour m'avoir soutenue.

Dédicace

Je dédie ce travail à

Ma chère Maman

Sommaire

Résumé.....	1
Liste des figures.....	6
Liste des tableaux.....	7
Généralité sur la structure stratifiée en matériaux composites	8
Chapitre I	
I-Généralité sur matériaux composites	8
I-1-Matériaux composites	8
I-2-1-Définition d'un matériau composite	9
I-2-2-Principaux constituants	9
I-2-3- Matrices.....	9
-Matrice organique	10
A. Résine thermoplastique	10
B. Matrice thermodurcissable	10
I-2-2-3- Additifs.....	11
I-3-Renforts	11
A. Renforts fibreux.....	11
- Les fibres longues	12
- Les fibres courtes.....	12
B. Renforts particules	12
I-4-Constitution des matériaux composites.....	12
I-4-1 Structure en composites stratifiés.....	12
- Le pli.....	12
- Le stratifié.	12
I-4-1-1-Désignation des structures stratifiées	13
Chapitre II	
II-1-Introduction.....	15
II-2 Etude numérique du Flambement des plaques en matériau orthotrope	15
II-2-1 Démarche d'analyse par éléments finis.....	15
II-2-2Modélisation par éléments finis.....	16

II-3-Résultats et discussion.....	18
II-3-1-Effet de l'orientation.....	18
II-3-2-Effet de la position de la fissure.....	20
II-3-3-Effet de la fissure.....	29
II-3-4-Effet de inclinaison de la fissure.....	44
Conclusion Générale	51
Références.....	52

Liste des figures

Chapitre

Figure I.1. Représentation des constituants d'un composite.....	9
Figure I.2. Types de matrice.....	10
Figure I.3. Types de renforts.....	11
Figure I.4. Les échelles en composites stratifiés.....	12
Figure I.5. Représentation d'un pli.....	13
Figure I.6. Stratification d'un composite.....	13

Chapitre II

Figure II.1. Démarche de calcul par élément finis à l'aide du code de calcul Abaqus	16
Figure II.2. Test de convergence du maillage.....	17
Figure II.3. Maillage d'une plaque.....	17
Figure II.4. Facteur de charge de flambement en fonction de l'orientation des plis pour des plaques encastées	19
Figure II.5. Facteur de charge de flambement en fonction de l'orientation des plis Pour des plaques rotulées	20
Figure II.6. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis pour des plaques encastées.....	21
Figure II.7. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis des plaques encastées.	23
Figure II.8. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis des plaques encastées.	24
Figure II.9. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis pour des plaques rotulées.....	26
Figure II.10. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis pour des plaques rotulées.....	27
Figure II.11. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis pour des plaques rotulées.....	29
Figure II.12. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure longitudinale pour des plaques encastées.....	32
Figure II.13. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure longitudinale Pour des plaques rotulées.....	34
Figure II.14. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure transversale pour des plaques encastées.....	37

Figure II.15. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure transversale Pour des plaques rotulées.....	39
Figure II.16. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure inclinée pour des plaques encastrées.....	42
Figure II.17. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure inclinée pour des plaques rotulées.....	44
Figure II.18. Facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée pour des plaques encastrée.....	46
Figure II.19. Facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée pour des plaques encastrée.	47
Figure II.20. Facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée pour des plaques rotulées.....	49
Figure II.21. Facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée pour des plaques rotulées.....	50

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Caractéristiques des résines thermoplastiques.....	10
Tableau I.2. Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	11

Chapitre II

Tableau II.1. Propriétés mécaniques du matériau de la plaque	17
--	----

Généralité sur la structure stratifiée en matériaux composite

Cette époque sera certainement appelée l'âge du composite. De plus en plus le composite prend une place importante dans notre vie, le phénomène est encore plus remarquable dans l'industrie de l'aéronautique et cela se comprend facilement quand on sait que chaque once soustraite d'une structure d'avion se traduit par une importante économie de carburant et cela durant toute la période d'utilisation de l'appareil. On peut alors imaginer l'importance de chaque réduction de poids dans la construction d'un appareil.

Le passage des matériaux métalliques aux matériaux composites engendre des coûts importants mais il s'agit en fait d'un investissement à moyen et long terme. L'inhomogénéité et l'anisotropie des matériaux composites rendent leurs mécanismes d'endommagement plus nombreux et plus complexes. Au sein d'une structure composite, on peut voir apparaître un endommagement constitué de micro-décohésions et de microfissures, des ruptures de pli, ruptures des fibres et des matrices, décohésion de l'interface.

Les matériaux composites sont comme leur nom l'indique, constitués des divers matériaux, chacun ayant des propriétés et fonctions spécifiques. Généralement, un composite comprend une matrice (résine) dans laquelle est distribué un renfort (des fibres) afin d'améliorer les propriétés du produit. L'avantage des matériaux composites comparés aux autres matériaux est que ceux-ci associent forte résistance et légèreté et de varier les propriétés lors de la fabrication. Par ailleurs, il est possible d'obtenir le produit final à partir des matériaux de base en une seule étape.

Les plaques stratifiées en matériaux composites sont largement utilisées dans l'industrie et dans les nouveaux champs de technologie. A cause de hauts degrés d'anisotropie et de basse rigidité en cisaillement transversal. La théorie classique de stratifié n'est plus adéquate. L'hypothèse déclare que la normale transversale au mi-plan d'une plaque reste droite et normale après la déformation.

I-Généralités sur les matériaux composites

I-1-Matériaux composites

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice. Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme de fibres continues ou discontinues.

Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée.

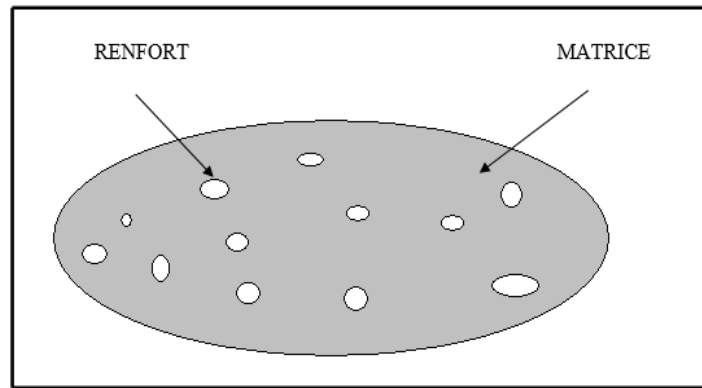


Fig. I.1. Représentation des constituants d'un composite [1].

I-2-1-Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont les performances sont supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice.

I.2. 2.Principaux constituants

Les composites sont principalement constitués d'une matrice et de renfort ainsi que des charges et des additifs dont leur contribution est secondaire. Ils peuvent être classés selon la nature des composants principaux ou par rapport à leur forme. Nous présentons les différents types de matrices et renforts classiquement employés dans l'industrie. Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques [1].

I-2-3-Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 200°C peuvent être atteintes.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la Figure I.2.

.

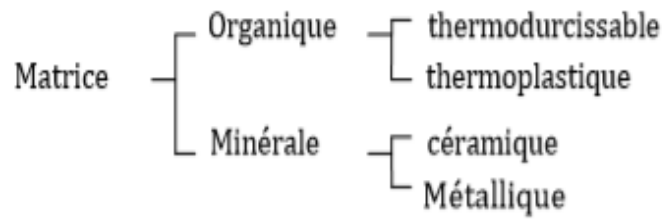


Fig. I.2. Types de matrice [2].

- **Matrice organique** : il existe une grande variété de résines polymères synthétiques et leur facilité de mise en forme justifie leur position dominante en termes d'utilisation, seulement, leur domaine d'emploi ne peut pas excéder 300°C. Cette dernière peut être scindée en trois grandes classes possédant des propriétés très différentes :

A. Résines thermoplastique

Utilisée en masse du fait du faible coût, et elle a aussi la faculté d'être recyclée vue la faible liaison de ses molécules qui peut être brisée par un apport thermique d'une manière réversible, seulement sa transformation requiert des températures très élevées et elles sont généralement qualifiées par de faibles propriétés mécaniques. Ces résines sont de nature amorphe ou semi cristallin de structure linéaire ou ramifiée, elles peuvent être subdivisées en plastique de grande diffusion (usage courant) et plastiques techniques (hautes performances). Le tableau ci-dessous regroupe les différentes résines thermoplastiques.

Ce tableau présente quelques caractéristiques mécaniques :

Résine	$T_f(^{\circ}C)$	$\rho(Kg/m^3)$	$\varepsilon_t^R(\%)$	$\sigma_t^R(MPa)$	$\sigma_c^R(MPa)$	$E(GPa)$
Polyamide	65 à 100	1140		60 à 85		1.2 à 2.5
Polypropylène	900	1200		20 à 35		1.1 à 1.4

Tableau I.1. Caractéristiques des résines thermoplastique [2].

B. Matrice thermodurcissable

Ce sont des polymères réticulés ayant un réseau moléculaire tridimensionnel, le produit ainsi formé est solide et infusible ce qui empêche son recyclage, d'où une nouvelle hausse de température entraîne sa destruction. Ces résines ne peuvent être récupérer après leur mise en forme car leurs molécules sont fortement reliées par des liaisons de type covalente et donc théoriquement établies de manière irréversible [14]. Tandis qu'elles possèdent des propriétés mécaniques, plus particulièrement thermomécaniques nettement supérieures à celles des résines thermoplastiques, ce qui suscite leur grand emploi. Le tableau 2 illustre les caractéristiques des résines thermodurcissables.

Résine	$T_f(^{\circ}C)$	$\rho(Kg/m^3)$	$\varepsilon_t^R(\%)$	$\sigma_t^R(MPa)$	$\sigma_c^R(MPa)$	$E(GPa)$
Polyamide	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2.8 à 3.6
Polypropylène	120	1200	2.5	40	250	3 à 5
époxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

Tableau I.2. Caractéristiques des résines thermodurcissables [2].

I-2-2-3-Additifs

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (charges renforçantes, ex : charges sphériques creuses 5 à 150 μm). Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites [1].

I-3-Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri-directionnel ou plus). La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure I.3

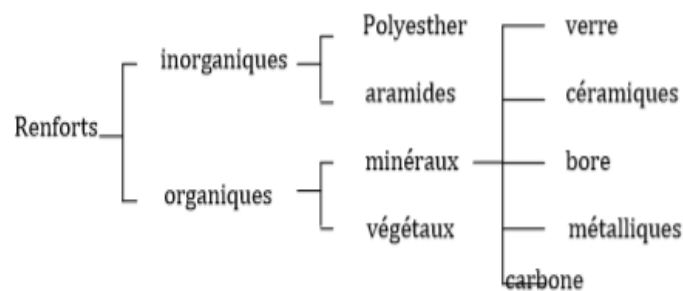


Fig. I.3. Types de renforts [2].

A. Renfort fibreux

Le renfort est sous forme de fibres, leur disposition ainsi que leur orientation conditionne les propriétés mécaniques du matériau composite. A cet effet, le concepteur peut prévoir, contrôler et modifier leur comportement mécanique et physique en dépendance de leur nature et leur proportion. En outre, Les fibres se distinguent aussi par leur géométrie (fibres longues ou courtes).

-**Les fibres longues** : Sont conçues pour des applications structurales, dont les pièces devant supporter de grands efforts, ainsi, l'orientation des renforts doit être adaptée aux chargements imposés. Ils sont employés principalement dans le secteur aéronautique, aérospatial, nautique ainsi que l'automobile.

-**Les fibres courtes** : Sont destinées à des applications non structurales, elles peuvent être disposées aléatoirement sans orientations privilégiées, dont le matériau ainsi conçu est quasi-isotrope.

B. Renfort à particules

Sans dimensions privilégiées, ils sont employés pour améliorer certaines propriétés mécaniques ou physiques et parfois uniquement, pour réduire le coût tout en conservant les caractéristiques du matériau.

I-4-Constitution des matériaux composites

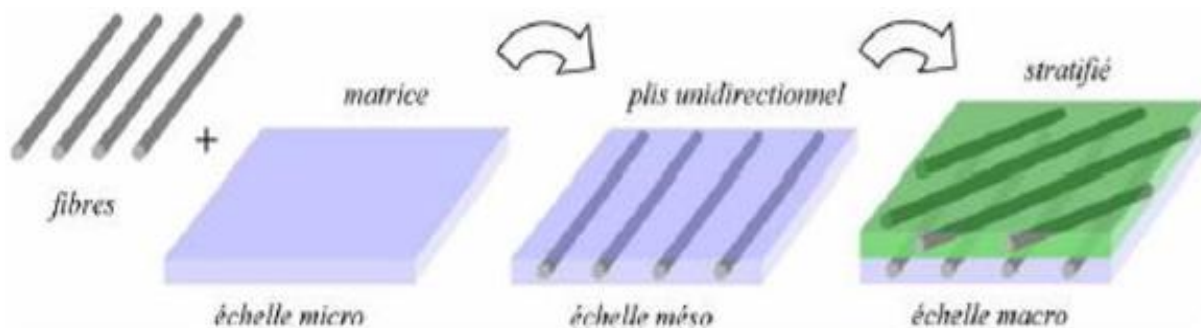


Fig. I.4. Les échelles des constituants d'un composite stratifié [3].

I-4-1-Structures en composites stratifiées

Les structures en composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurales sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir [1].

- **Le pli**

Un pli représente l'élément de base de la structure composite comme montre la Fig. I.5, les différents types de pli sont des plis : à fibres longues, à fibre tissées et à fibre courtes.

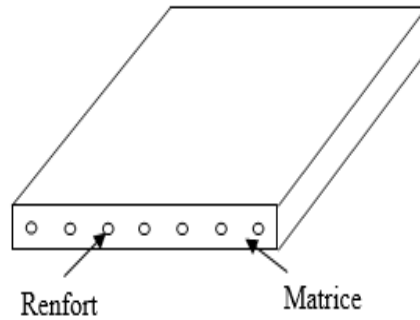


Fig. I.5. Représentation d'un pli [4].

- **Le stratifié**

Un stratifié est constitué d'un empilement de pli ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun à la coque et il est désigné comme étant le référentiel du stratifié (Fig. I.6).

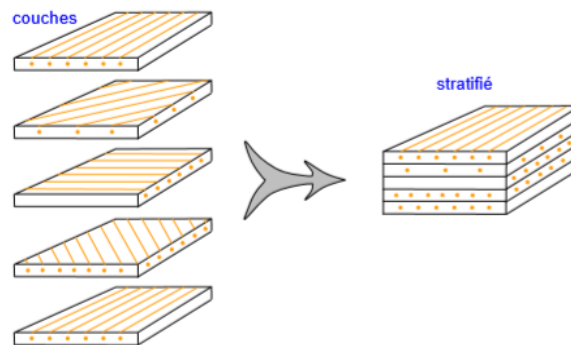
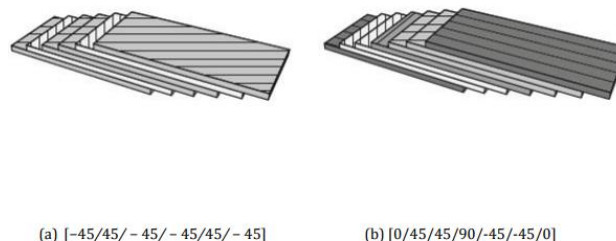


Fig. I.6. Stratification d'un composite [4].

I-4-1-1-Désignation des structures stratifiées

Les structures stratifiées à base de tissu unidirectionnel sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son gramme. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0,125mm pour un matériau carbone époxy de type Aéronautique et 0,3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'Industrie Nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches Unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.



(a) [-45/45/- 45/- 45/45/- 45]

(b) [0/45/45/90/-45/-45/0]

Fig. I.7. Désignations du stratifié [2].

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence. Un stratifié est codifié de la façon suivante :

- chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x. Sur les Figs. I.7(a) et I.7(b), les couches sont décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut ;
- les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de la Figure I.6(a) : $[-45/45/-45/-45/45/-45]$;
- les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme sur la Fig.1.7(b) : $[0/45/45/90/-45/-45/0]$;
- en cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche ;
- en cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole s indique la symétrie : $[-45/45/-45/-45/45/-45]$ devient $[-45/45/-45]_s$, et $[0/45/45/90/-45/-45/0]$ devient $[0/45_2/90/-45_2/0]_s$.

