

Capacité du modèle d'impact implicite à prévoir les dommages d'impact

Dans les deux chapitres précédents, une riche base de données expérimentales a été acquise pour comparaison avec les résultats numériques. La sensibilité à l'impact du matériau retenu, le T700GC/M21, a également été établie en fonction de la séquence d'empilement, de l'énergie d'impact et des conditions aux limites appliquées à la plaque impactée. Les résultats numériques des simulations d'impact sur les configurations d'appui simple linéique et d'encastrement, présentées au chapitre 3, paragraphe 3.2, peuvent à présent être confrontés aux résultats expérimentaux, afin d'estimer les capacités du modèle de comportement du pli Onera Progressive Failure Model (OPFM) [Laurin, 2005] [Laurin, 2007] [Charrier, 2011] et du modèle bilinéaire de zones cohésives proposé par Alfano et Crisfield [Alfano, 2001] à prévoir les dommages d'impact. L'objectif de ce chapitre est de montrer les qualités et défauts des modèles mis en place et quels sont les éléments essentiels à intégrer à la modélisation de l'impact (modèle numérique et complexité des lois de comportement matériau) pour avoir une estimation correcte des dommages.

Parmi les différentes configurations d'essai présentées au chapitre 4, les moins coûteuses, en termes de temps de calcul, concernent les impacts à 10 Joules. En effet, cette configuration engendre des déplacements d'amplitudes faibles. Cela permet de conserver l'hypothèse des petits déplacements et d'avoir des incréments de temps plus grands, tout en assurant la convergence de l'algorithme de contact, ce qui réduit notablement les temps de calcul. D'autre part, les temps de calcul les plus courts sont obtenus pour le modèle d'encastrement car il comporte moins d'éléments que le modèle d'appui simple et il limite également l'amplitude des déplacements de la plaque. C'est pourquoi les comparaisons entre les résultats expérimentaux et numériques prennent une place plus importante pour l'impact des spécimens encastres à 10 Joules.

Deux modélisations d'impact sont utilisées dans ce chapitre. Dans le premier cas, le modèle numérique complet, construit au chapitre 3, paragraphe 3.1.4, est associé à la loi de comportement du pli OPFM, dans sa formulation tridimensionnelle, présentée au chapitre 2, paragraphe 2.1.1. Dans ce premier modèle, les effets des délaminages sont directement pris en compte dans la loi de comportement du pli et aucune interface n'est modélisée par des zones cohésives. La seconde modélisation utilise le modèle d'impact simplifié présenté au chapitre 3, paragraphe 3.1.4. Dans ce cas, le contact avec l'impacteur est remplacé par des déplacements équivalents, afin de réduire les temps de calcul (deux mois contre plus de six pour un calcul d'impact complet comportant des modèles de zones cohésives, sur quatre processeurs de 2,66 GHz de fréquence). Cette simplification permet d'intégrer des zones cohésives pour modéliser les interfaces entre deux plis d'orientations différentes. Ces zones cohésives sont associées au modèle bilinéaire et les plis à la loi OPFM dans sa formulation tridimensionnelle, en annulant la cinétique d'endommagement hors plan, ce qui a pour effet de ne pas prendre en compte les effets du délaminage dans la loi de comportement du pli. Cette méthode évite la compétition entre les deux modèles d'endommagement hors plan. Le

couplage entre l'endommagement matriciel du pli et les propriétés de l'interface n'est pas pris en compte.

Afin d'évaluer les capacités des modèles à reproduire le comportement lors d'un impact et les dommages qui en résultent, la confrontation entre les résultats d'essais et les résultats des simulations s'effectue en deux temps. Dans un premier temps, les réponses globales de la plaque impactée sont comparées, en termes de forces et de déplacements. Ensuite, les endommagements sont étudiés plus en détail. Pour cette analyse, il y a rupture de fibres, fissuration matricielle ou délaminage lorsque, respectivement, d_{1_bis} , d_{2_bis} ou d_{3_bis} ¹ est supérieure à 0,9, ce qui correspond à une dégradation de 90 % des propriétés au point de Gauss considéré, pour le modèle OPFM (Chapitre 2, paragraphe 2.2.1). Les endommagements des fibres et de la matrice obtenus par simulation sont ainsi confrontés aux observations microscopiques réalisées. Les délaminages prévus numériquement sont comparés aux scans ultrasonores et aux micrographies. L'évaluation du modèle d'impact est ainsi réalisée de manière qualitative et quantitative. Pour rappel, les essais confrontés aux résultats numériques n'ont pas été répétés. Les valeurs expérimentales présentées sont donc brutes et leur variabilité n'est pas prise en compte.

Comparaison des réponses globales

Le premier aspect de la confrontation du modèle d'impact aux essais concerne la prévision de la réponse globale de la structure impactée. En effet, si le modèle parvient à retranscrire la réponse d'une plaque à un impact, cela permet de conforter les conclusions qui sont issues de la comparaison des dommages obtenus numériquement et expérimentalement. La confrontation des réponses globales est réalisée en termes de force de contact, d'historique des déplacements et d'énergie dissipée, visualisée sur les courbes force / déplacement de l'impacteur.

6.1.1. Appui simple linéique

La prévision de la sensibilité du T700GC/M21 à l'énergie d'impact est analysée à l'aide des simulations à 10, 20 et 28 Joules sur une plaque quasi-isotrope (QI) simplement appuyée. Le comportement des plis est représenté par la loi OPFM dans sa formulation tridimensionnelle, c'est-à-dire avec modélisation de l'effet des délaminages sur le comportement moyen du pli (d_3) et avec prise en compte des effets des cisaillements hors-plan (τ_{13} et τ_{23}) dans les critères d'endommagement (chapitre 2, paragraphe 2.2.1). Aucune interface n'est modélisée par des zones cohésives. Les résultats numériques montrent une augmentation de la force de contact et des déplacements avec l'énergie d'impact, comme c'est le cas expérimentalement. Les calculs à 20 et 28 Joules ont divergés. L'analyse de ces calculs montre que, pour le dernier incrément convergé, les niveaux d'endommagement sont environ trois fois plus élevés qu'à la fin de l'impact à 10 Joules. Cette observation laisse supposer qu'une trop forte présence d'endommagement, entraînant de fortes non linéarités, empêche la convergence des calculs, à 20 et 28 Joules.

Les réponses à l'impact de 10 Joules, en termes de force de contact comme de déplacements, sont comparées selon l'empilement de la plaque impactée simplement appuyée (Figure 6.1). Pour cela, les résultats des simulations d'impact complet (avec contact, sans

¹ Les variables d'effet de l'endommagement d_i , $i \in \{1,2,3\}$, vont de 0 (état sain) à l'infini pour caractériser l'assouplissement du matériau. Pour simplifier l'analyse des cartes d'endommagements, un changement de variable est effectué : $d_{i_bis} = \frac{d_i}{d_{i+1}}$ avec $d_{i_bis} \in [0;1[$ (chapitre 2, paragraphe 2.2.1).

zone cohésive et avec la variable d'endommagement hors-plan de la loi OPFM tridimensionnelle activée), à 10 Joules et sur les trois empilements, sont utilisés. Les trois empilements ont des réponses similaires, comme c'est le cas expérimentalement pour les empilements QI et OR² (Figure 6.1). Les mesures expérimentales sur l'empilement OR sont un peu plus perturbées que celles obtenues avec l'empilement QI. Cela est sans doute lié à la première et à la dernière interface de l'empilement OR, potentiellement plus délaminantes que les interfaces de l'empilement QI. La loi OPFM ne permet pas de capturer ces ruptures d'interfaces, ce qui rend impossible le changement de modes propres de la plaque et de ses décollements, et donc l'apparition des vibrations observées expérimentalement (elles ne sont pas introduites par les endommagements, au plus ceux-ci modifient les valeurs des fréquences). Ce constat semble indiquer l'importance de la modélisation des interfaces par des zones cohésives capables de créer ces dissociations des plis, localisées sous l'impacteur au cours de l'impact.

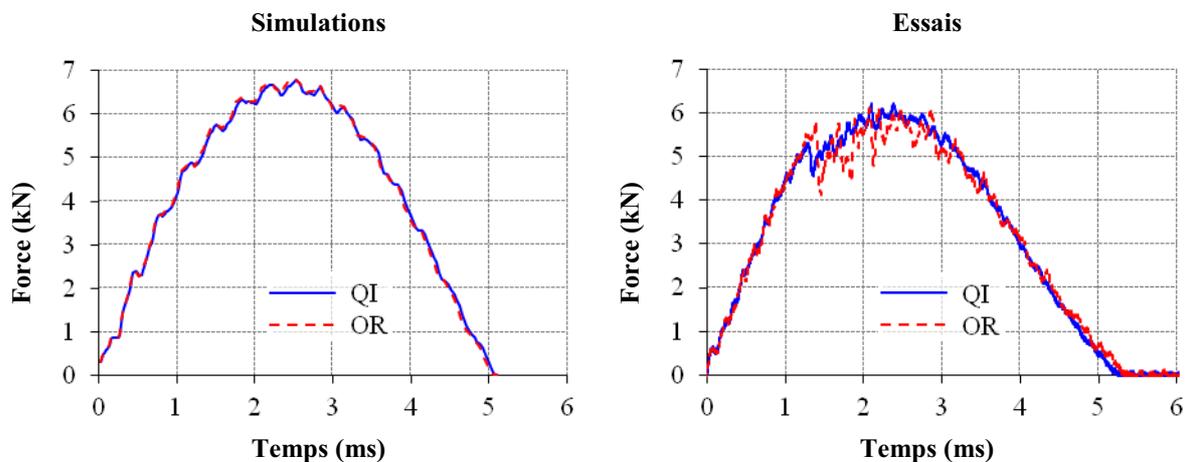


Figure 6.1. Historiques des forces de contact des simulations d'impact complet, sans zones cohésives et avec contact, à 10 Joules sur les empilements QI et OR simplement appuyés. Dans ses simulations, le comportement des plis est représenté par la loi OPFM tridimensionnelle.