Etude numérique

II-1-Introduction

Dans le cadre de l'introduction massive des matériaux composites au sein des constructions aéronautiques, une attention particulière est portée sur le comportement au flambage et les capacités de dissipation énergétique des structures élémentaires. Dans l'industrie les composites stratifiés se sont imposés pour la fabrication des pièces de structures primaires, grâce à leurs performances, leur qualité de légèreté et leur souplesse de forme. La conception de ce type de structures nécessite de mettre en place des outils de modélisation du comportement mécanique de plus en plus sophistiqués et prenant en compte les spécificités de ces matériaux. Les méthodes numériques et notamment la méthode des éléments finis sont indispensables pour le dimensionnement des structures composites complexes. Actuellement, l'analyse du comportement des plaques stratifiées reste toujours un problème de recherche ouvert, suite à leur comportement complexe.

En effet, en plus de leur comportement généralement anisotrope et la présence d'importantes déformations de cisaillement transverse, viennent s'ajouter les paramètres : extension-flexion. La plupart des recherches réalisées sur les plaques stratifiées, sont dédiées à la détermination des contraintes, des déformations ou des déplacements d'origine flexionnelle.

Dans le présent travail qui est une contribution à l'analyse des plaques minces stratifiées en matériaux composites en utilisant la méthode des éléments finis. Différentes géométries des plaques stratifiées en présence d'entaille et sollicitées en compression sont étudiées. Les effets de la taille de l'entaille et sa position, de l'orientation des plis et de l'épaisseur de pli sur la charge du flambage

II-2 Etude numérique du Flambement des plaques stratifiées

II-2-1 Démarche d'analyse par éléments finis

La simulation numérique peut nous apporter une aide précieuse dans la conception et la réalisation des pièces en matériaux composites. En fait, les pièces ou les structures à base des matériaux composites ne sont pas seulement définies par leur enveloppe extérieure, comme c'est le cas des pièces métalliques, mais également par leur constitution interne. De plus cette structure présente une anisotropie dont le concepteur doit tenir en compte. Donc on doit se

doter de logiciels qui permettent de dessiner la pièce à partir de sa forme extérieure et d'en préciser les différentes épaisseurs, les renforts, les orientations des fibres, etc. cette modélisation permet d'établir un pré-dimensionnement de la pièce avant qu'elle soit analysée plus précisément par des solveurs adaptés. Le code de calcul commercial Abaqus standard est un environnement complet de pré et post-traitement dédié à l'analyse par éléments finis, qui nous permet de développer et tester virtuellement des conceptions de produits.



Fig. II.1. Démarche de calcul par élément finis à l'aide du code de calcul Abaqus [6].

Comme la montre la figure .II.1, la structure du calcul par élément finis est composée de trois modules essentiels : le préprocesseur, le solveur et le post processeur.

D'un autre coté, le calcul par éléments finis permet de valider le design selon les démarches suivantes :

- Préparation du modèle (module préprocesseur)
- Résolution (module solveur)
- Exploitation des résultats (module post-processeur)

II-2-2 Modélisation par éléments finis

La modélisation, puis la simulation numérique de la mise en forme des tôles métalliques ont déjà mobilisé les efforts de nombreux chercheurs pendant plusieurs décennies. Cependant, l'avènement de nouveaux matériaux à fort potentiel d'allègement pour l'automobile – aciers à très haute résistance, alliages d'aluminium, magnésium – a mis en défaut bon nombre de modélisations et d'essais expérimentaux existants. D'autre part, les progrès enregistrés par les moyens de calcul et les logiciels permettent aujourd'hui d'aller beaucoup plus loin dans l'intégration des modèles et de la simulation numérique, ainsi que dans leurs applications à de nouveaux procédés de formage industriels. De ce fait, les problématiques de retour élastique, limites de formage et anisotropie ont fait une réapparition remarquable dans les conférences scientifiques.

Le but de la présente recherche, est donc d'étudier numériquement le problème du flambement des plaques minces en composite stratifié.

Le premier chapitre traite quelques généralités sur les alliages d'aluminium, leur caractéristique mécanique et les atouts de l'aluminium, Métallurgies d'aluminium et ses alliages ainsi quelque méthode de Classification et désignation de l'aluminium et ses alliages. Dans cette étude nous avons considéré trois plaques minces d'un matériau orthotrope de hauteur H et de largeur B . Le rapport entre les dimensions H et B égal successivement $H/B = 1, 1.5$ et 2 . Les caractéristiques mécaniques du matériau constituant la plaque sont définies sur le tableau II-1.

$E_{11}(MPa)$	$E_{22}(MPa)$	ν_{12}	$G_{12}(MPa)$	$G_{13}(MPa)$	$G_{23}(MPa)$
135000	13000	0.38	6400	6400	4300

Tableau II.1. Propriétés mécaniques du matériau de la plaque.

La plaque considérée est sollicitée en compression uni-axiale dans la direction verticale sous la charge critique appliquée d'amplitude $\sigma = 1N/mm$ par unité de longueur. Dans le calcul nous avons employé le code commercial des éléments finis ABAQUS 6.14. Nous avons utilisé 11150 éléments quadrilatéraux de type S8R avec trois points d'intégration de Gauss par pli et un maillage raffiné au voisinage de la fissure comme le montre la Figure II.3. La résolution a été faite en état de contraintes planes. L'épaisseur de la plaque dépend du nombre de couche du stratifié. Les plaques sont constituées de 6, 12 et 24 plis successivement, chacun a une épaisseur de $e_p = 0.125mm$.

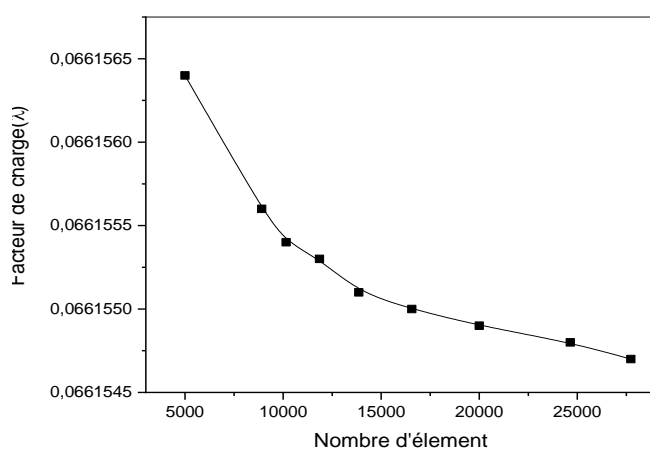


Fig. II.2. Test de convergence du maillage

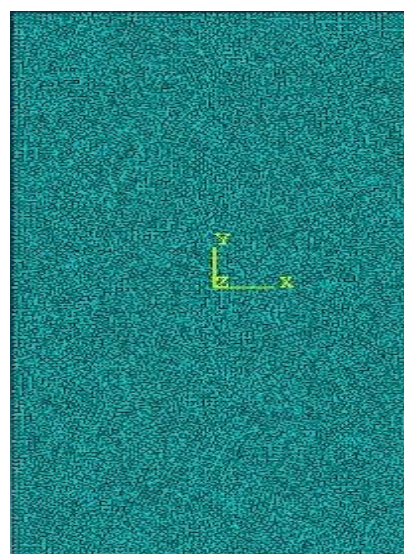


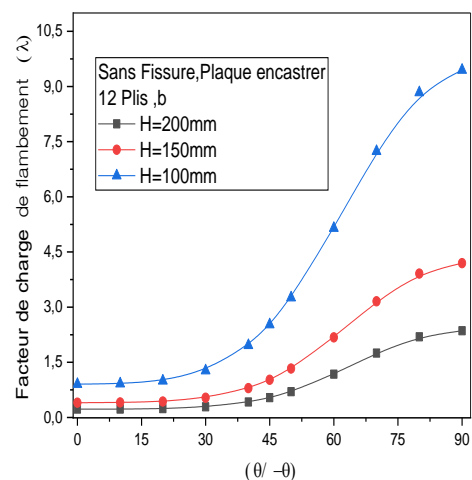
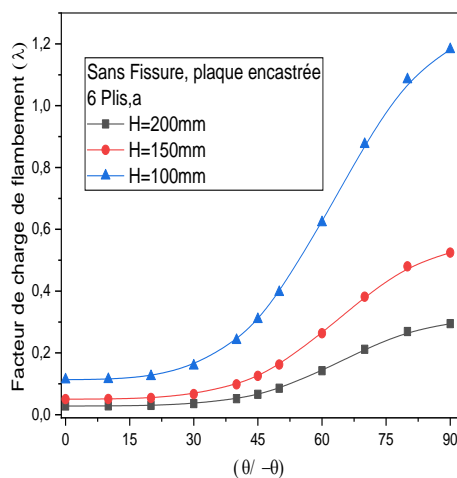
Fig. II.3. Maillage de la plaque.

Après de test de convergence, il s'est avéré que la stabilité est atteinte à partir de 10000 éléments.

II-3-Résultats et discussions

II-3-1-Effet de l'orientation des plis

Sur les Figure II.4 et 5, nous illustrons la variation du facteur de charge en fonction de l'angle d'orientation des plis constituant la plaque stratifiée, respectivement pour deux configurations de conditions aux limites : plaque encastree et plaque rotulee. A partir des Figures II.4 et 5, on peut voir que le facteur de charge de flambage croît avec l'accroissement de l'orientation des plis quelle que soit la hauteur de la plaque et les conditions aux limites. Il est à constater que le facteur de charge maximal est noté à l'angle 90° , lorsque la charge appliquée est parallèle aux fibres des plis. Le facteur de charge de la plaque à hauteur $H=100\text{mm}$ est 8 fois plus que les autres plaques. On remarque aussi, lorsque le nombre de pli est renforcé, le facteur de charge sera amplifié, et donc l'effet de l'orientation affecte le facteur de charge comme la hauteur de la plaque diminue, λ augmente d'une manière visible.



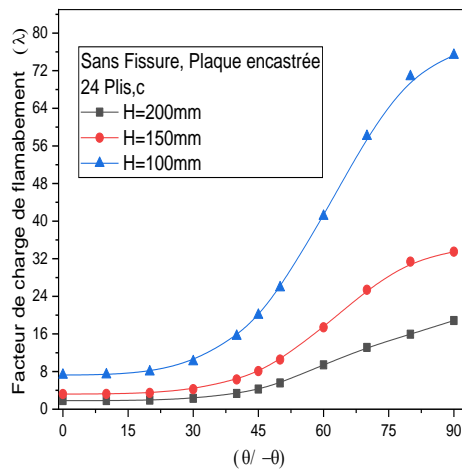


Fig. II.4. Facteur de charge de flambement en fonction de l'orientation des plis pour des plaques encastrées.

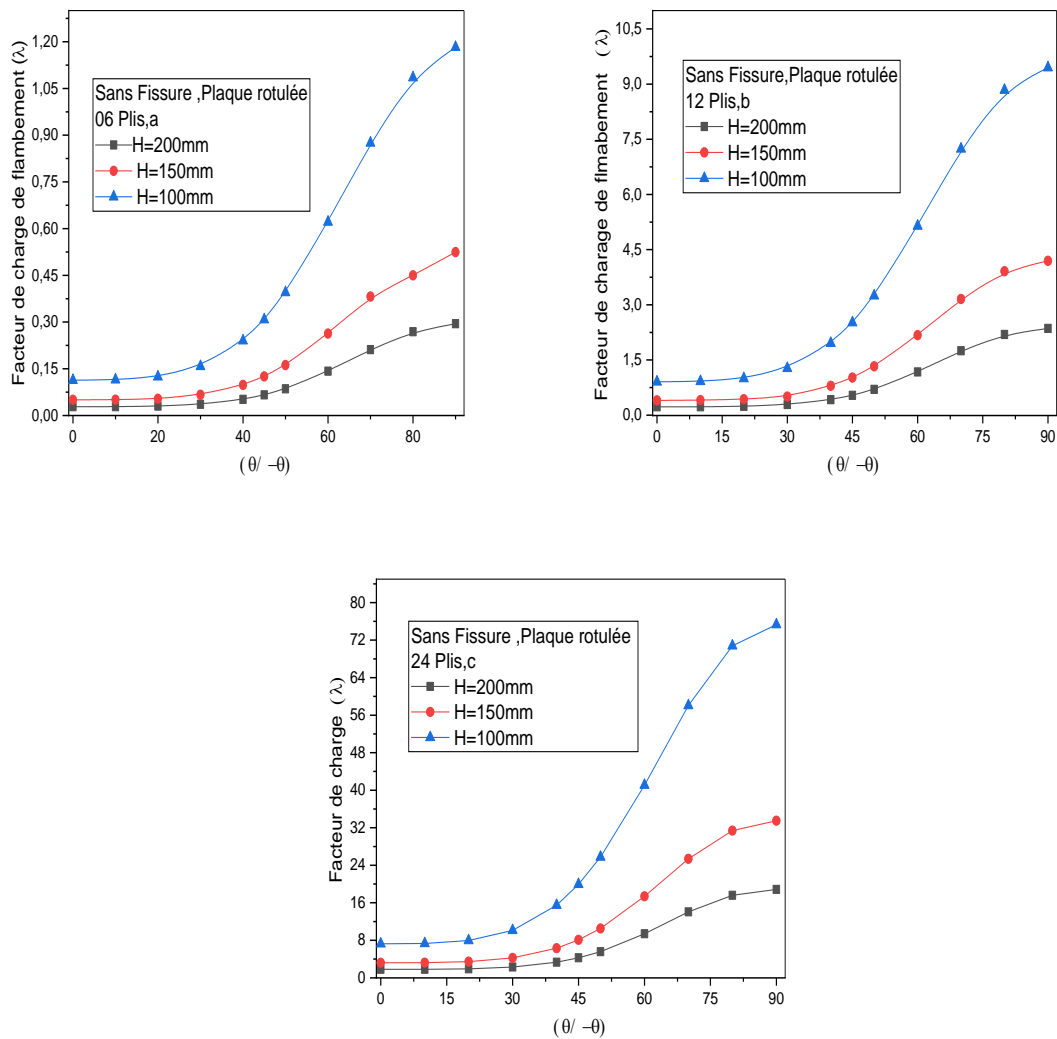


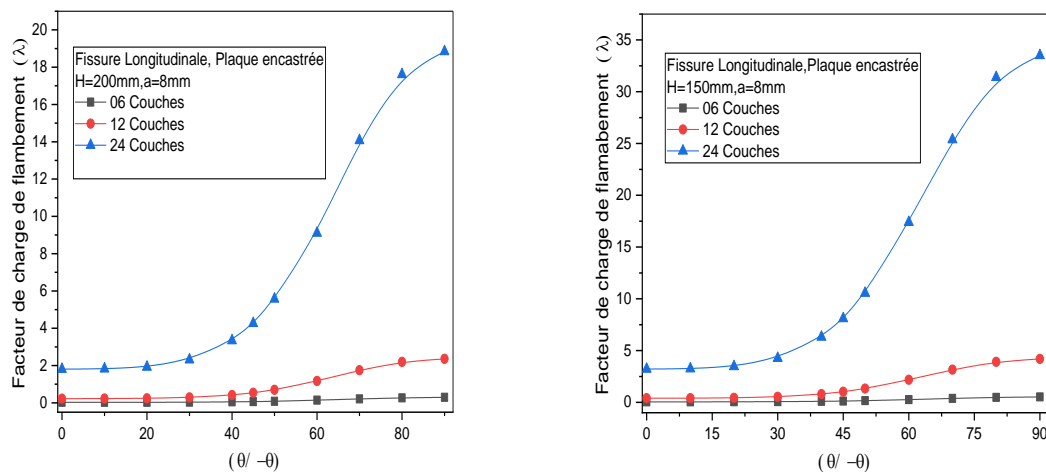
Fig. II.5. Facteur de charge de flambement en fonction de l'orientation des plis Pour des plaques rotulées.