Les données expérimentales et les résultats numériques sont plus particulièrement confrontés dans le cas de l'impact à 10 Joules sur la plaque quasi-isotrope simplement appuyée. Pour le modèle d'impact complet les résultats sont en bonne adéquation jusqu'à ce que le seuil d'endommagement significatif soit atteint, dans le cas expérimental (Figure 6.2). Ce seuil correspond à une extension brutale des premiers délaminages [Davies, 2004] [González, 2012]. Le modèle OPFM ne permet pas de le prévoir, sans doute à cause de l'absence de discontinuité introduite dans le modèle numérique de la plaque ou de caractère adoucissant. Ce dernier est en cours de développement et implique des difficultés numériques supplémentaires liées à la dépendance au maillage. Il est également difficile, actuellement, d'identifier les caractéristiques du comportement adoucissant hors plan [Elias, 2012]. Mis à part ce point, le modèle OPFM semble capable de reproduire le comportement global : la force maximale de contact est plus élevée de seulement 9 %, le temps d'impact très légèrement plus court de 3 %, les déplacements du point d'impact et du point opposé à l'impact sont plus faibles (respectivement, de 3 et 13 % - ce dernier chiffre est peu représentatif compte tenu de la variabilité des mesures et la nature fortement perturbée du signal constatées au chapitre 4, figure 4.9).

² Il est rappelé que l'essai d'impact à 10 Joules sur l'empilement QI simplement appuyé n'est pas exploitable, suite à une défaillance du système anti-rebond.

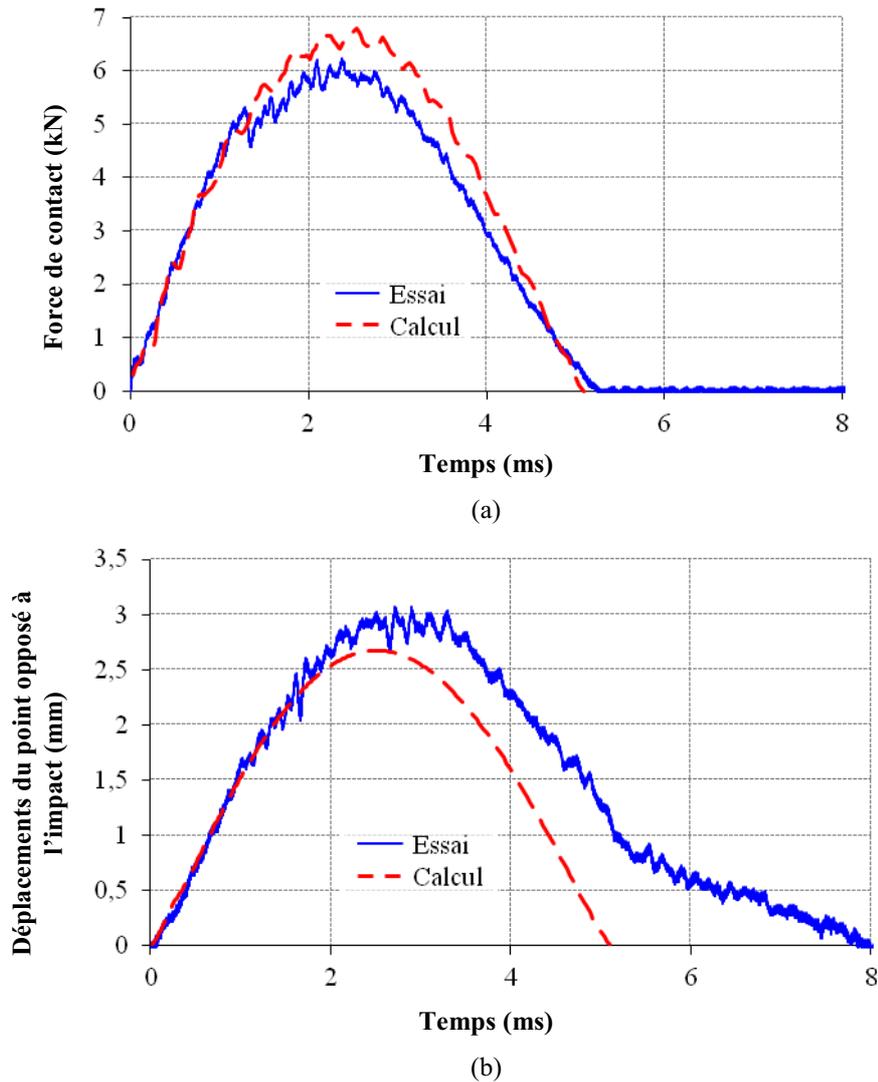


Figure 6.2. Historiques expérimentaux et numériques de la force de contact (a) et des déplacements du point opposé (b) à un impact de 10 Joules sur un empilement quasi-isotrope (QI) simplement appuyé

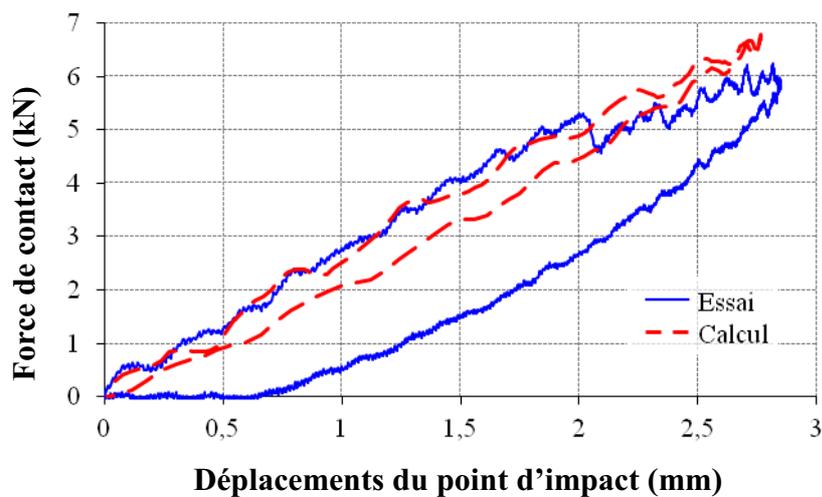


Figure 6.3. Évolutions expérimentale et numérique de la force de contact en fonction des déplacements du point d'impact. Ces déplacements sont calculés sur l'impacteur, expérimentalement.

Du point de vue de l'énergie absorbée, l'aire sous la courbe force/déplacements est plus faible numériquement par rapport aux mesures expérimentales (1 Joule contre 5

expérimentalement - Figure 6.3). Elle est notamment plus étroite. Le même écart en énergies absorbées est constaté pour l'empilement OR.

Le caractère adoucissant de l'endommagement des plis, par nature beaucoup plus dissipatif, est sûrement responsable d'une partie de l'absorption de l'énergie d'impact, qui ne peut donc être représentée dans la version actuelle du modèle OPFM. D'autre part, expérimentalement, il y a un décalage entre la fin du contact (quand la force redevient nulle) et le moment où l'impacteur repasse par sa position au moment de l'impact (le déplacement de l'impacteur est alors nul). Ce décalage suggère que des déformations résiduelles sont présentes au niveau du point d'impact, sur la cible. Une piste d'amélioration du modèle OPFM consisterait alors à introduire la viscoplasticité de la matrice dans le modèle de comportement du pli OPFM. Elle permettrait d'autre part de capturer une profondeur d'empreinte résiduelle à confronter aux mesures effectuées par stéréo-corrélation d'images, suite aux essais d'impact (chapitre 4). Bouvet *et al.* [Bouvet, 2012] utilisent par ailleurs des lois plastiques pour modéliser l'effet des débris de matrice sur la refermeture des fissures. Dans le modèle OPFM, l'effet d'éventuels débris, qui sont observés dans des cas très particuliers (composites fortement orientés) pour des énergies plus élevées, interviendrait dans des déformations résiduelles. Cela pose la question de l'identification de la création d'un débris et de sa taille, ainsi que celle de l'effet de ce débris sur le comportement du pli, sans avoir recours à un recalage par rapport aux observations expérimentales.

Dans le chapitre 3, au paragraphe 3.2.2, il a été montré que la modélisation de l'ensemble des interfaces entre deux plis d'orientations différentes permettait de répartir l'endommagement à ces interfaces et de capturer un seuil d'endommagement significatif dans le signal en force. C'est pourquoi les données expérimentales sont également confrontées à la simulation d'un impact à 10 Joules sur plaque quasi-isotrope, où le contact a été remplacé par des déplacements équivalents, issus d'un calcul d'impact élastique.

Si la réponse en termes de forces de contact ne correspond pas entièrement à la réponse mesurée au cours de l'essai (Figure 6.4), l'évolution temporelle de la force est cependant correctement décrite jusqu'au seuil d'endommagement significatif. L'insertion des zones cohésives adoucissantes permet donc de capturer un tel seuil. La visualisation dynamique de l'évolution de l'endommagement montre que ce seuil est associé à une propagation rapide des délaminages. Cette notion de vitesse d'endommagement n'est peut-être pas suffisamment présente dans le modèle OPFM. Par ailleurs, le seuil d'endommagement prévu est plus faible que le seuil expérimental (32% d'écart entre les deux valeurs). Après avoir atteint le seuil d'endommagement significatif numérique, la force sur la plaque est maintenue autour de 3 kN, soit deux fois moins que la force maximale mesurée expérimentalement. Cet écart est certainement lié à la simplification du modèle : il n'y a, en effet, pas d'interaction entre les déplacements imposés et l'endommagement créé au sein de la plaque. Ces derniers ne sont pas actualisés en fonction de cet état d'endommagement. Le modèle simplifié met ainsi en évidence le caractère fondamental de la représentation explicite du contact.