II-3-2-Effet de la position de la fissure

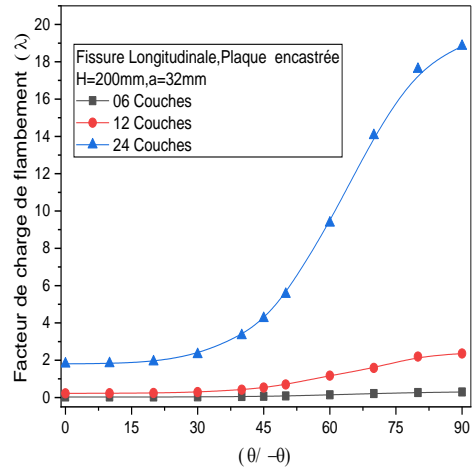
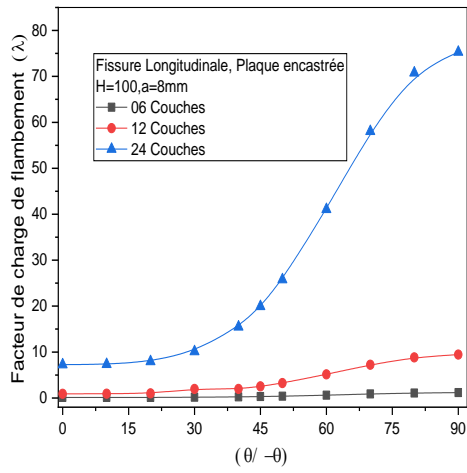
Avec les mêmes conditions que précédemment, nous avons traité la présence de défaut linéaire, dans trois positions différentes : fissure longitudinale, fissure transversale et fissure inclinée à 45°. Deux longueurs de fissures sont considérées, à savoir $a=8\text{mm}$ et 32mm présentent dans des plaques à trois diverses hauteurs.

Les figures II. 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12 montrent la variation du facteur de charge de flambement en fonction de la position de la fissure, pour différentes plaques et plis et pour deux conditions aux limites, encastées et rotulées successivement .

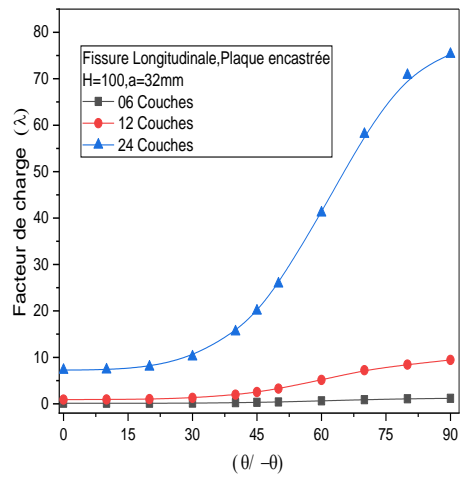
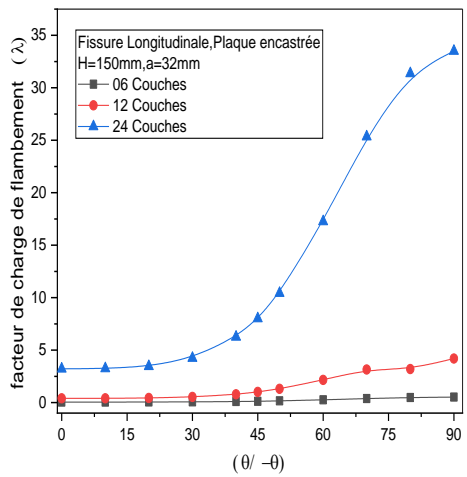
Le facteur de charge augmente rapidement avec l'augmentation des positions des plis, en effet, on constate que les valeurs obtenues pour les plis 6 et 12 au niveau d'orientation ($0^\circ, 20^\circ/-20^\circ, 30^\circ/-30^\circ$) sont pratiquement semblables pour les plaques à hauteur ($H=200\text{mm}$ et 150mm) en comparaison à la plaque de hauteur ($H=100\text{mm}$). Il est à marquer aussi que lorsque l'angle est supérieur à 45° le facteur croît d'une manière monotone jusqu'à une valeur maximale obtenue à l'angle 90° . On constate que le nombre de plis est important sur le facteur de charge afin de résister au flambage de la plaque stratifiée.



(a) $\theta_F = 90^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

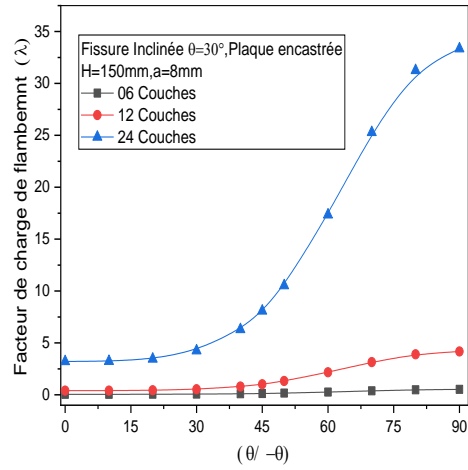
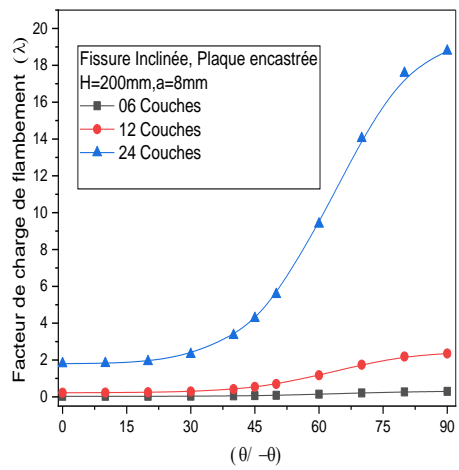


(b) $\theta_F = 90^\circ, e_p = 0.125mm$

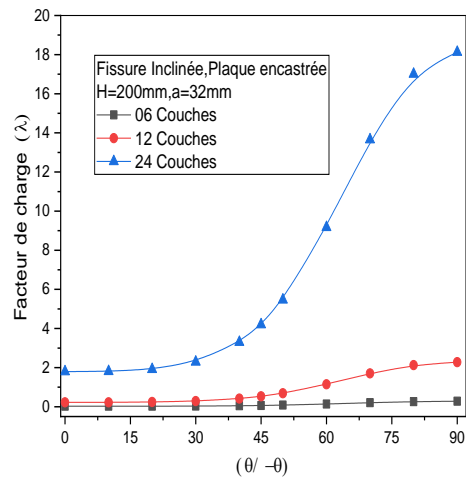
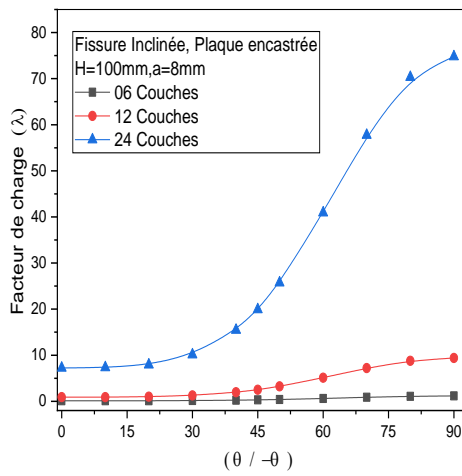


(c) $\theta_F = 90^\circ, e_p = 0.125mm$

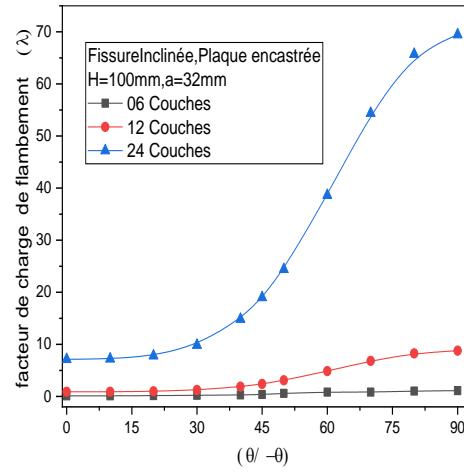
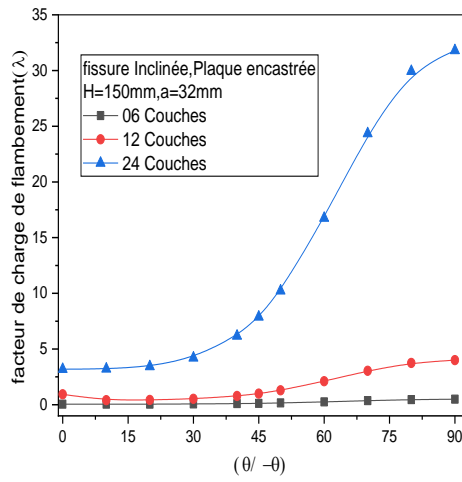
Fig. II.6. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis pour des plaques encastrées.



(a) $\theta_F = 45^\circ, e_p = 0.125mm$

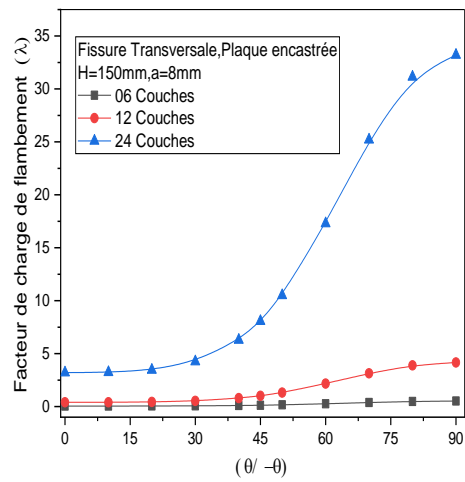
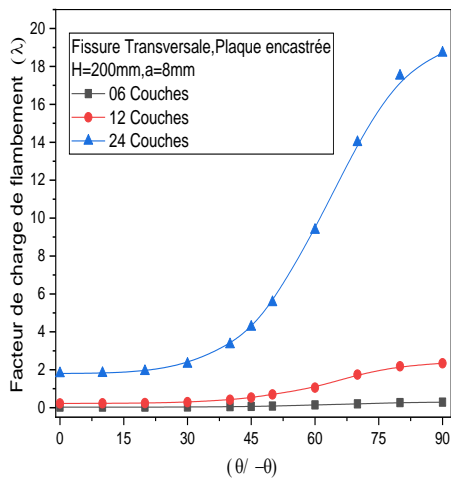


(b) $\theta_F = 45^\circ, e_p = 0.125mm$

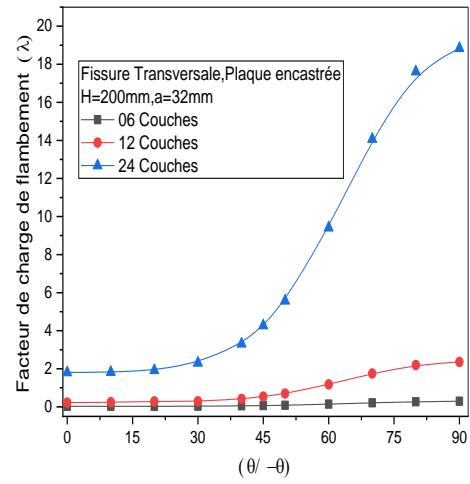
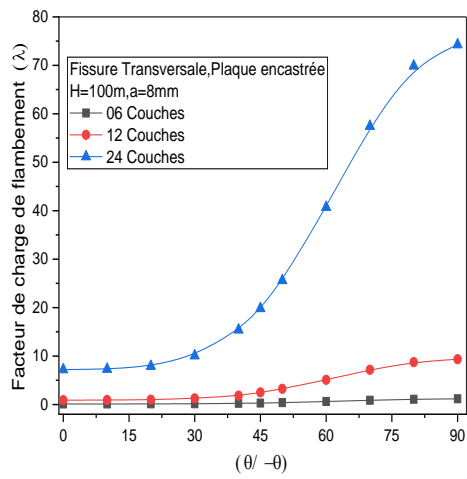


(c) $\theta_F = 45^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

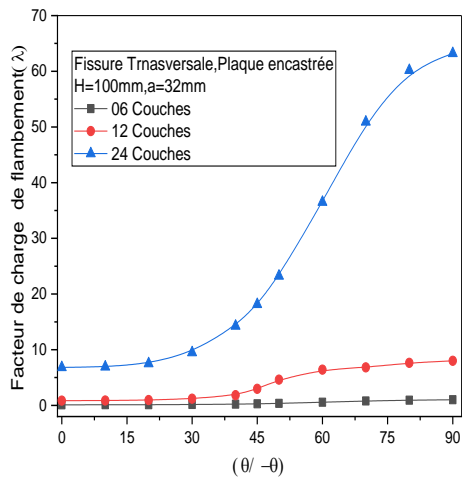
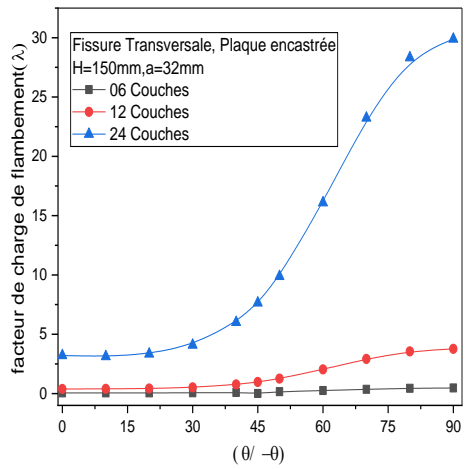
Fig. II.7. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis des plaques encastrees.



(a) $\theta_F = 0^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

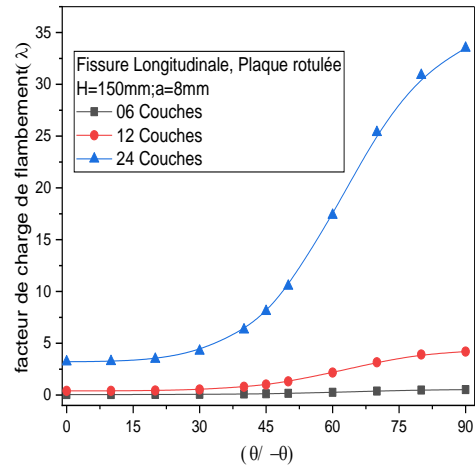
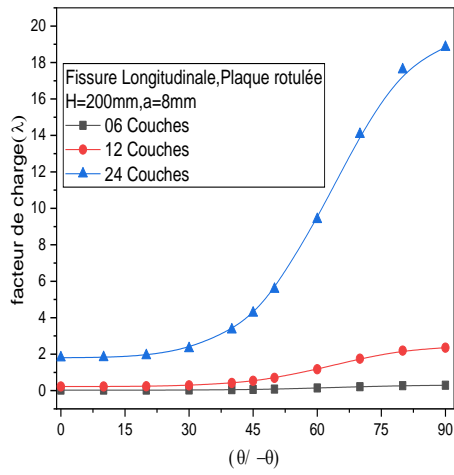


(b) $\theta_F = 0^\circ, e_p = 0.125mm$

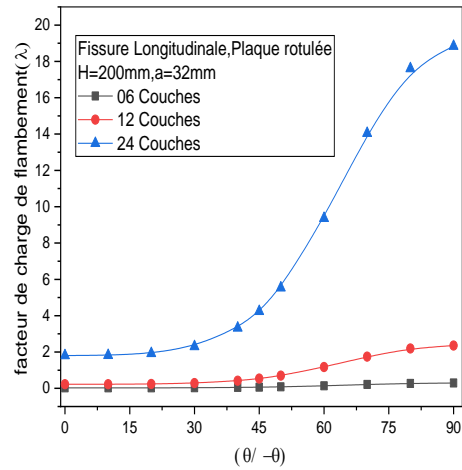
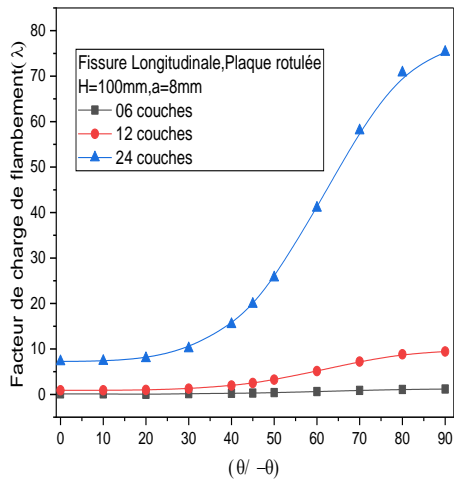


(c) $\theta_F = 0^\circ, e_p = 0.125mm$

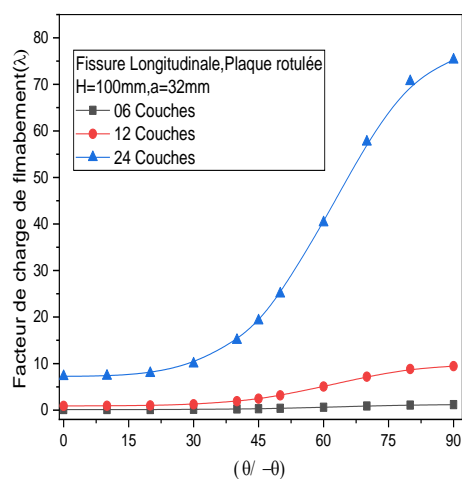
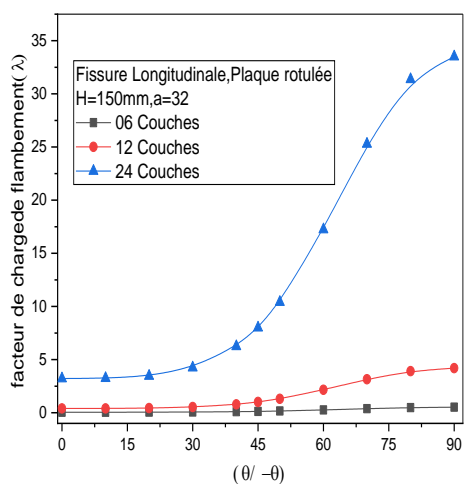
Fig. II.8. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis des plaques encastrées.