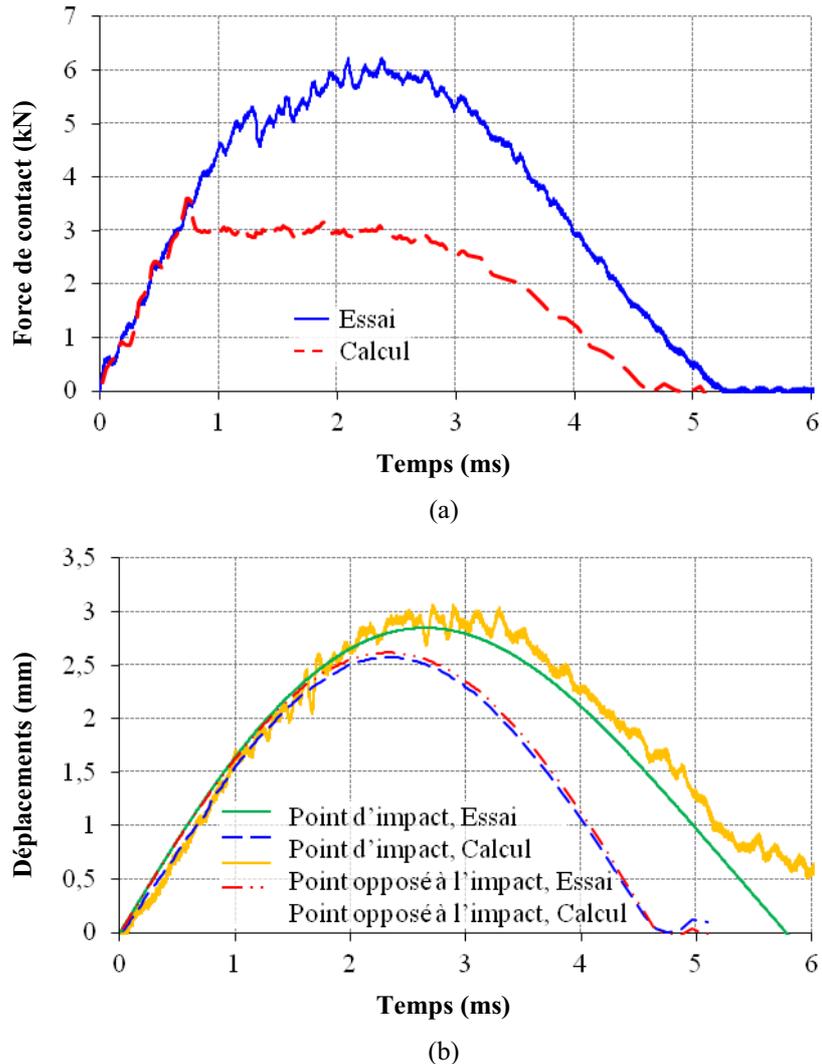


Figure 6.4. Historiques expérimentaux et numériques des forces (a) et des déplacements du point d'impact et de son opposé (b) pour l'impact à 10 Joules sur empilement QI. La simulation utilise le modèle d'impact simplifié (modélisation des interfaces par zones cohésives mais pas d'algorithme de contact).

Les courbes force/déplacements du point d'impact ne correspondent pas non plus (Figure 6.5), mais une amélioration du comportement numérique, comparativement à celui obtenu en impact avec OPFM, est à noter. L'aire sous la courbe est en effet plus large à son sommet, à cause du plateau de force (hystérésis). L'écart en termes d'énergie absorbée par mise en mouvement et par endommagement de la plaque n'est plus que de 3 Joules numériquement contre 5 expérimentalement. Il faut toutefois noter que l'énergie maximale transmise à la plaque dans la simulation n'est que de 6 Joules, contre 10 expérimentalement. Cependant, la proportion d'énergie absorbée par rapport à l'énergie incidente semble mieux respectée que dans le cas du modèle complet (contact, loi OPFM tridimensionnelle et pas de zones cohésives). Cela semble indiquer l'importance de l'endommagement hors plan, notamment de son caractère adoucissant, dans les mécanismes d'absorption de l'énergie incidente. D'autre part, la déformation résiduelle de la plaque n'est toujours pas prévue. La viscoplasticité de la matrice semble alors être une piste importante d'amélioration du modèle OPFM.

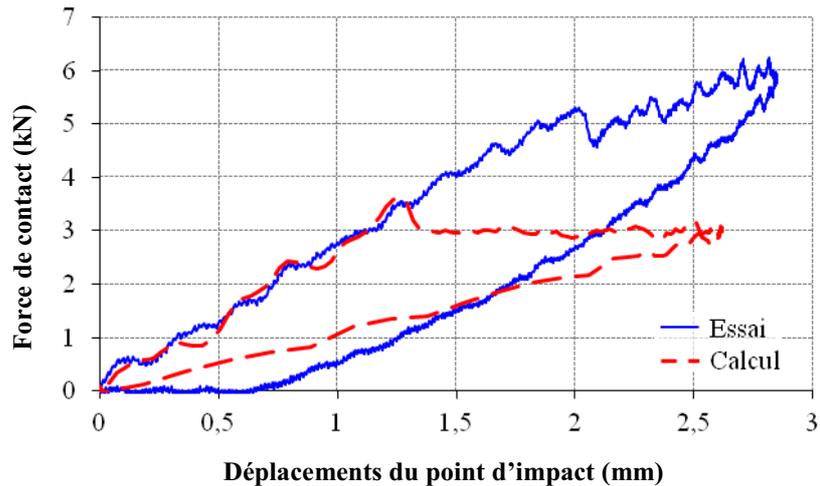


Figure 6.5. Évolutions expérimentale et numérique de la force de contact en fonction des déplacements du point d'impact. La simulation utilise le modèle d'impact simplifié. Toutes les interfaces sont modélisées par des zones cohésives.

6.1.2. Encastrement

La prévision de la sensibilité du T700GC/M21 à l'énergie d'impact pour le montage d'encastrement est analysée à l'aide des simulations d'impacts à 10, 20 et 28 Joules sur une plaque quasi-isotrope. Pour ces simulations, le comportement des plis est représenté par la loi OPFM dans sa formulation tridimensionnelle et aucune interface n'est modélisée par des zones cohésives. Les résultats numériques montrent alors que la force de contact et les déplacements du point d'impact et du point opposé augmentent avec l'énergie incidente, comme c'est le cas expérimentalement.

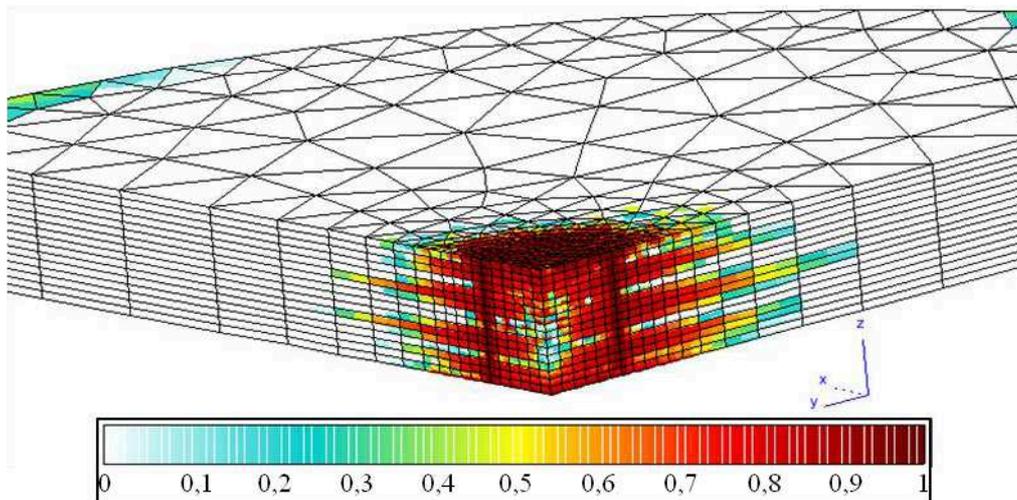


Figure 6.6. État d'endommagement matriciel au dernier incrément convergé ($t = 1,14$ ms) du calcul d'impact à 20 Joules sur l'empilement QI encasté, avec la loi OPFM tridimensionnelle

Cependant, les calculs à 20 et 28 Joules ont divergés avant d'atteindre la force maximale de contact. L'analyse des endommagements pour le dernier incrément convergé a montré des niveaux d'endommagements beaucoup plus élevés dans le cas de ces impacts à plus fortes énergies que dans le cas de l'impact à 10 Joules (jusqu'à 185 fois plus d'effet de l'endommagement des fibres à 20 Joules et environ 10 fois plus d'effets des endommagements à 28 Joules). Le dernier incrément convergé de la simulation à 20 Joules montre une bande d'endommagement matriciel dans l'épaisseur du stratifié, comme si la

matrice située sous l'impacteur avait été « détachée » du reste de la plaque (Figure 6.6). Cela pourrait expliquer l'origine des divergences des calculs à 20 et 28 Joules.

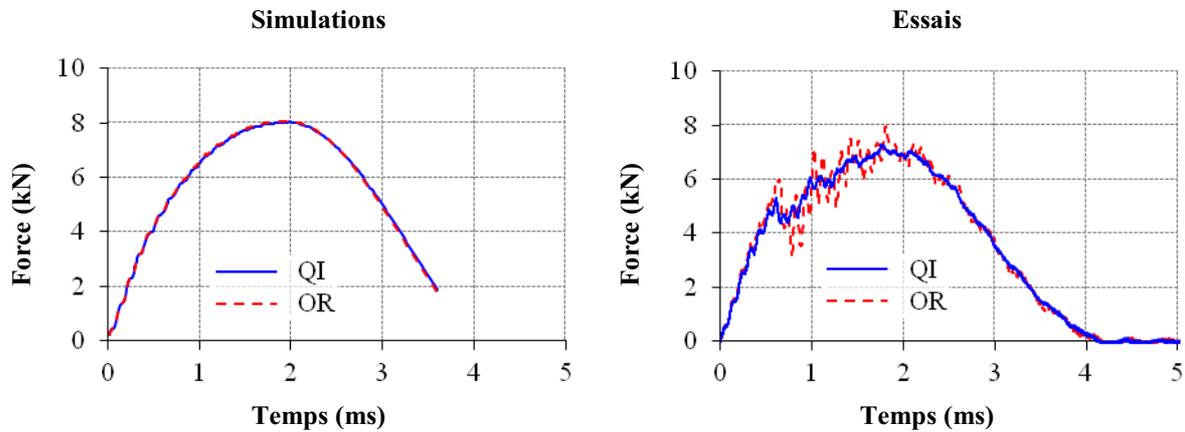


Figure 6.7. Historiques expérimentaux et numériques des forces de contact dans le cas d'un impact à 10 Joules sur plaque encastrée, pour les empilements QI et OR

Concernant la sensibilité à l'impact du T700GC/M21 selon la séquence d'empilement, les simulations d'impact à 10 Joules sur les trois empilements, avec le modèle d'impact complet (contact mais pas de zones cohésives) sont confrontées. Ces trois simulations sont réalisées avec la loi OPFM tridimensionnelle, où la variable d'effet de l'endommagement hors plan est activée pour représenter les effets des délaminages sur le comportement des plis. Les réponses, en termes de force de contact, de déplacements du point d'impact ou du point opposé et d'énergie dissipée, sont les mêmes quel que soit l'empilement considéré (Figure 6.7).

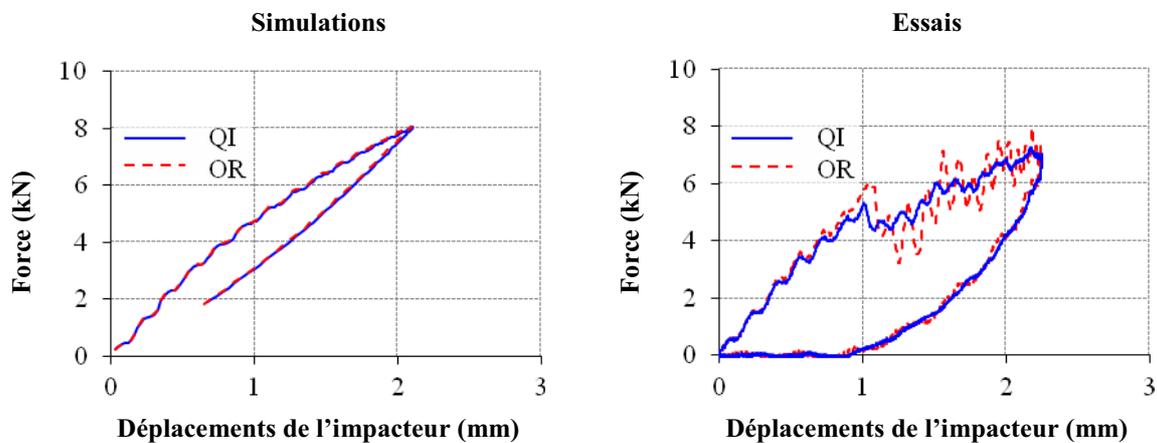


Figure 6.8. Évolutions expérimentales et numériques des forces de contact en fonction des déplacements de l'impacteur, dans le cas d'un impact à 10 Joules sur plaque encastrée, pour les empilements QI et OR

Si les réponses expérimentales entre les empilements QI et OR³ à 10 Joules sont similaires jusqu'au seuil d'endommagement, les mesures expérimentales sur l'empilement OR sont en revanche beaucoup plus perturbées que celles obtenues avec l'empilement QI, comme c'était le cas pour l'appui simple linéique. Cela semble confirmer l'importance de la modélisation des interfaces par des zones cohésives, si ces perturbations doivent être représentées. On retrouve en revanche bien le fait que l'énergie absorbée est proche, entre les deux empilements (Figure 6.8).

³ Il est rappelé que l'essai d'impact à 10 Joules sur l'empilement QI n'est pas exploitable, suite à une défaillance du système anti-rebond.

Comme pour la configuration d'appui simple linéique, la modélisation de l'impact à 10 Joules sur l'empilement QI par le modèle OPFM reproduit bien le comportement global, compte-tenu de la dispersion observée expérimentalement pour l'impact à 18 Joules sur l'empilement QI encasté et de la variabilité des propriétés liées à l'endommagement. Les niveaux de force de contact sont en effet plus élevés de seulement 10 % et les déplacements sont légèrement plus faibles (de 6 % pour le point d'impact et de 16 % pour le point opposé), comparativement aux essais.

L'énergie absorbée par le modèle OPFM tridimensionnel est plus faible que l'énergie absorbée expérimentalement (2 Joules absorbés contre 7 expérimentalement - Figure 6.8). Cela semble confirmer l'hypothèse qu'il manque un mécanisme majeur dans ce modèle pour obtenir une dissipation réaliste de l'énergie d'impact. L'absence de caractère adoucissant pourrait à nouveau expliquer la perte d'énergie manquante dans le modèle d'impact. Une autre part de l'énergie dissipée pourrait être associée à la viscoplasticité de la matrice, qui n'apparaît pas comme mécanisme dans le modèle OPFM. Cette viscoplasticité permettrait, d'autre part, d'estimer la profondeur d'empreinte résiduelle et donc le décalage entre le moment où l'impacteur n'est plus en contact avec la plaque (force nulle) et le moment où l'impacteur revient à sa position initiale (déplacement nul).

Afin de prendre en compte les discontinuités liées aux délaminages, les interfaces de l'empilement QI situées entre deux plis d'orientations des fibres différentes sont modélisées par des zones cohésives. Le contact est remplacé par un déplacement équivalent, pour limiter les problèmes de convergence des simulations. Le champ de déplacements est initialement issu d'un calcul préliminaire d'impact avec un comportement élastique linéaire des plis et sans zones cohésives. L'application des déplacements de l'impacteur calculés pendant l'essai plutôt que ceux issus du calcul d'impact élastique est également testée. L'évolution temporelle des déplacements expérimentaux est peut-être, en effet, mieux adaptée à l'évolution de l'état d'endommagement de la plaque. Comme dans le cas simplement appuyé, les évolutions temporelles de la force et des déplacements sont correctement approximées, jusqu'au seuil d'endommagement significatif (Figure 6.9).

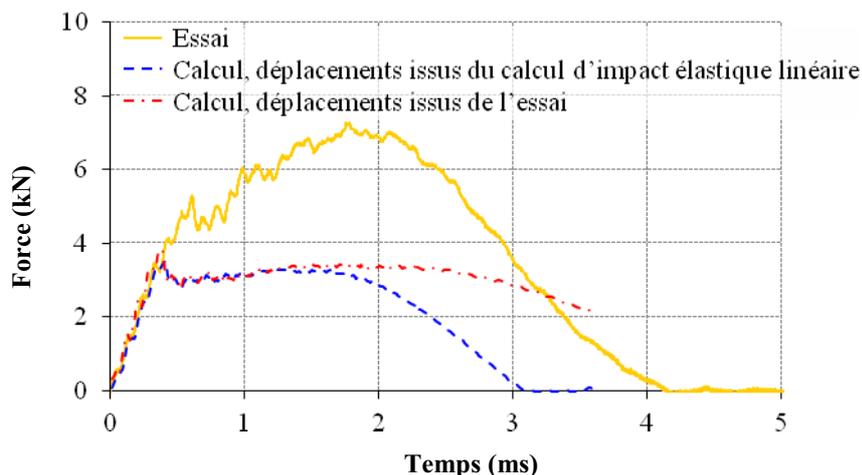


Figure 6.9. Historiques expérimental et numériques des forces sur la plaque (calculs d'impact simplifiés) et de l'impacteur (essai) pour un cas d'impact à 10 Joules sur plaque quasi-isotrope encastée. Les simulations sont réalisées avec le modèle d'impact simplifié (zones cohésives, pas de contact).

Celui-ci survient trop tôt dans les simulations (vers 0,4 ms contre 0,7 ms expérimentalement) et a une valeur trop faible (3,54 kN contre 5,32 kN expérimentalement). Le fait d'imposer les déplacements de l'impacteur, calculés pendant l'essai par intégration du signal en force, plutôt que les déplacements issus du calcul d'impact élastique, permet de relever légèrement ce seuil (de 3,54 à 3,84 kN), mais cela reste insuffisant. Après la chute

brutale de la force, le niveau de force augmente à nouveau, comme c'est le cas expérimentalement, ce qui constitue une amélioration par rapport à la simulation du cas simplement appuyé. Cependant, cette augmentation reste négligeable par rapport à celle observée expérimentalement.

Les valeurs des énergies absorbées obtenues numériquement restent inférieures à la valeur expérimentale (2 Joules avec les déplacements issus du calcul d'impact élastique et 3 avec les déplacements expérimentaux de l'impacteur, contre 7 Joules absorbés expérimentalement - Figure 6.10). Il est à noter que les simulations à déplacements imposés entraînent une diminution de l'énergie maximale transmise à la plaque (5 Joules à déplacements issus du calcul élastique et 6 Joules à déplacements issus de l'essai, contre 10 Joules expérimentalement). Le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie incidente est cette fois moins bien retranscrit que dans le cas de l'appui simple (60 % de l'énergie est absorbée lorsque les déplacements imposés sont issus du calcul et 50 % lorsqu'ils sont issus de l'essai, contre 30 % d'énergie absorbée expérimentalement). Ici encore, le plateau de force est responsable de l'élargissement (hystérésis) de la courbe force / déplacements après le seuil d'endommagement. Cela semble souligner l'importance du comportement adoucissant hors plan pour la description du comportement à l'impact.