(a) $\theta_F = 90^\circ, e_p = 0.125mm$

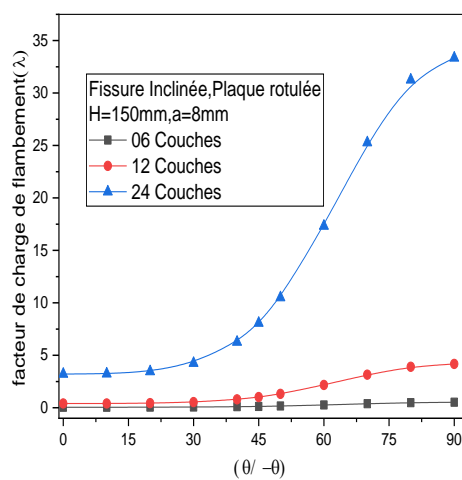
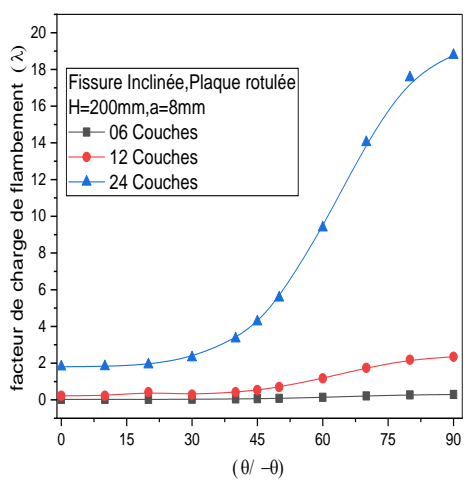


(b) $\theta_F = 90^\circ, e_p = 0.125mm$

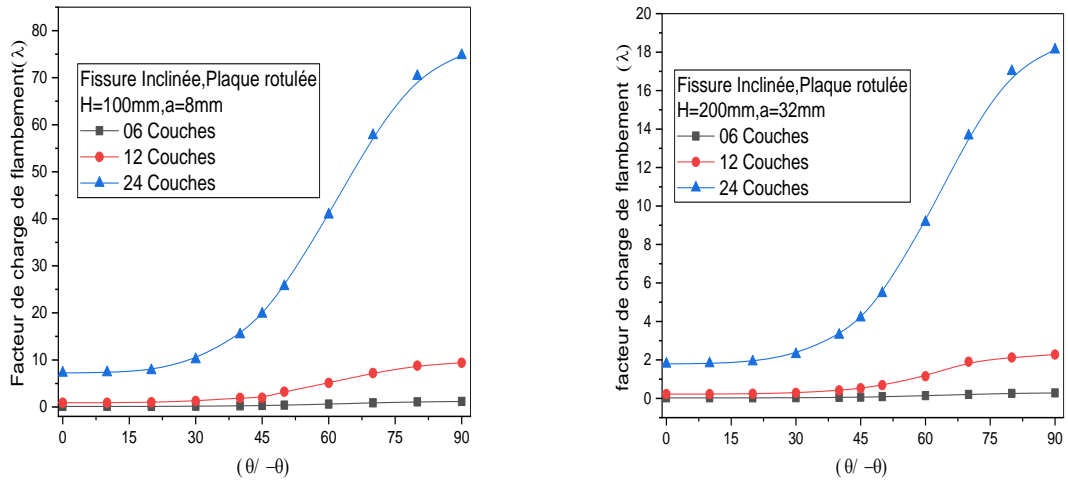


(c) $\theta_F = 90^\circ, e_p = 0.125mm$

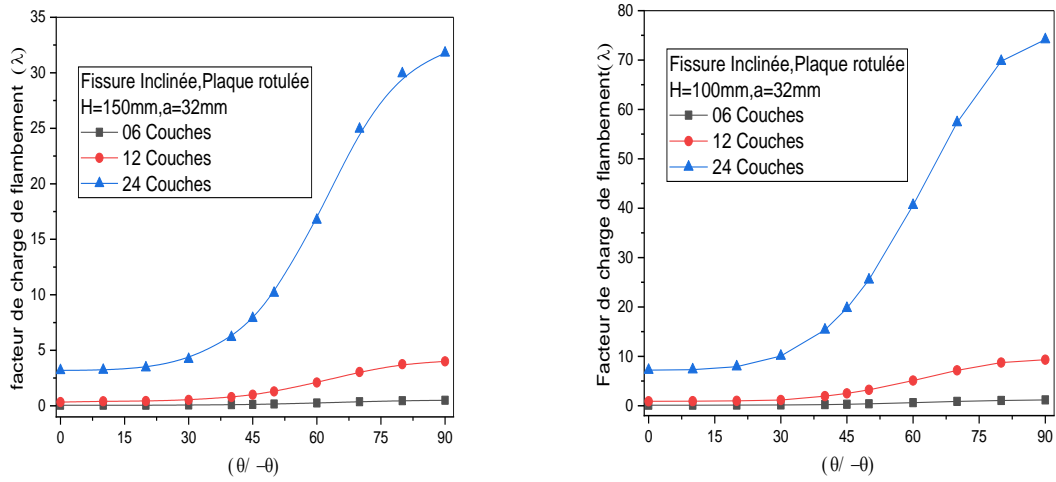
Fig. II.9. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis pour des plaques rotulées.



(a) $\theta_F = 45^\circ, e_p = 0.125mm$

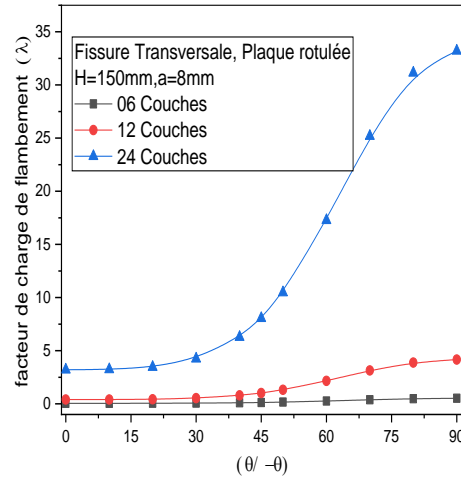
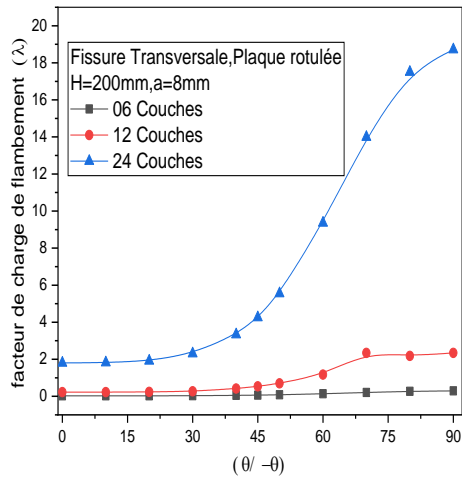


(b) $\theta_F = 45^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

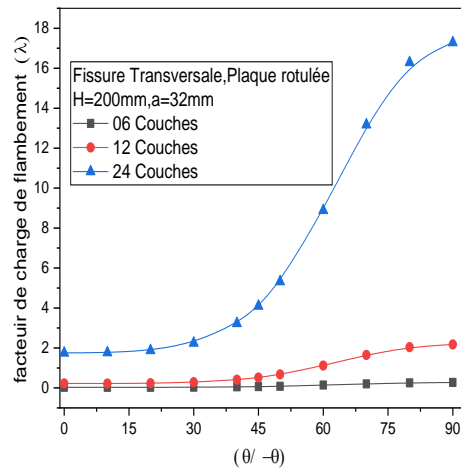
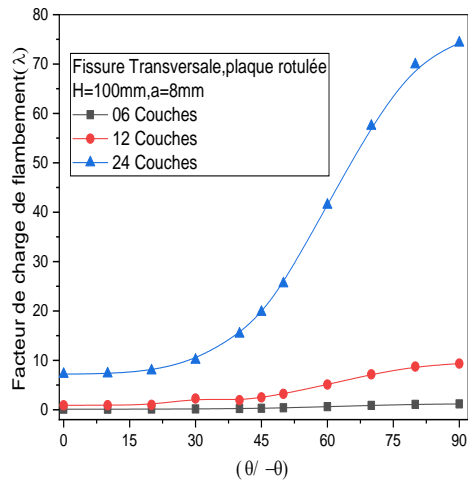


(c) $\theta_F = 45^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

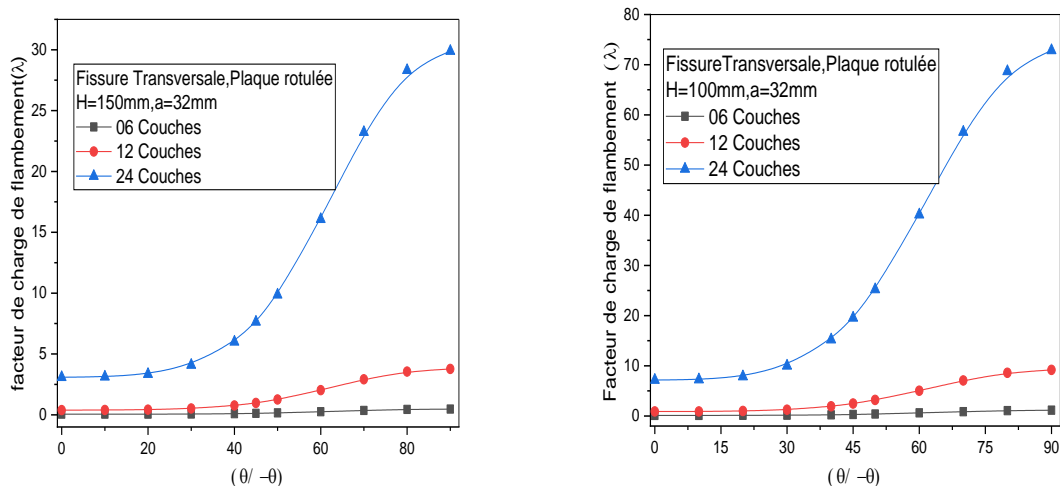
Fig. II.10. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis pour des plaques rotulées.



(a) $\theta_F = 0^\circ, e_p = 0.125mm$



(b) $\theta_F = 0^\circ, e_p = 0.125mm$



(c) $\theta_F = 0^\circ, e_p = 0.125mm$

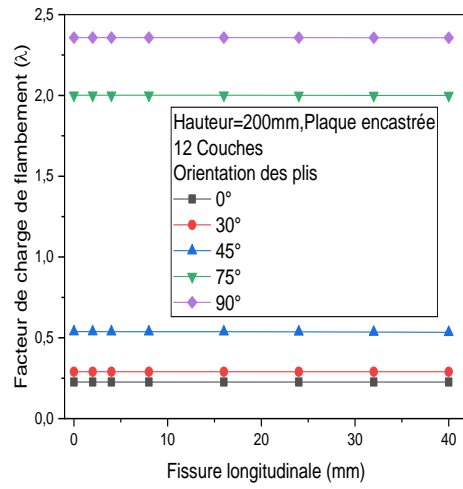
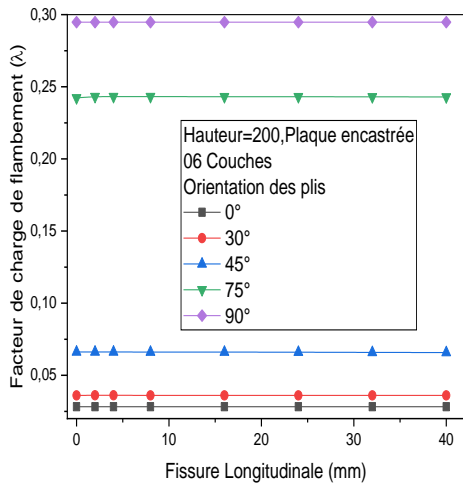
Fig. II.11. Variation du facteur en fonction de l'orientation des plis pour des plaques rotulées.

II-3-3-Effet de la fissure

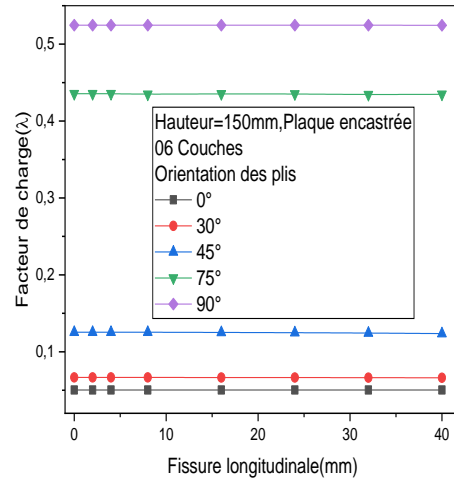
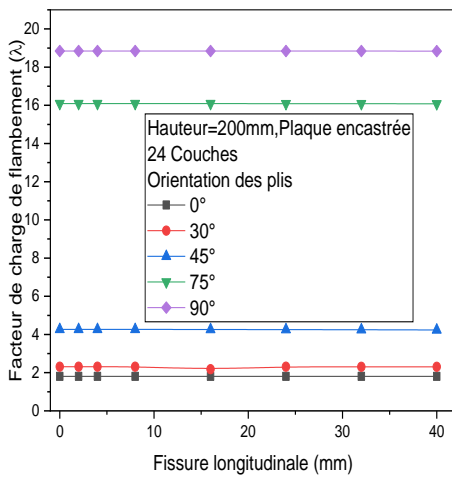
Les figures II.13, 14, 15, 16, 17 et 18 exhibent l'évolution du facteur de charge en fonction de la taille de la fissure variant de 2 à 40 mm, pour des plaques en composites de 6, 12 et 24 plis respectivement. Deux catégories de conditions, comme auparavant, et différentes orientations des plis ($0^\circ, 30^\circ/-30^\circ, 45^\circ/-45^\circ, 75^\circ/-75^\circ, 90^\circ$).

On remarque que le facteur de charge demeure constant pour toutes les longueurs de la fissure, même il est à signaler que, tant que l'orientation de pli augmente le facteur prend une valeur plus élevée par rapport aux faibles orientations dans toutes les couches utilisées surtout dans la plaque de faible hauteur, à $H=100mm$. Dans ce cas, le facteur prend des valeurs neuf fois plus importantes que celles des deux autres plaques. En outre, on constate aussi que les fibres orientées perpendiculairement à la charge appliquée prennent des valeurs maximales pour toutes les plaques.