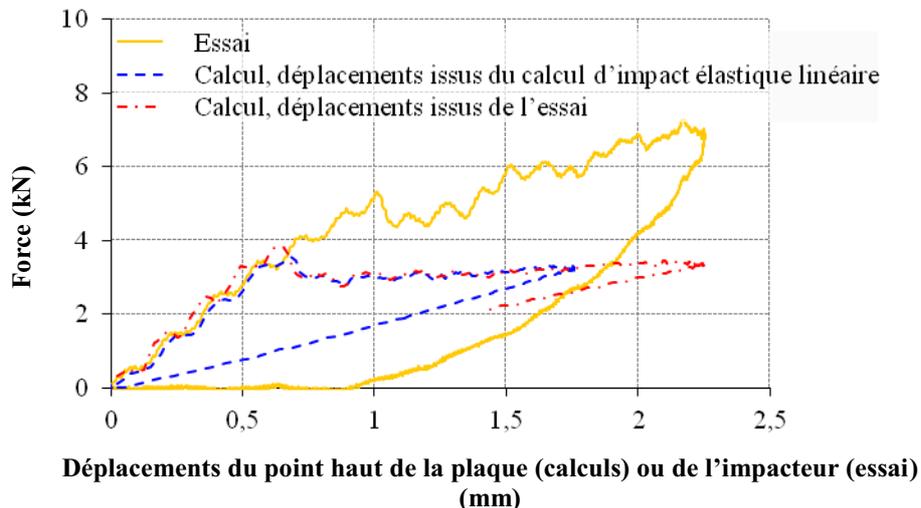


Figure 6.10. Évolutions expérimentale et numériques des forces en fonction des déplacements appliqués (calculs) ou des déplacements de l'impacteur (essai) pour un cas d'impact à 10 Joules sur une plaque quasi-isotrope encadrée. Les simulations sont réalisées avec le modèle d'impact simplifié (sans contact et avec zones cohésives).

D'autre part, le déplacement de l'impacteur montre un décalage entre le moment où il n'est plus en contact avec la plaque (force nulle) et le moment où il revient à son point de départ (déplacement nul). La viscoélasticité de la matrice ne suffit pas à expliquer ce décalage. Sa viscoplasticité est sans doute un mécanisme majeur en impact, qu'il est nécessaire de prendre en compte, ce qui n'est pas le cas actuellement dans le modèle OPFM.

6.1.3. Prévision de la réponse à un impact du T700GC/M21 selon les conditions aux limites

Afin de mieux éprouver les modèles d'impact complet et simplifié, des simulations sur les configurations d'appui simple linéique et d'encastrement ont été menées. Le modèle d'impact complet est associé à la loi matériau OPFM dans sa formulation tridimensionnelle. Le contact est pris en compte et il n'y a pas de zones cohésives pour modéliser explicitement

les interfaces. Les effets des délaminages sur le comportement du pli sont représentés par la variable d'effet de l'endommagement hors plan, d_3 , du modèle OPFM tridimensionnel. Le modèle d'impact simplifié, sans contact et avec zones cohésives, est lui associé à cette même loi pour le comportement endommageable des plis, l'endommagement hors plan, d_3 , étant désactivé. Des interfaces, situées entre deux plis d'orientations différentes, sont insérées à la place de cet endommagement continu et leur comportement est modélisé par la loi bilinéaire de zones cohésives. La confrontation des résultats obtenus avec ces deux modélisations permet ainsi de vérifier que les modèles d'impact permettent de traduire la sensibilité de la structure aux conditions aux limites. Pour cela, les simulations d'impact à 10 Joules sur l'empilement quasi-isotrope sont comparées pour estimer la capacité du modèle d'impact complet et du modèle d'impact simplifié à reproduire le comportement global du T700GC/M21 en fonction des conditions aux limites appliquées à la plaque.

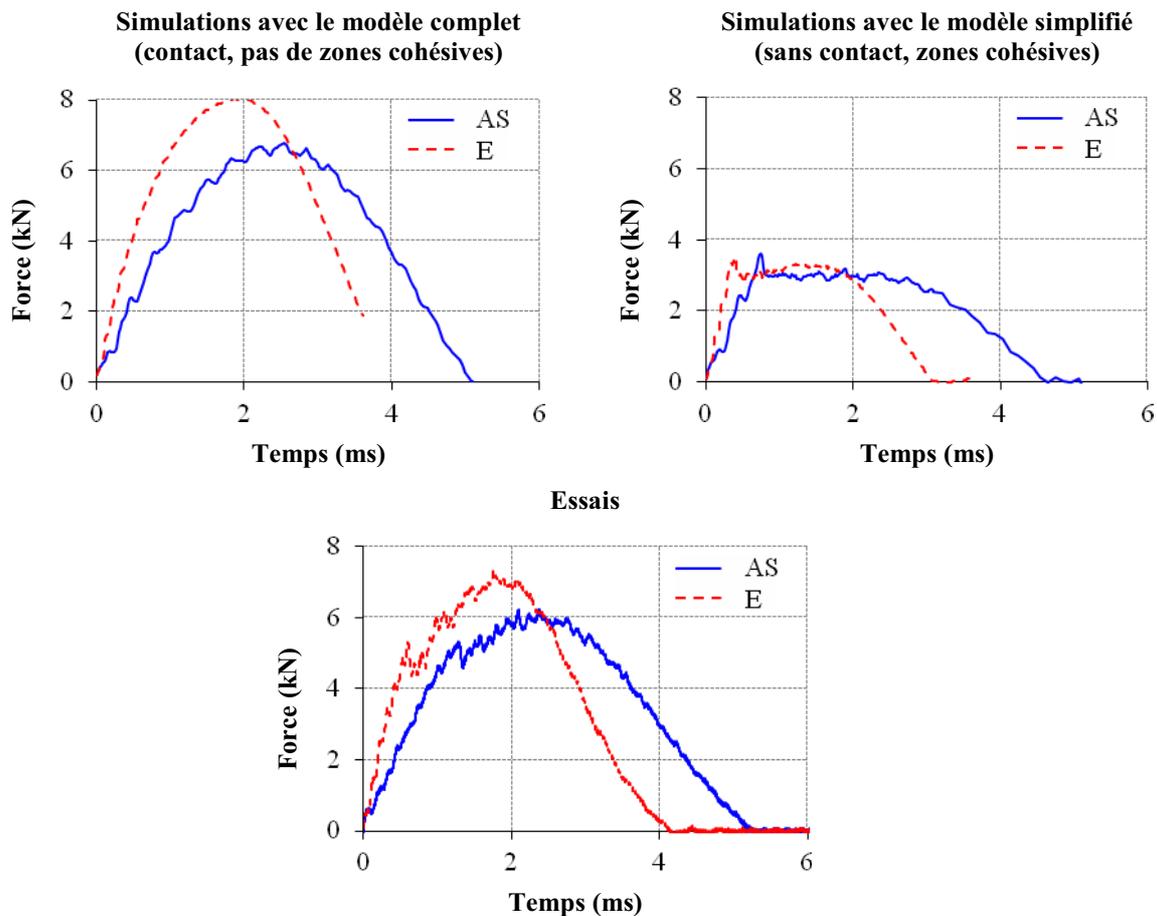


Figure 6.11. Historiques numériques et expérimentaux des forces dans un cas d'impact à 10 Joules sur une plaque quasi-isotrope encastree (E) ou simplement appuyée (AS). Le modèle d'impact est soit complet (impact), soit simplifié (déplacements imposés issus du calcul élastique).

Dans les deux configurations de modélisation, la sensibilité de la structure aux conditions aux limites est bien reproduite (Figure 6.11). La plaque simplement appuyée est plus flexible, ce qui induit une force maximale de contact plus faible de 15 %, contre 14 % d'écart entre les deux configurations, expérimentalement (dans le cas de la modélisation complète uniquement), et des déplacements maximaux plus élevés de 24 % pour le point d'impact, contre 20 % expérimentalement. Les seuils d'endommagements significatifs prévus par le modèle d'impact simplifié dans les deux configurations, bien qu'inférieurs aux seuils expérimentaux, ont des valeurs similaires (3,54 kN en encastrement et 3,6 kN en appui

simple), ce qui est également observé expérimentalement (5,32 kN en encastrement et 5,31 kN en appui simple linéique).

Dans le modèle d'impact complet, l'énergie absorbée en appui simple est également plus faible de 50 % que l'énergie absorbée en encastrement, contre 28 % d'écart expérimentalement (Figure 6.12). La condition d'encastrement ne permet pas à la plaque d'absorber autant d'énergie d'impact par déformation que dans le cas de l'appui simple. Cela conduit donc à une énergie dissipée par endommagement plus grande en encastrement. En revanche, le modèle d'impact simplifié conduit à une énergie dissipée en appui simple plus grande de 50 % qu'en encastrement. Les déplacements imposés en appui simple sont plus importants que ceux imposés en encastrement, ce qui semble engendrer, numériquement, une plus grande absorption de l'énergie fournie par le chargement. La comparaison des délaminages créés au sein de la plaque montre en effet que l'empilement QI simplement appuyé a plus délaminé que l'empilement QI encastrement (Figure 6.27).