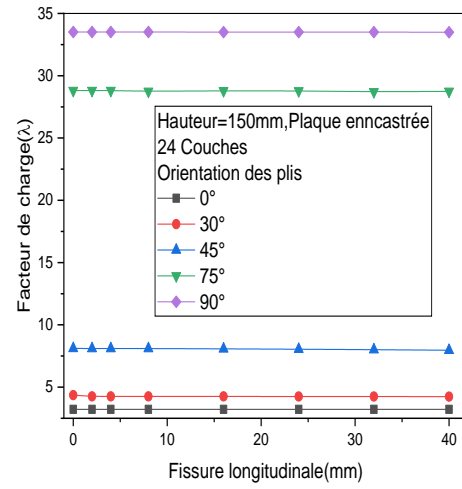
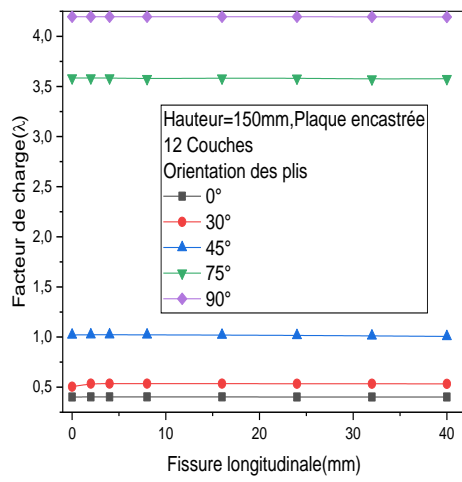
Dans le cas où la fissure est transversale (Figs. II.16, 17), on peut constater que, lorsque l'angle des fibres dépassent ($75^\circ/-75^\circ$), le facteur de charge de flambement fait une chute entre 10 et 15%, mais quand la longueur de la fissure dépasse $a=16mm$. On a enregistré encore un effet de la taille de la fissure inclinée sur les plaques de hauteur $H=100mm$ quand la taille de la fissure dépasse $a=24mm$. Les résultats illustrent que le facteur reste négligeable à 0° pour toutes les tailles de fissures.



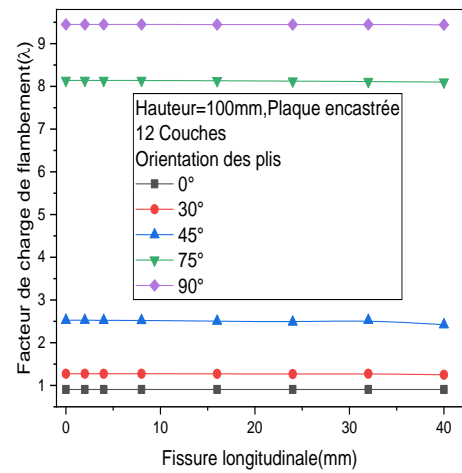
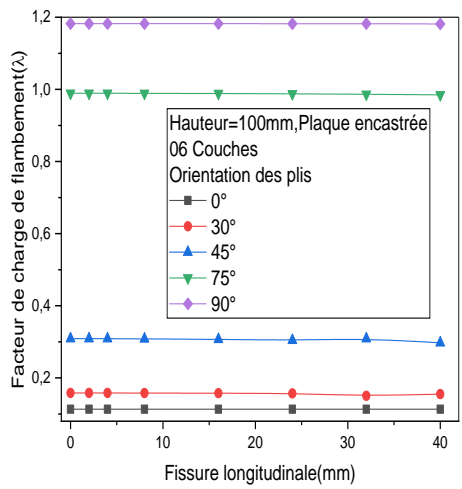
(a) $e_p = 0.125mm$



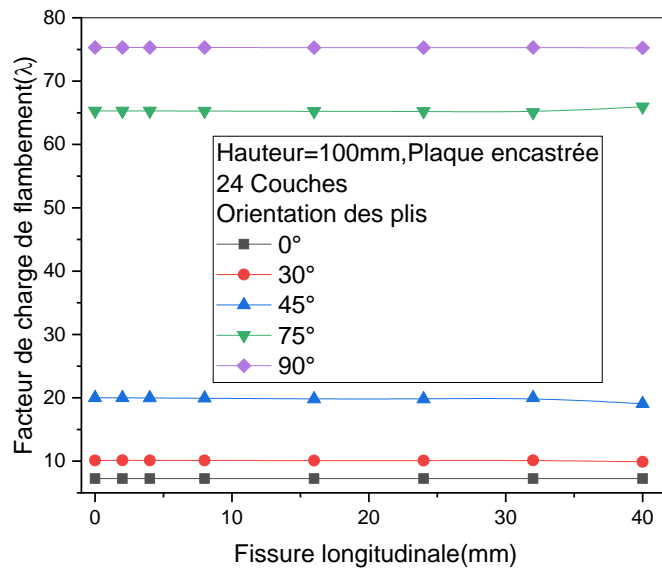
(b) $e_p = 0.125mm$



(c) $e_p = 0.125mm$

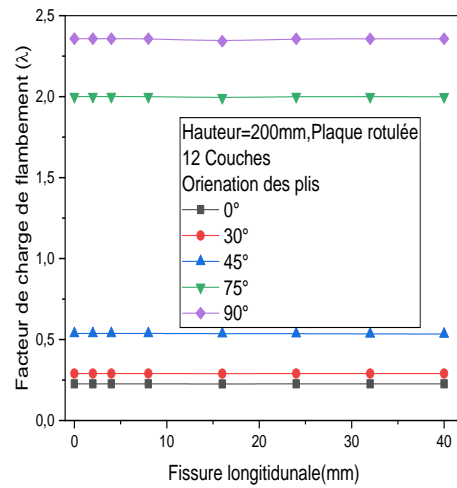
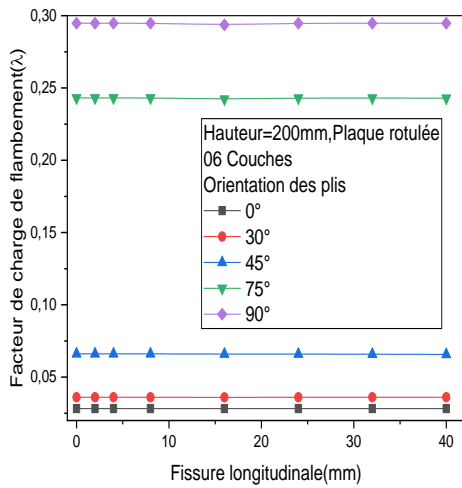


(a') $e_p = 0.125mm$

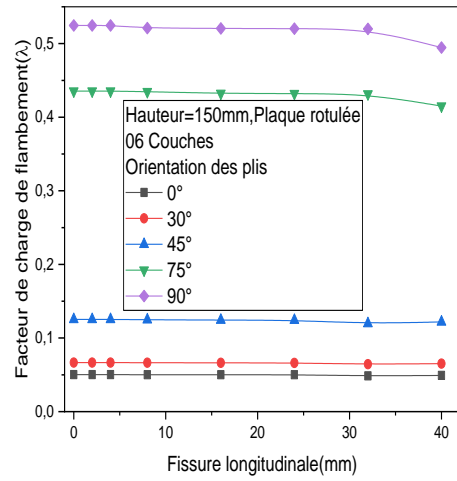
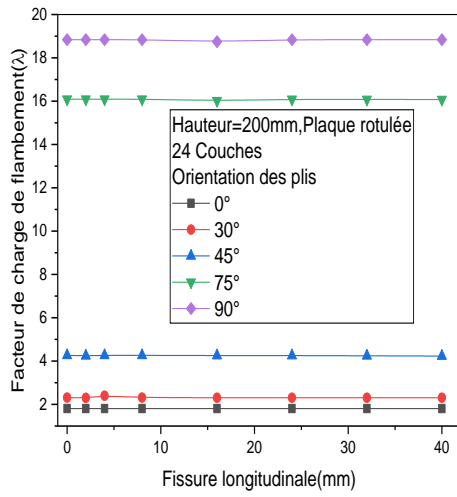


(b') $e_p = 0.125mm$

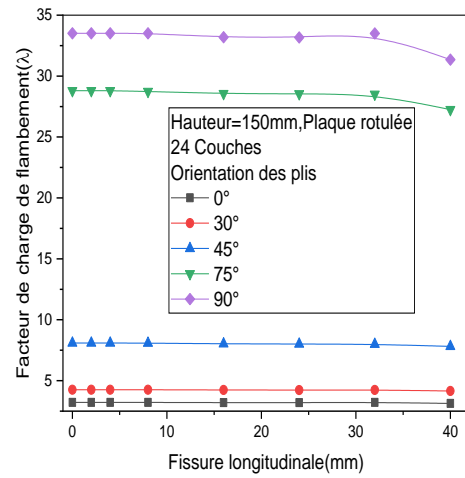
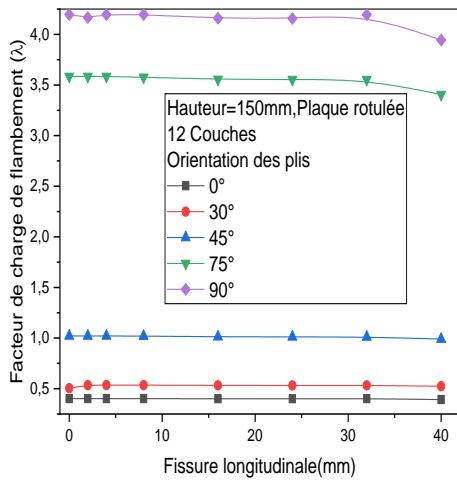
Fig. II.12. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure longitudinale pour des plaques encastrées.



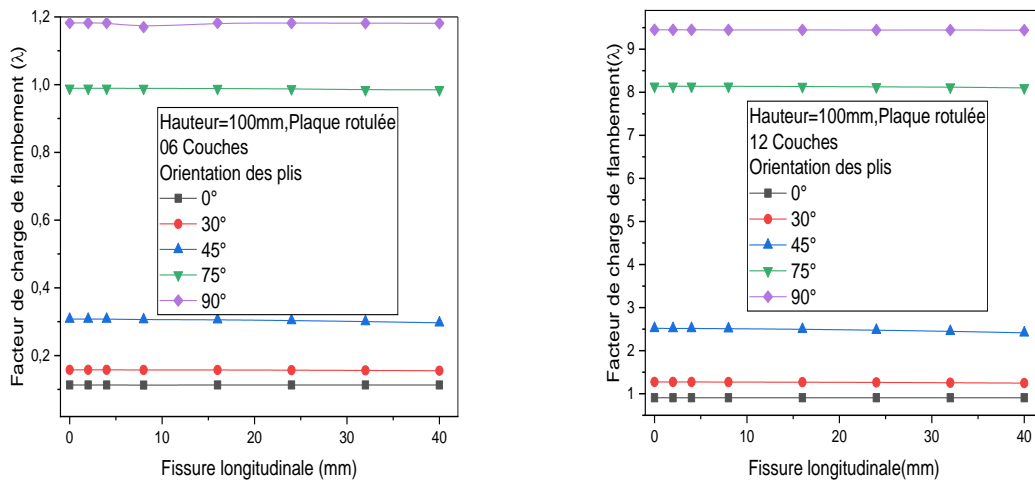
(a) $e_p = 0.125mm$



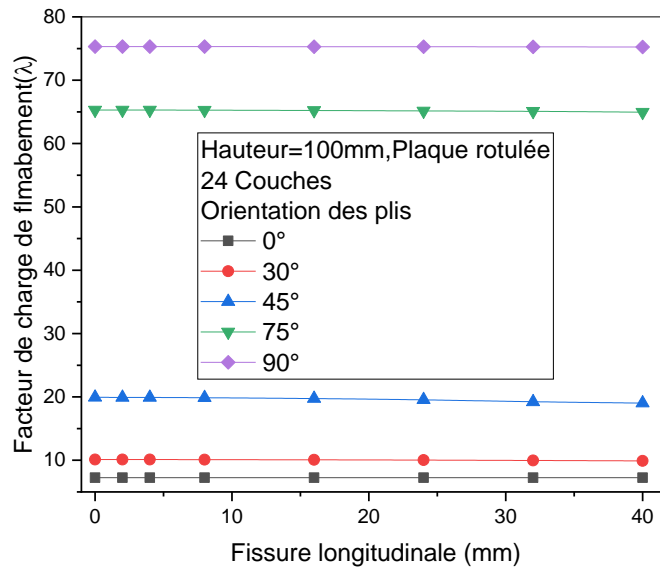
(b) $e_p = 0.125mm$



(c) $e_p = 0.125mm$

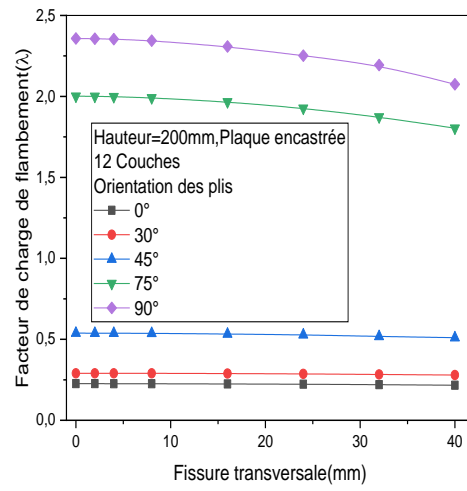
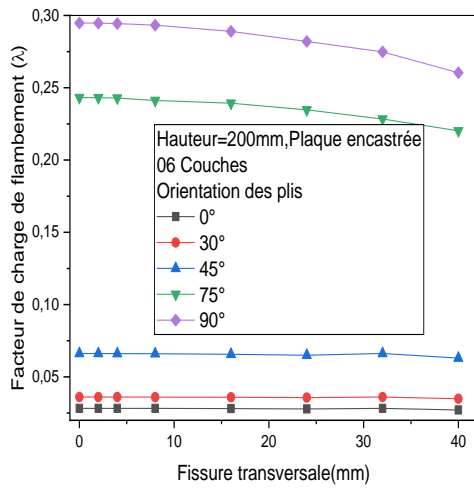


(a') $e_p = 0.125mm$

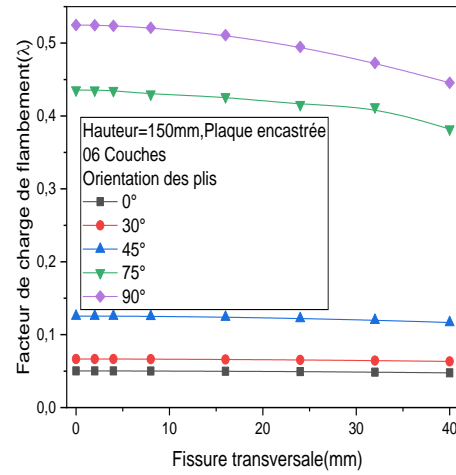
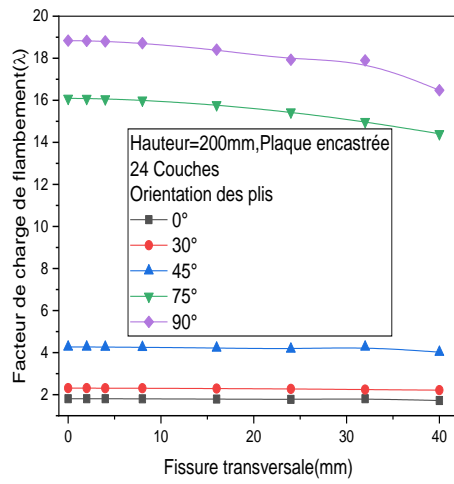


(b') $e_p = 0.125mm$

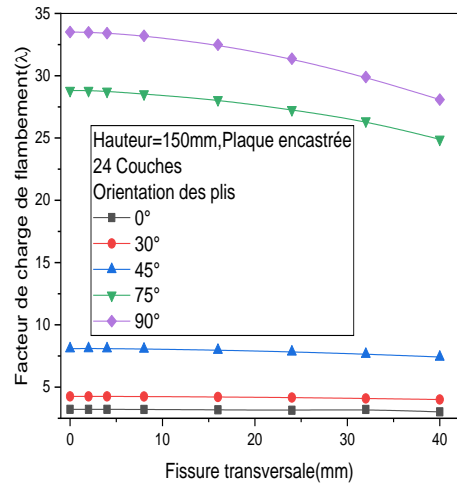
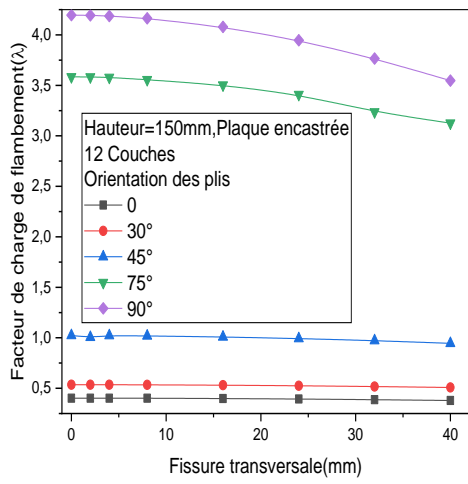
**Fig. II.13. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure longitudinale
Pour des plaques rotulées.**



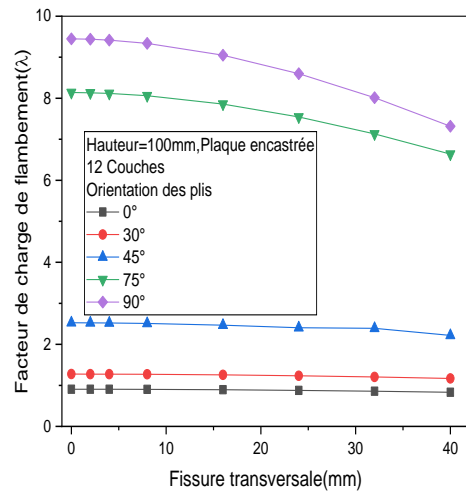
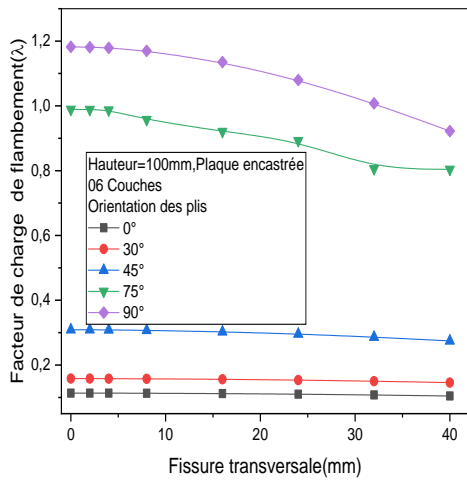
(a) $e_p = 0.125mm$



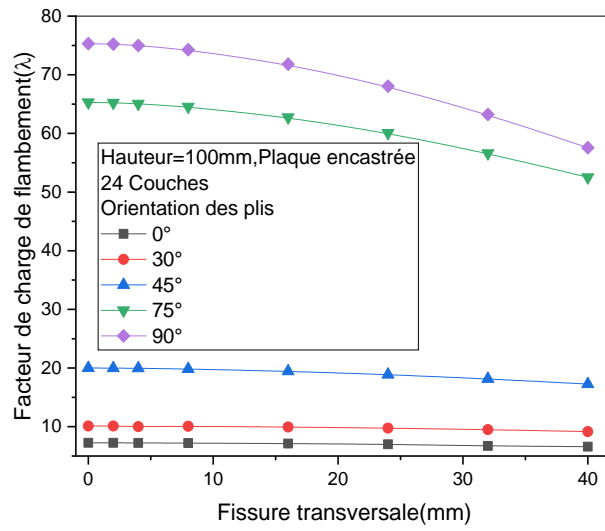
(b) $e_p = 0.125mm$



(c) $e_p = 0.125mm$

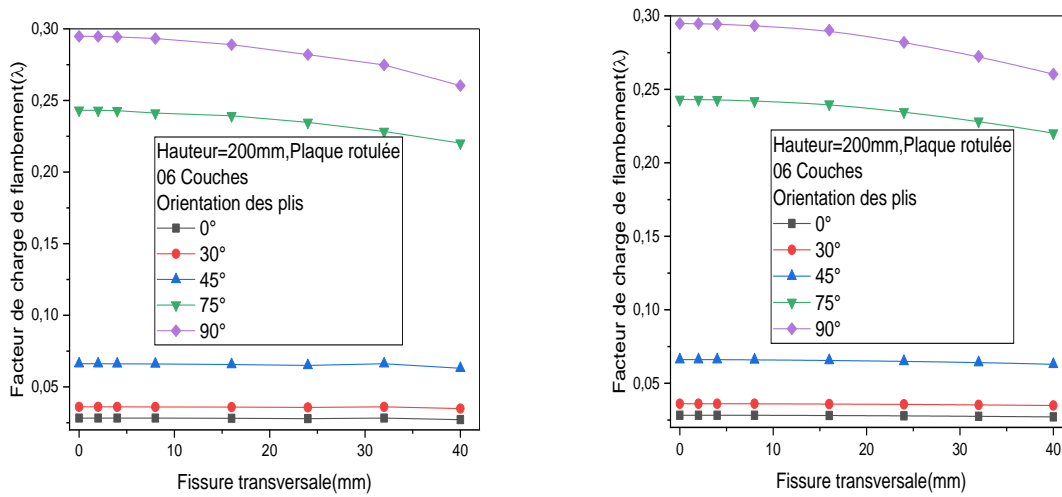


(a') $e_p = 0.125mm$

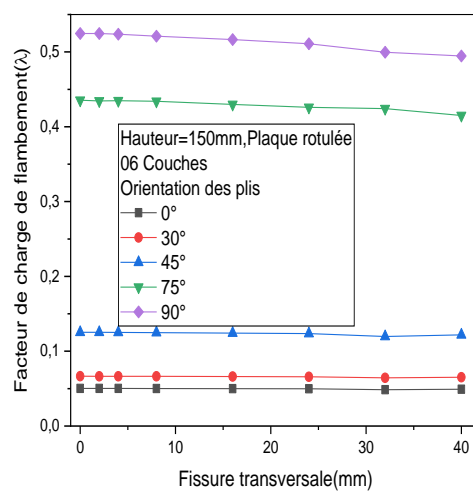
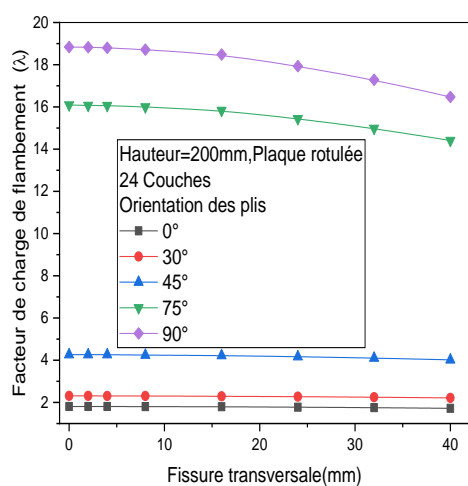


(b') $e_p = 0.125mm$

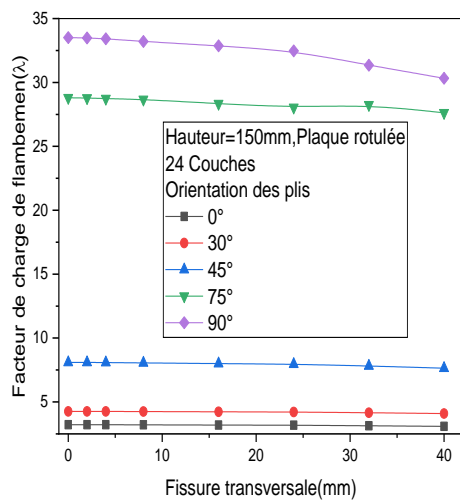
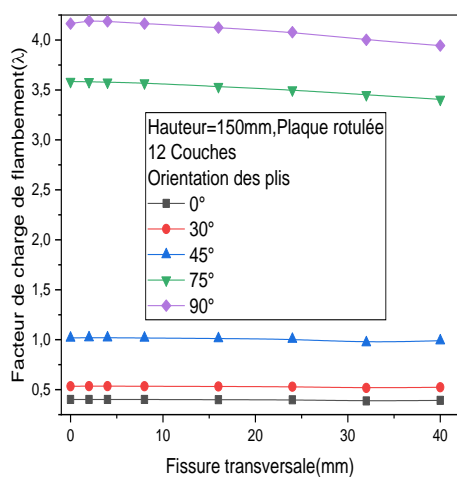
Fig. II.14. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure transversale pour des plaques encastrees.



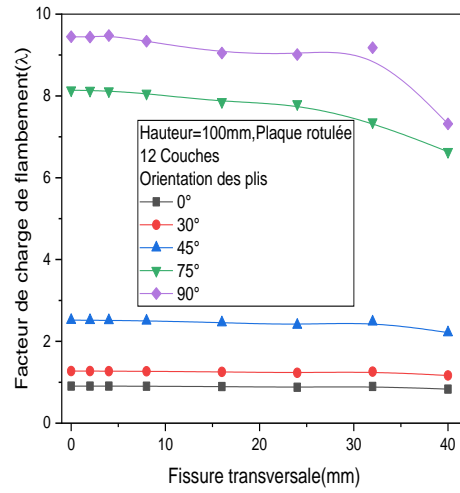
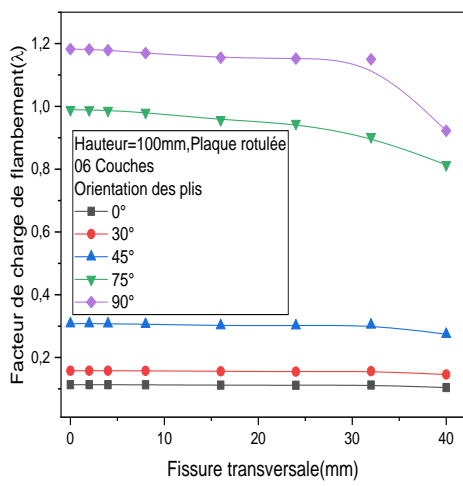
(a) $e_p = 0.125mm$



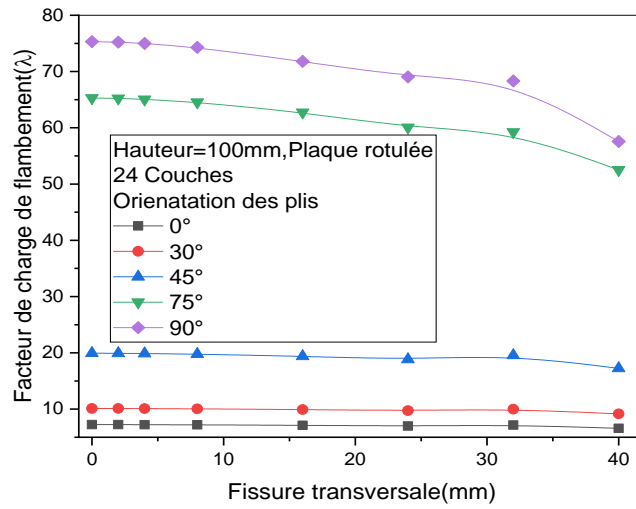
(b) $e_p = 0.125mm$



(c) $e_p = 0.125mm$

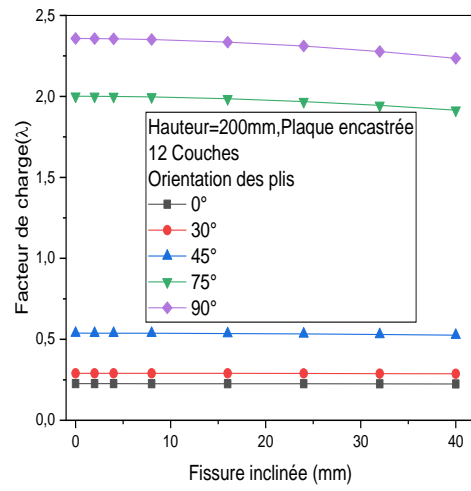
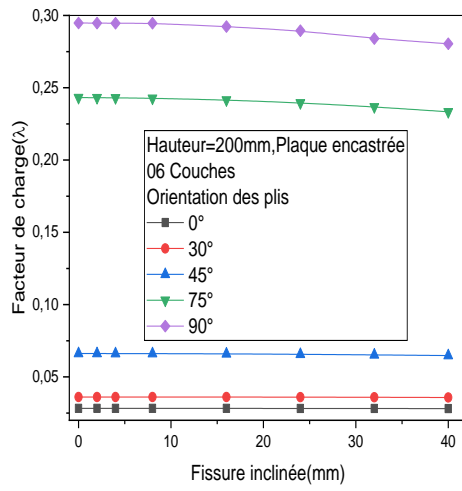


(a') $e_p = 0.125mm$

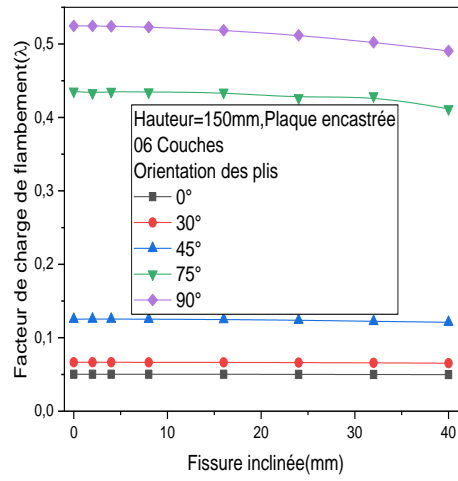
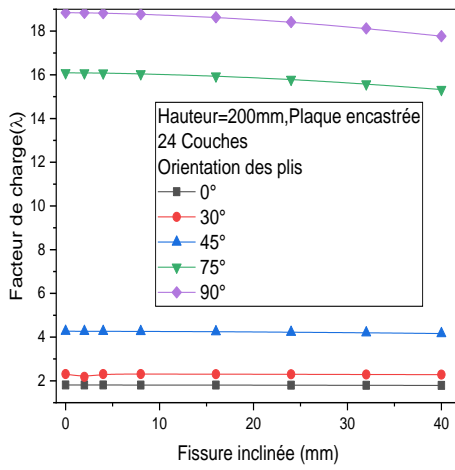


(b') $e_p = 0.125mm$

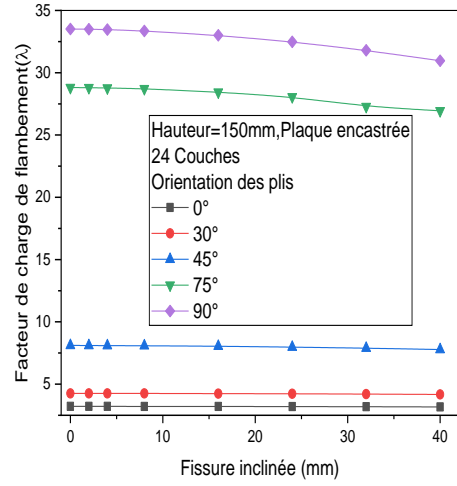
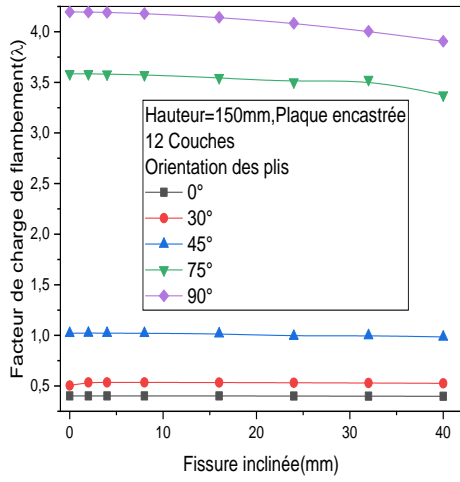
**Fig. II.15. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure transversale
Pour des plaques rotulées.**