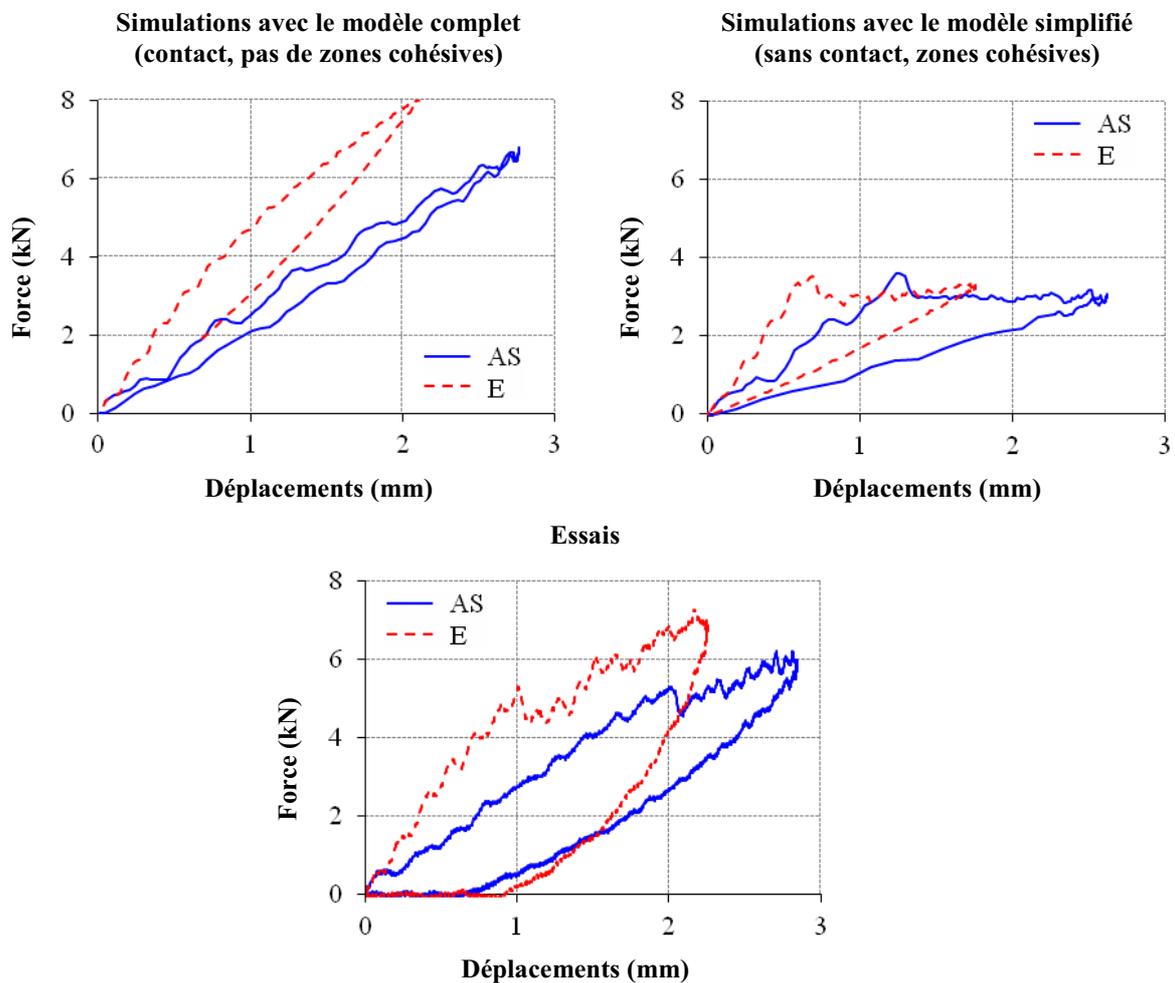


Figure 6.12. Évolutions expérimentales et numériques des forces en fonction des déplacements du nœud haut de la plaque (calculs) ou de l'impacteur (essais), dans un cas d'impact à 10 Joules sur une plaque quasi-isotrope encadrée (E) ou simplement appuyée (AS).

Le modèle d'impact complet et le modèle d'impact simplifié permettent de reproduire qualitativement la sensibilité aux conditions aux limites de la plaque stratifiée en T700GC/M21. Pour reproduire quantitativement la réponse à un impact, ces travaux montrent que des mécanismes semblent manquer au modèle OPFM, en particulier le caractère adoucissant, notamment en hors plan, et la viscoplasticité de la matrice. Du point de vue du

modèle numérique, cette première partie montre, grâce au modèle d'impact simplifié, l'importance de la gestion du contact dans la modélisation.

Ces analyses sur le comportement numérique global sont nécessaires pour comprendre les endommagements obtenus par rapport à la littérature et pour estimer les capacités actuelles du modèle OPFM tridimensionnel et du modèle bilinéaire à prévoir les dommages d'impact. Des pistes d'amélioration de ces lois de comportement pourront ainsi être proposées à la suite de ces estimations, en évitant le recours au recalage à l'expérience. Pour cela, dans un premier temps, les endommagements de fibres obtenus numériquement et expérimentalement sont comparés. Les simulations d'impact pour des énergies supérieures à 10 Joules n'ayant pas abouti, les endommagements finaux à 10 Joules sont comparés aux résultats expérimentaux.

6.2. Capacité du modèle OPFM à prévoir les endommagements de fibres

En appui simple linéique comme en encastrement, pour l'impact à 10 Joules, quel que soit l'empilement, les ruptures de fibres prévues par le modèle complet (avec contact, sans zones cohésives et avec le modèle OPFM tridimensionnel où la variable d'effet de l'endommagement hors plan, d_3 , est activée) sont limitées à quelques points de Gauss situés directement sous l'impacteur (Figure 6.13). Les micrographies réalisées sur les trois empilements, encastres ou simplement appuyés et impactés à 20 Joules et sur l'empilement QI, encastres ou simplement appuyés et impactés à 10 Joules (Schémas des figures 6.15 et 6.17) ne montrent cependant pas de ruptures de fibres situées sous l'impacteur. Cela met en évidence une amélioration à apporter au modèle OPFM, déjà signalée au chapitre 3, paragraphe 3.2.1., concernant la prise en compte de l'effet d'une pression hydrostatique. En effet, sous l'effet de cette pression, le comportement de la matrice est modifié et retarde l'endommagement des fibres en compression (kinking). Ce renforcement n'est actuellement pas pris en compte dans les critères de ruptures en compression du modèle OPFM, ce qui engendre des ruptures de fibres irréalistes.

Dans le cas de l'empilement QI, encastres ou simplement appuyés et impactés à 10 J, la simulation d'impact simplifiée (sans contact mais avec zones cohésives et la loi OPFM tridimensionnelle où la variable d'effet de l'endommagement hors plan, d_3 , est désactivée), à déplacements imposés, introduit des ruptures de fibres supplémentaires dans l'épaisseur du stratifié, alors qu'aucune rupture de fibres n'est observée sur les coupes micrographiques réalisées. Les ruptures de fibres observées dans ce calcul sont majoritairement liées à la compression longitudinale.

L'introduction des zones cohésives pourrait modifier le champ de contraintes, lorsque celles-ci sont rompues. Cependant, les interfaces délaminées sont situées à proximité de la surface non impactée (Figure 6.27), ce qui ne correspond pas à la localisation des ruptures de fibres. Une autre hypothèse est que les ruptures de fibres observées sont sans doute liées au chargement imposé, qui s'avère trop sévère pour ces ruptures, comparativement à l'impact.

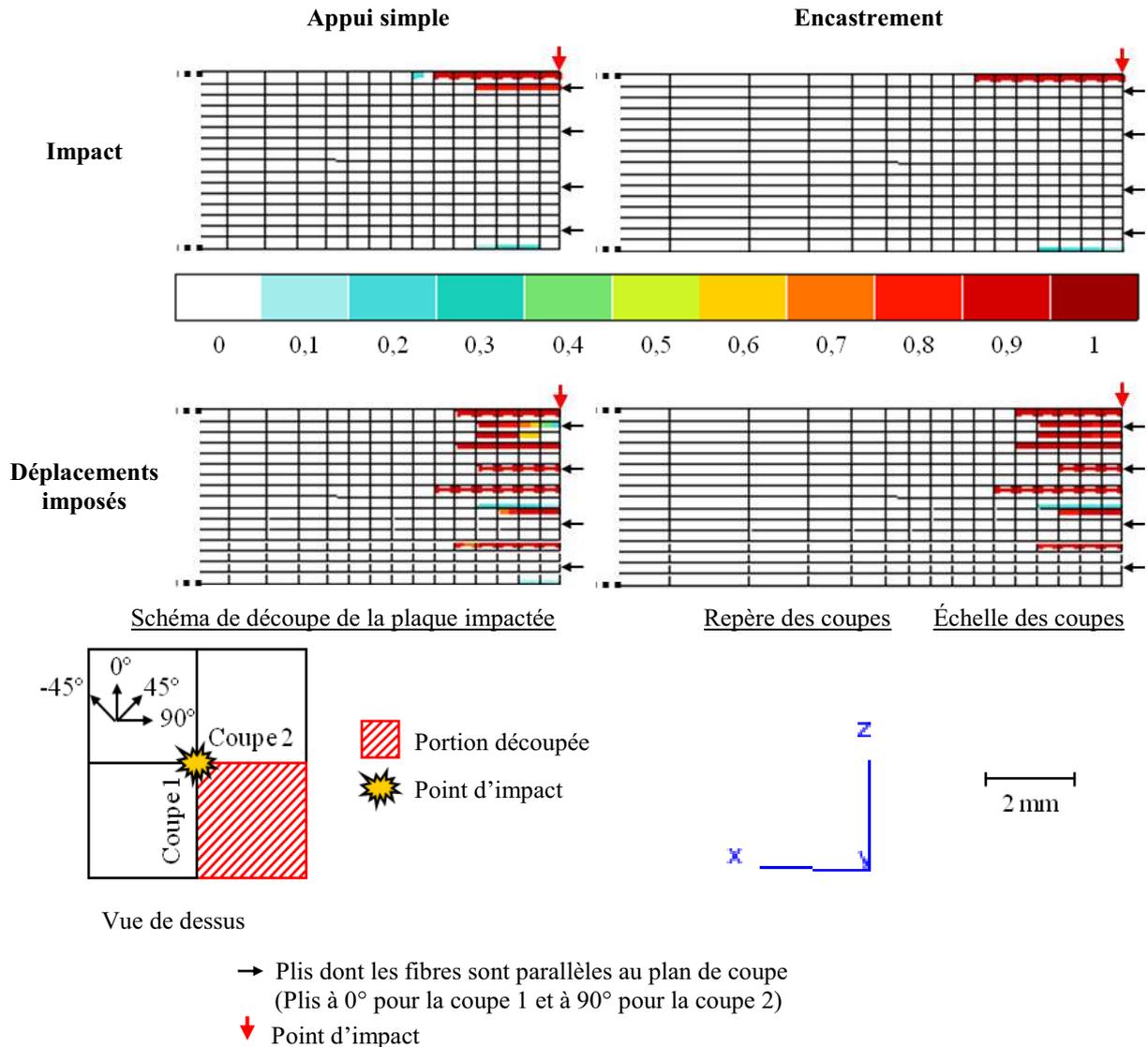


Figure 6.13. Endommagements des fibres, d_{1_bis} , prévus par la loi OPFM tridimensionnelle seule (Impact) ou associée au modèle bilinéaire de zones cohésives (Déplacements imposés), pour les impacts à 10 Joules sur l'empilement QI encastré ou simplement appuyé. Les coupes micrographiques associées aux cartographies des endommagements de fibres (Coupe 2) sont reportées (Micrographie).

Les capacités actuelles du modèle OPFM à reproduire les ruptures de fibres induites par un impact à 10 Joules ont été établies. Dans le paragraphe suivant, la capacité des modèles d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) et simplifié (sans contact et avec zones cohésives) à prévoir les endommagements matriciels est étudiée.

6.3. Capacité du modèle OPFM et des modèles de zones cohésives à prévoir les dommages intralaminaires

6.3.1. Appui simple linéique

En appui simple linéique et quel que soit l'empilement, la fissuration matricielle prévue par le modèle OPFM tridimensionnel est répartie dans l'épaisseur, comme c'est le cas expérimentalement (Figure 6.14). L'analyse des champs de contrainte indique que celle située directement sous l'impacteur est liée à la compression transverse. D'après Puck [Puck, 1998],

cela indique des fissures inclinées d'environ 53° , pour la compression pure. Cela semble correspondre aux inclinaisons observées sur les coupes micrographiques (Figure 6.15). Dans le pli inférieur, face opposée à l'impact, les contraintes transverses indiquent une rupture en traction, ce qui correspond à des fissures droites. Ce type de fissure est effectivement présent à cet endroit, sur les coupes micrographiques. Le cisaillement transverse τ_{12} semble critique sous le plan médian tandis que le cisaillement hors plan τ_{23} semble prépondérant pour les ruptures matricielles dans l'épaisseur. Ce dernier semble être responsable de l'étendue des ruptures matricielles, selon les axes plans principaux. Cela indique des fissures matricielles inclinées, comme cela est observé dans l'épaisseur, sur les coupes micrographiques.

Les endommagements matriciels prévus par le modèle OPFM, en impact, sont comparés entre empilements (Figure 6.14). Les plis non endommagés correspondent aux plis dont les fibres sont parallèles au plan de coupe. Sur les coupes micrographiques des trois empilements impactés à 20 Joules, aucune fissure n'est effectivement visible dans ces plis.

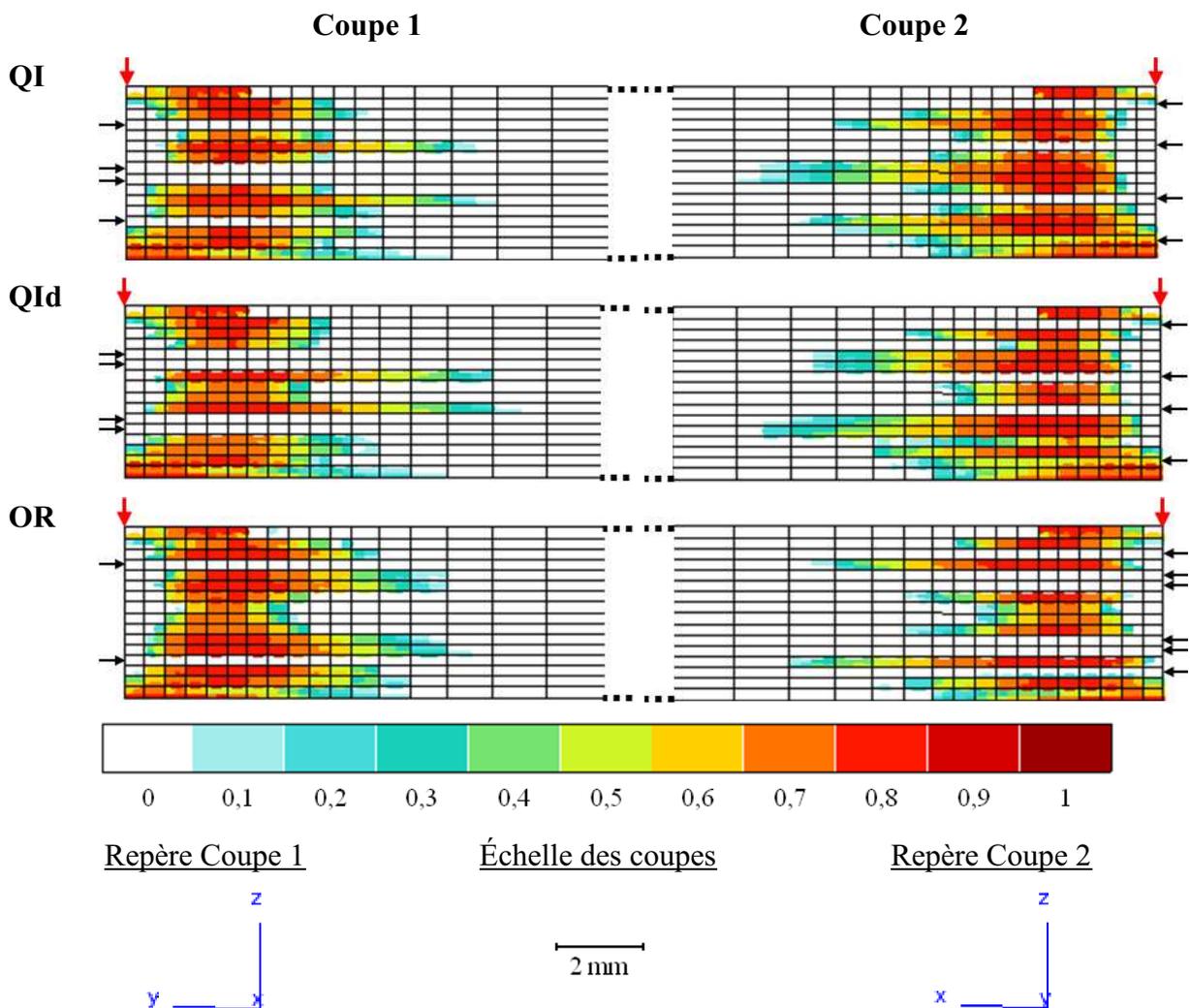


Figure 6.14. Endommagements matriciels, d_{2_bis} prévus par le modèle OPFM pour des impacts à 10 Joules sur les trois empilements, pour les deux plans de coupe du quart de plaque découpé expérimentalement. Les flèches rouges indiquent le point d'impact et les flèches noires indiquent les plis dont les fibres sont orientées dans la direction du plan de coupe.

D'autre part, l'empilement QId présente moins de fissures larges (donc moins de défauts intenses) que dans le cas des deux autres empilements, pour la face 1 du quart de plaque considéré. Pour la face 2, c'est l'empilement OR qui est le moins endommagé. Ces observations semblent reprises par le modèle OPFM. Ce modèle semble donc permettre de

prévoir qualitativement les endommagements matriciels pour le T700GC/M21, sur les trois empilements avec la condition aux limites simplement appuyée.

Les coupes micrographiques de l'empilement QI simplement appuyé et impacté à 10 Joules sont confrontées aux endommagements matriciels prévus par le modèle d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) et par le modèle numérique d'impact simplifié (sans contact et avec zones cohésives). Le premier constat est que ce dernier entraîne un sur-endommagement matriciel (Figure 6.15). En effet, celui-ci est présent dans toute l'épaisseur du stratifié, ce qui n'est pas le cas sur les coupes micrographiques. Cela semble montrer que le chargement à déplacements imposés est trop sévère pour l'endommagement matriciel, comme c'était le cas pour les ruptures de fibres. En effet, les zones cohésives ne semblent pas en cause, puisque les interfaces rompues ne sont pas réparties dans l'épaisseur mais concentrées à proximité de la face non impactée (Figure 6.21).