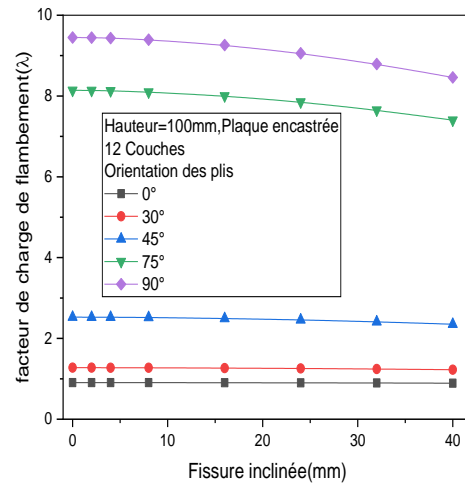
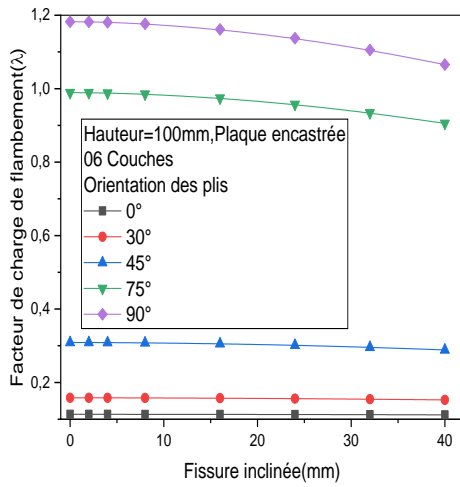
(a) $e_p = 0.125mm$



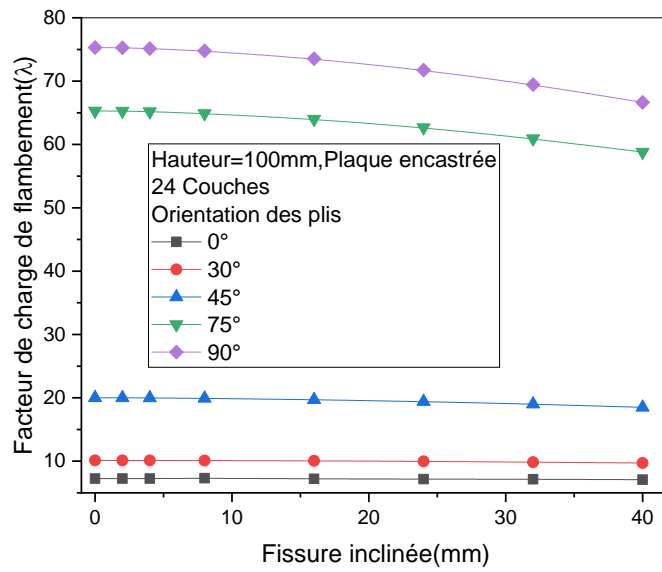
(b) $e_p = 0.125mm$



(c) $e_p = 0.125mm$

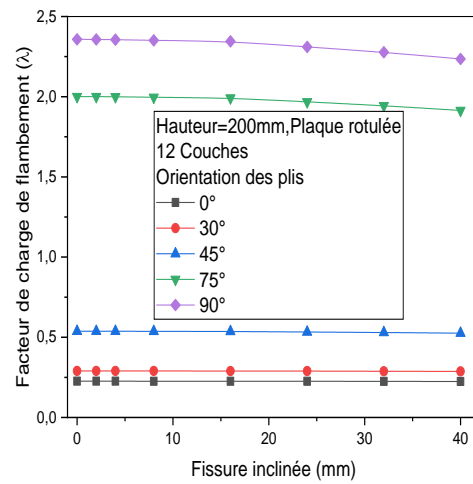
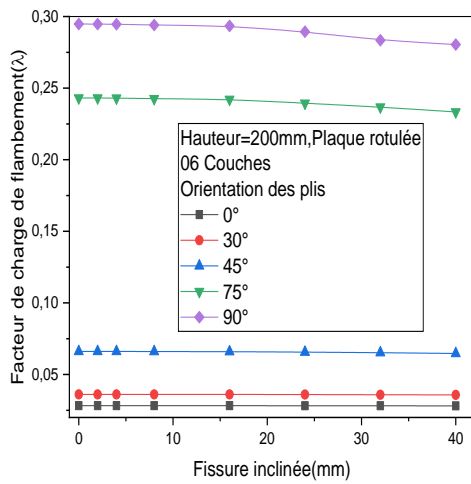


(a') $e_p = 0.125mm$

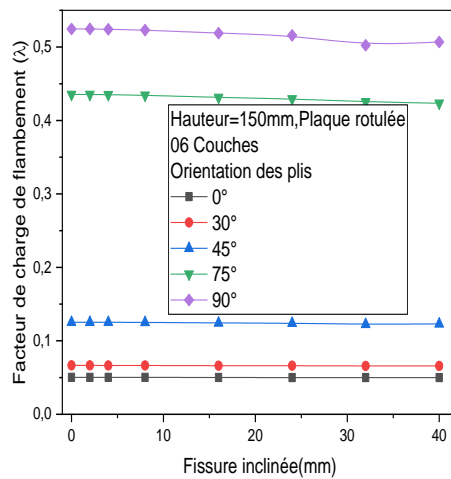
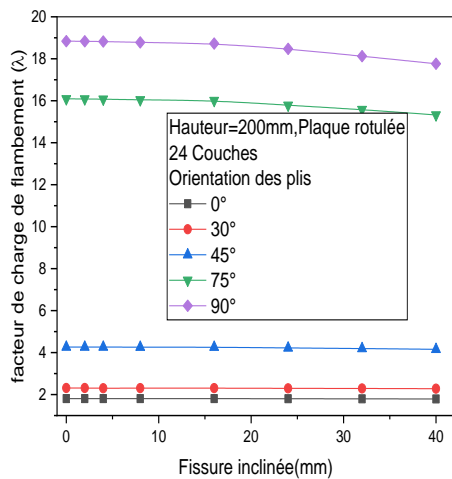


(b') $e_p = 0.125mm$

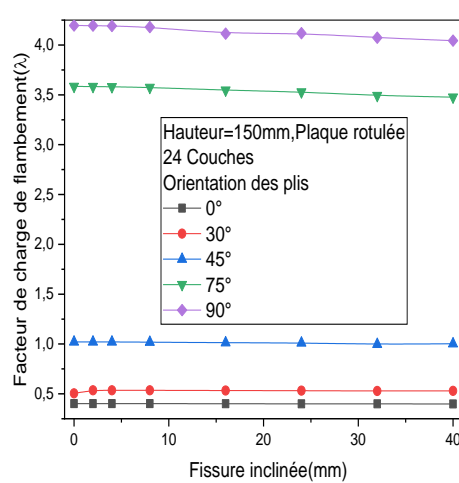
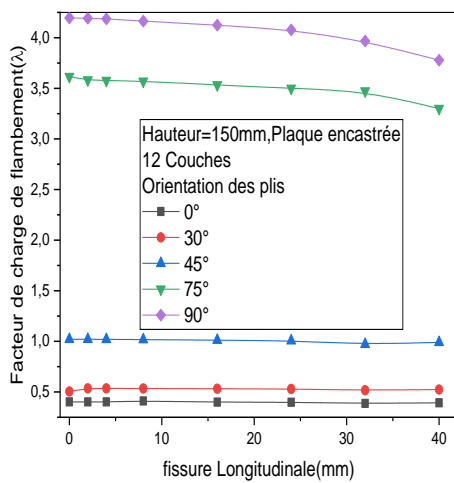
Fig. II.16. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure inclinée pour des plaques encastrées.



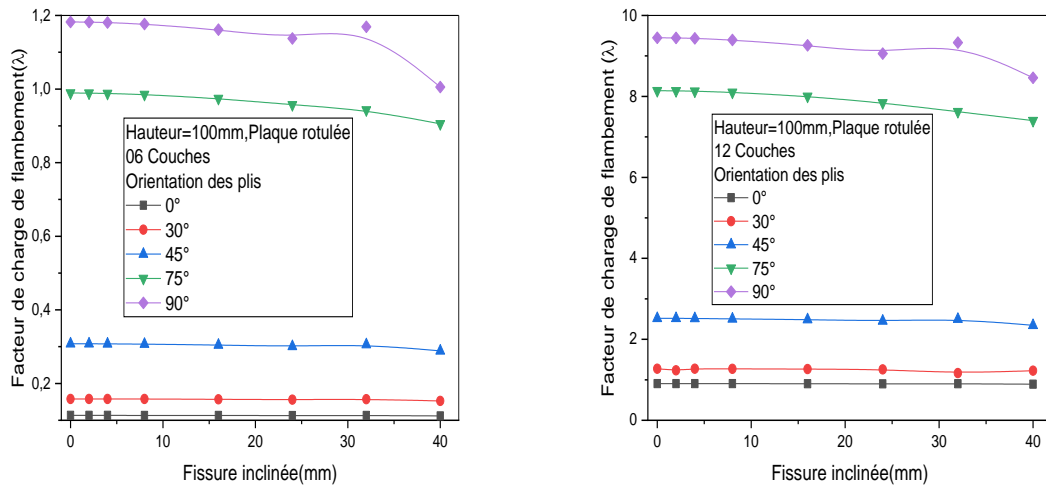
(a) $e_p = 0.125mm$



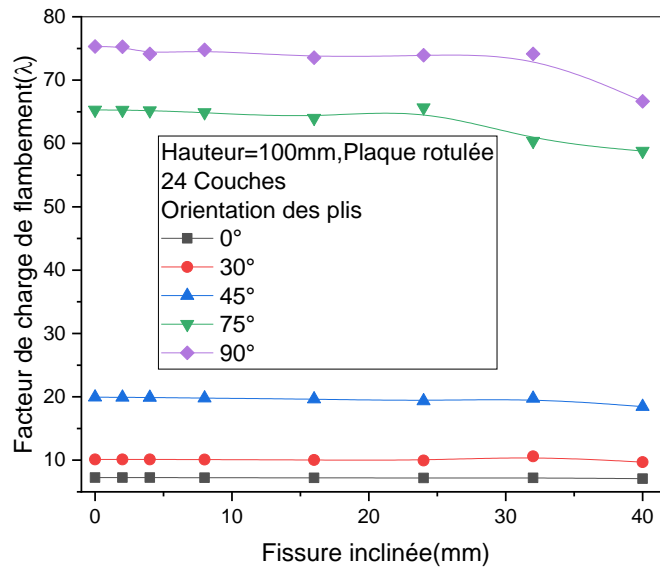
(b) $e_p = 0.125mm$



(c) $e_p = 0.125mm$



(a') $e_p = 0.125mm$



(b') $e_p = 0.125mm$

Fig. II.17. Facteur de charge en fonction de la longueur de la fissure inclinée pour des plaques rotulées.

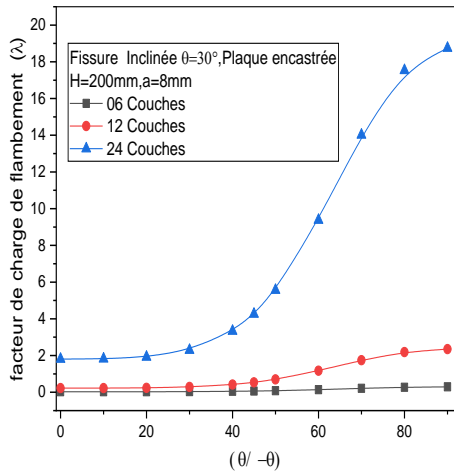
II-3-4-Effet de l'inclinaison de la fissure

Les figures II.19, 20, 21 et 22 explicitent la variation de facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée.

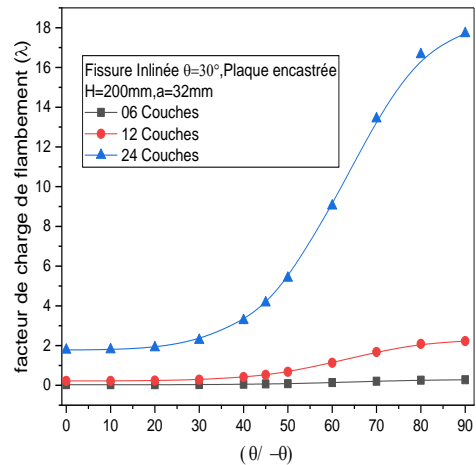
Quelle que soit l'inclinaison de la fissure, le facteur de charge augmente avec l'accroissement des plis étudiés. Lorsque le nombre de pli augmente, le facteur de charge est moins amplifié.

A partir des résultats représentés, on remarque un accroissement très important pour les valeurs de charge, indiquant que l'augmentation des orientations des fibres contribue à l'amélioration de la résistance des plaques quelle que soit l'orientation de la fissure.

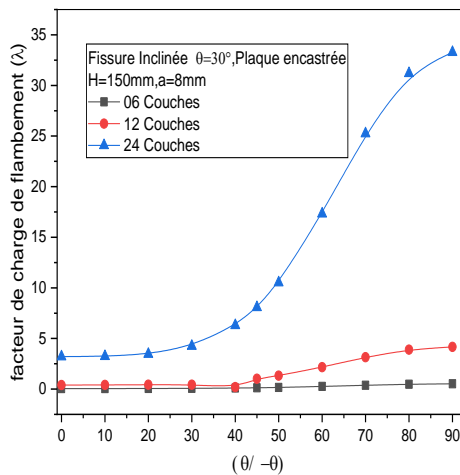
Il est à marquer qu'une stabilité dans les orientations ($0^\circ, 10^\circ/-10^\circ, 20^\circ/-20^\circ, 30^\circ/-30^\circ$) est notée.



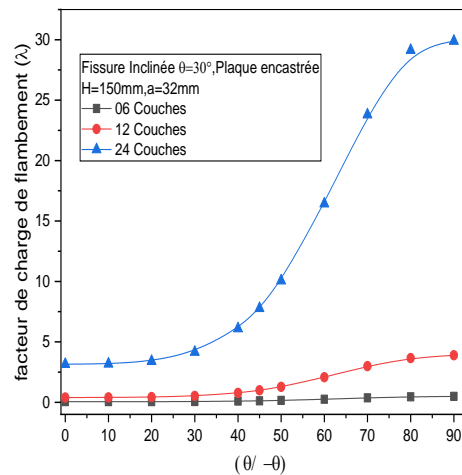
(a) $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125mm$



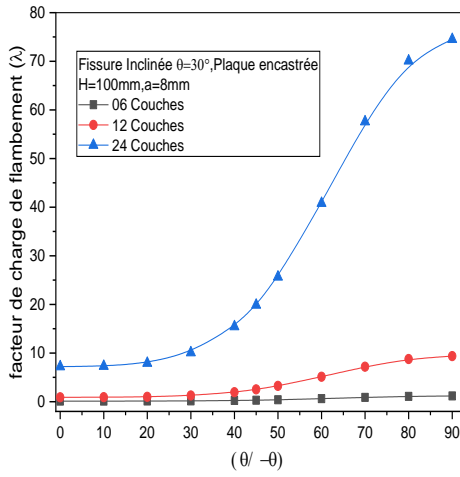
(b) $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125mm$



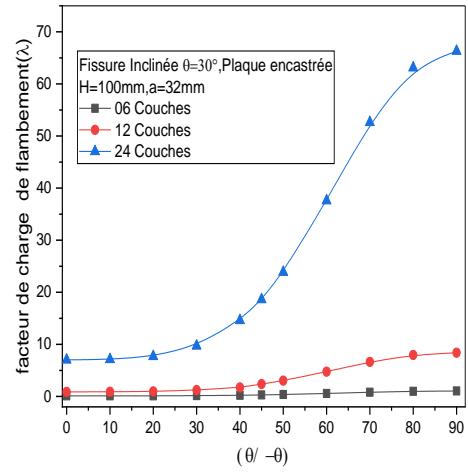
(c) $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125mm$



(a') $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125mm$

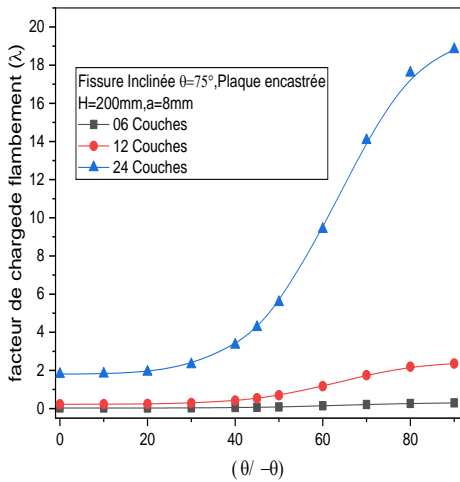


(b') $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

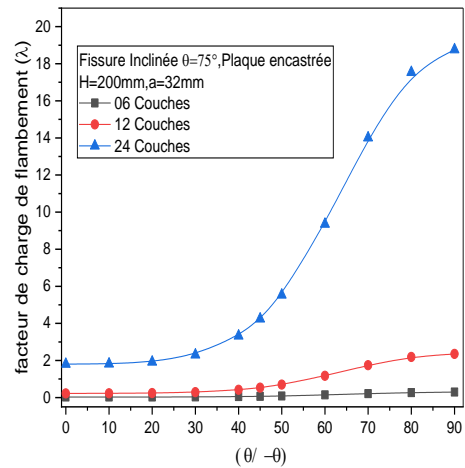


(c') $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

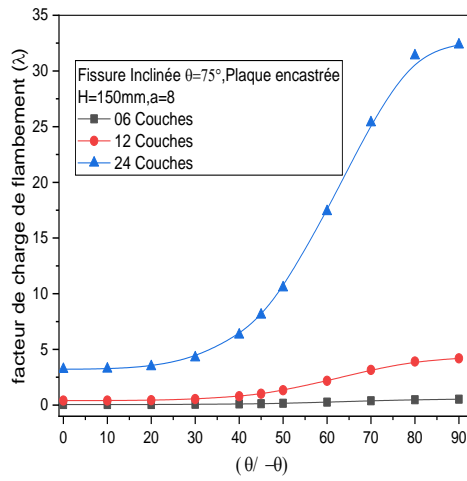
Fig. II.18. Facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée pour des plaques encastrees.



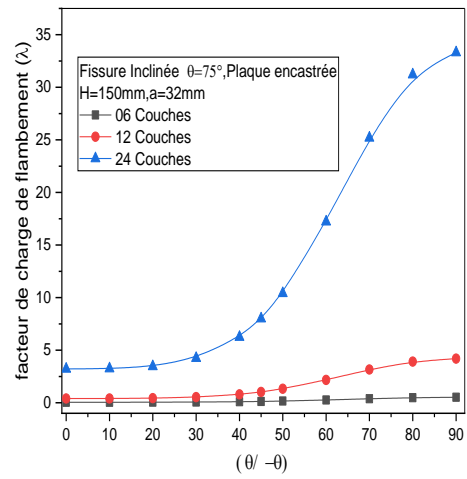
(a) $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



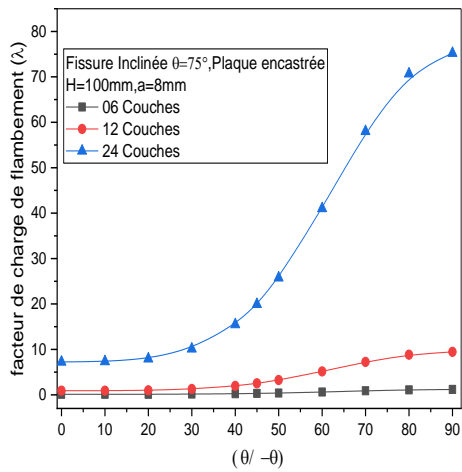
(b) $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



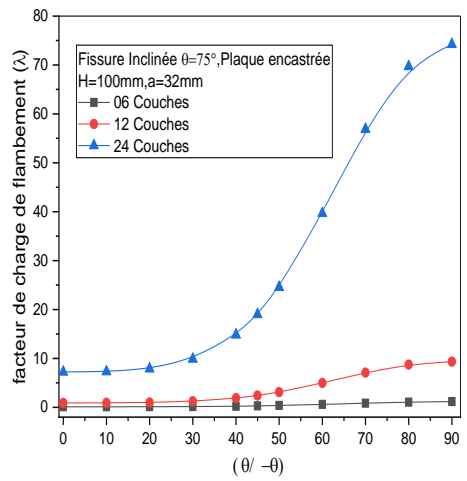
(c) $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



(a') $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

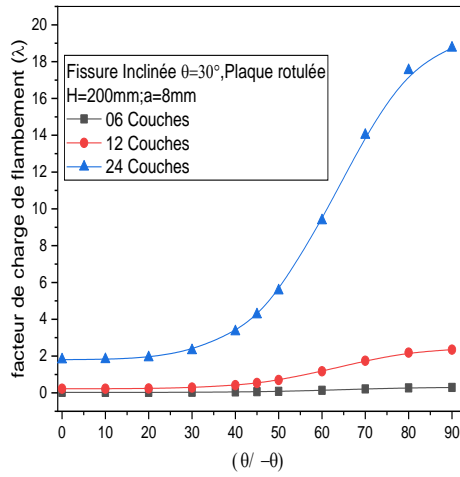


(b') $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

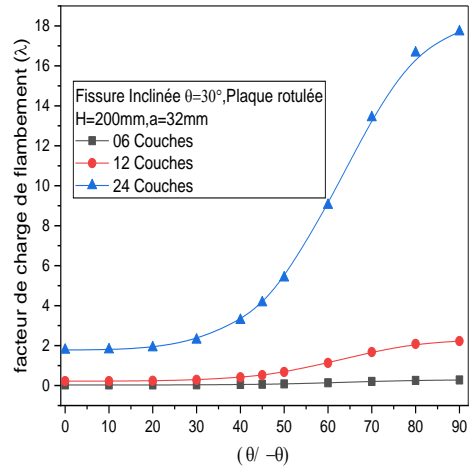


(c') $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

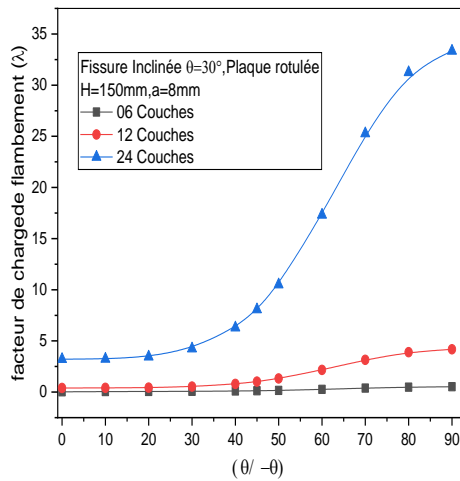
Fig. II.19. Facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée pour des plaques encastrées.



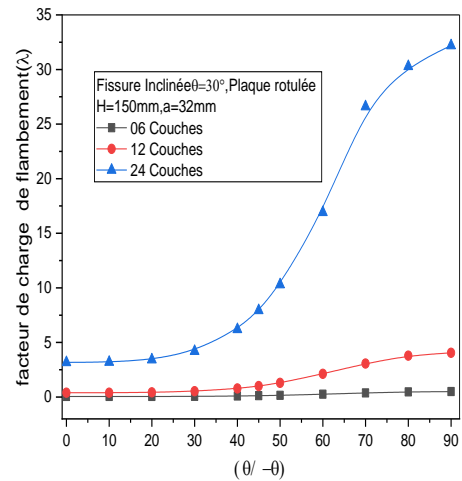
(a) $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



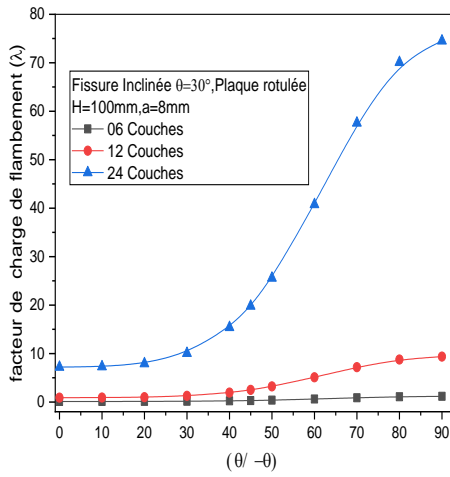
(b) $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



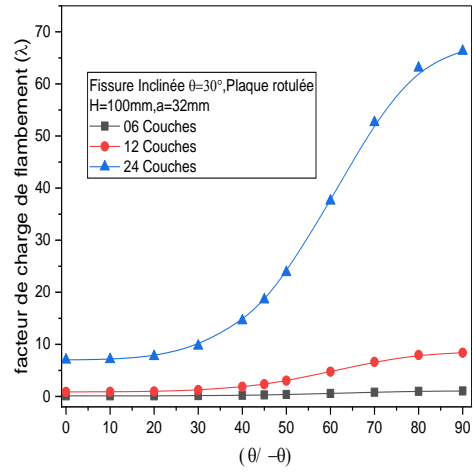
(c) $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



(a') $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

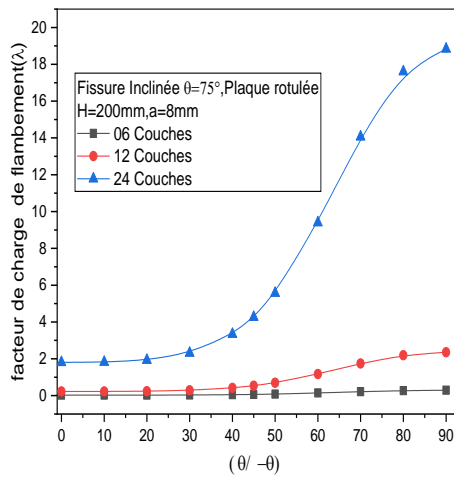


(b') $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

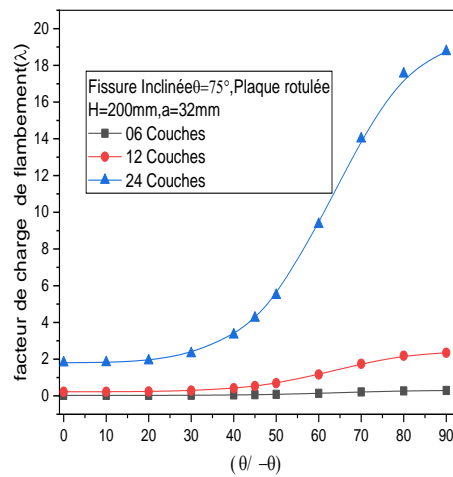


(c') $\theta_F = 30^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

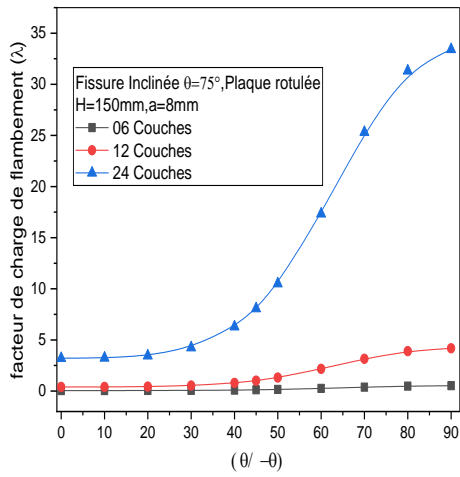
Fig. II.20. Facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée pour des plaques rotulées.



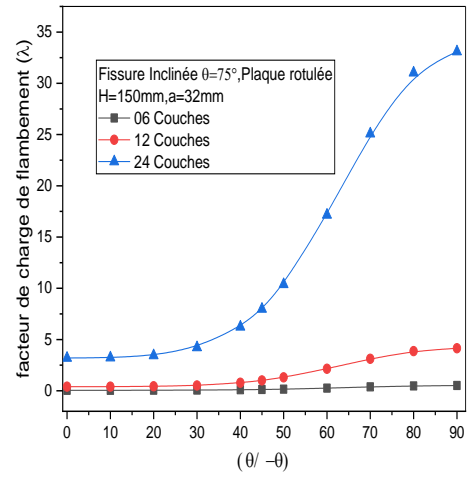
(a) $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



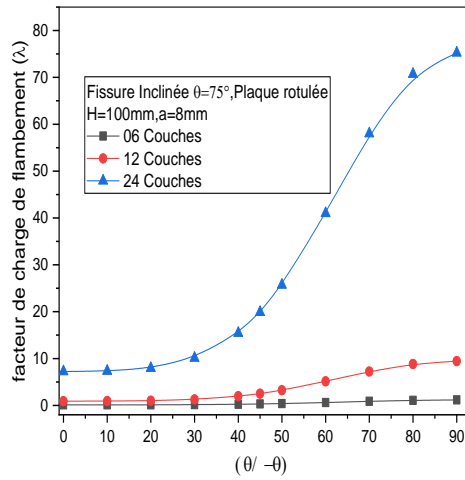
(b) $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



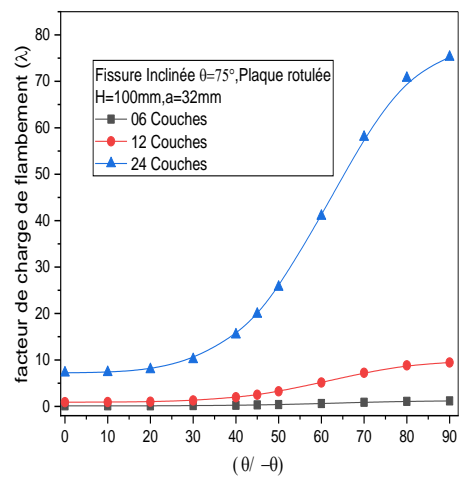
(c) $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



(a') $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



(b') $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$



(c') $\theta_F = 75^\circ, e_p = 0.125\text{mm}$

Fig. II.21. Facteur de charge en fonction de l'orientation des plis et de la fissure inclinée pour des plaques rotulées.

Conclusion

Les structures en matériaux composites représentent un domaine de recherche très vaste et des applications immenses à cause il est possible de modifier leur composition et leur architecture pour obtenir des matériaux résistant. Dans ce travail on a déterminé l'effet de l'orientation des fibres et la fissure sur le facteur de charge de flambement.

L'analyse des résultats nous permettra de tirer les conclusions suivantes :

- Le facteur de charge est maximal lorsque la charge appliquée se trouve parallèle aux fibres.
- Le facteur de charge obtenus pour les plis 6 et 12 aux orientations ($0^\circ, 20^\circ/-20^\circ, 30^\circ/-30^\circ$) sont pratiquement semblables pour quasiment toutes les plaques.
- Lorsque l'angle de pli est supérieur à 45° le facteur croît d'une manière monotone jusqu'à une valeur maximale obtenue à l'angle 90° . L'influence du nombre de pli est important sur le facteur de charge.
- L'influence de la position de la fissure dépend de son orientation et les dimensions de la structure.
- Les plaques drapées à 0° , montre une grande influence sur le facteur de flambement contrairement aux plaques drapées à 90° . Les plaques orientées à 90° , montrent une grande résistance.
- Lorsque la fissure est transversale et l'angle des fibres dépassent ($75^\circ/-75^\circ$), le facteur de charge de flambement fait une chute entre 10 et 15%, mais quand la longueur de la fissure dépasse $a=16\text{mm}$. Les résultats illustrent que le facteur reste négligeable à 0° pour toutes les tailles de fissures.
- Quelle que soit l'inclinaison de la fissure, le facteur de charge augmente avec l'accroissement des plis étudiés. Lorsque le nombre de pli augmente le facteur de charge est moins amplifié.
- L'augmentation des orientations des fibres contribue à l'amélioration de la résistance des plaques quelle que soit l'orientation de la fissure.

Référence

- [1] Annette Roy., Comportement mécanique en sollicitation cyclique d'assemblage collés Composite/Composite et composite/Acier Thèse de doctorat 1992
- [2] Laurent Gornet., Généralités sur les Matériaux composites, Ecole de Nantes-2011
- [3] François Xavier IRISARRI., Stratégies de calcul pour l'optimisation multiobjectif des structures composites, 2009.
- [4] Berthelot JM., Matériaux composites – Comportement mécanique et analyse des structures.5^{éd.} Lavoisier, 2012.
- [5] Belgacem Leila., Contribution à l'étude de l'endommagement des pipes en matériaux composite hybrides sollicités au flambement. Thèse de doctorat 2018, Université de Mostaganem.