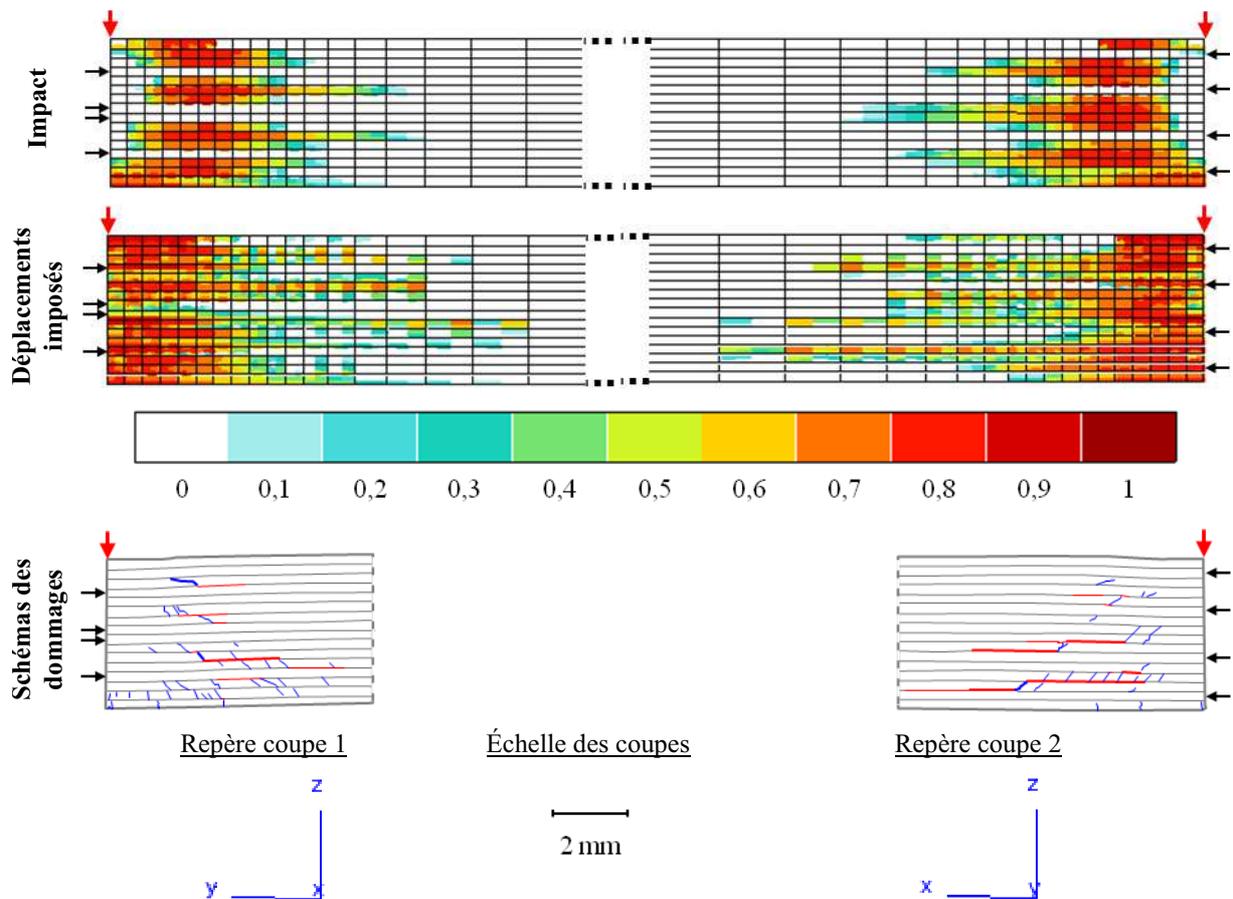


Figure 6.15. Endommagements matriciels, d_{2_bis} , prévus par le modèle OPFM avec le modèle d'impact complet (Impact) et par le modèle OPFM associé aux zones cohésives avec le modèle d'impact simplifié (Déplacements imposés). Sur les schémas des dommages observés sur les coupes micrographiques, les fissurations matricielles sont représentées en bleu et les délaminages en rouge. Le cas étudié est celui de l'empilement QI simplement appuyé impacté à 10 Joules. Les flèches rouges indiquent le point d'impact et les flèches noires indiquent les plis dont les fibres sont orientées dans la direction du plan de coupe.

Les deux types de simulation prévoient un endommagement du pli en surface impactée qui n'est pas visible sur les coupes micrographiques. Ceci est sans doute lié, encore une fois, à la non prise en compte de l'effet de la pression hydrostatique. Mis à part ce pli, les plis endommagés dans la simulation avec le modèle d'impact complet présentent des fissurations matricielles sur la micrographie. La répartition de cet endommagement prévu semble respecter celle observée, avec des endommagements matriciels proches de l'axe d'impact,

dans les deux plis les plus proches de la face opposée à l'impact (surtout sur la coupe 1 et pour le dernier pli de la coupe 2). Du point de vue de la densité de fissures, c'est-à-dire du nombre d'éléments où la variable $d_{I\ bis}$ a atteint la valeur de 0,9 par pli, le quatrième pli en partant de la face opposée à l'impact est effectivement parmi les plus endommagés, sur la coupe 2, dans la simulation, avec cinq éléments qui peuvent être considérés comme rompus. Les densités dans les autres plis sont plus discutables. Les plis inférieurs de la coupe 1 semblent sous-endommagés, tandis que les autres plis de la coupe 2 semblent sur-endommagés, par rapport à la densité de fissures observées sur la micrographie, si la règle de la valeur de 0,9 est observée strictement. Cependant, ces prévisions de la fissuration matricielle semblent globalement correctes par rapport à la variabilité de l'endommagement et de sa localisation.

6.3.2. Encastrement

Comme dans le cas de l'appui simple linéique, la fissuration matricielle prévue par le modèle d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) est répartie dans l'épaisseur (Figure 6.16). L'analyse des champs de contrainte indique que la fissuration située directement sous l'impacteur semble liée à la compression transverse, ce qui correspond à des fissures inclinées d'environ 53° , comme sur les coupes micrographiques (Figure 6.17). Dans le pli inférieur, face opposée à l'impact, les contraintes transverses indiquent une rupture en traction, ce qui correspond à des fissures droites, comme observées sur les coupes micrographiques. D'autre part, dans le cas de l'encastrement, le cisaillement transverse τ_{12} semble être le plus critique au-dessus du plan médian et dans les plis externes, en bordure de la zone de contact avec l'impacteur, tandis que le cisaillement transverse τ_{23} semble prépondérant pour les ruptures matricielles survenant au cœur du stratifié. Ce dernier semble être responsable de l'étendue des ruptures matricielles, selon les axes plans principaux. Cela indique des fissures matricielles inclinées, comme cela est observé dans l'épaisseur, sur les coupes micrographiques.

Comme dans le cas de l'appui simple linéique, les simulations d'impacts complètes (avec contact et sans zones cohésives) à 10 Joules sur les trois empilements prévoient un endommagement plus faible de l'empilement QId par rapport aux deux autres empilements, sur la face 1 du quart de plaque considéré expérimentalement, et de l'empilement OR, sur la face 2 (Figure 6.16). Les plis non endommagés correspondent à ceux pour lesquels la direction des fibres est parallèle à l'axe de la coupe. Effectivement, les micrographies n'indiquent pas de fissuration dans ses plis, quel que soit l'empilement. Le modèle OPFM semble tenir compte de cette absence de fissuration. En encastrement comme en appui simple linéique, le modèle d'impact complet semble donc capable de prévoir qualitativement les endommagements matriciels issus d'un impact

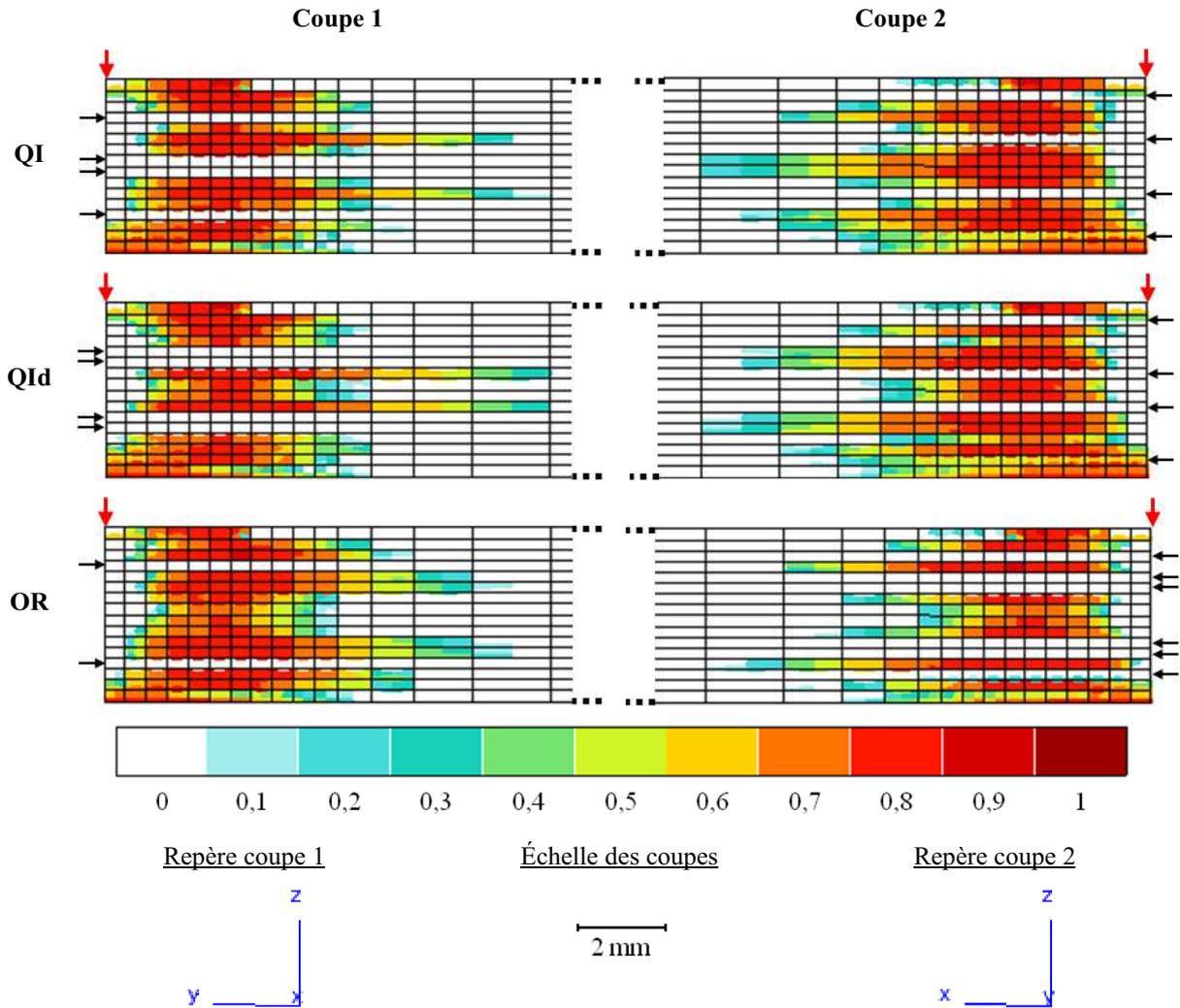


Figure 6.16. Endommagements matriciels, d_{2_bis} prévus par le modèle d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) pour des impacts à 10 Joules sur les trois empilements encastrés. Les flèches rouges indiquent le point d'impact et les flèches noires indiquent les plis dont les fibres sont orientées dans la direction du plan de coupe.

Les résultats des simulations d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) et d'impact simplifié (sans contact et avec zones cohésives) sont confrontés aux coupes micrographiques de l'empilement QI encastré et impacté à 10 Joules (Figure 6.17). Comme dans le cas de l'appui simple linéique, la sollicitation imposée dans la modélisation d'impact simplifiée s'avère trop sévère, vis-à-vis des endommagements matriciels. Tous les plis sont endommagés, dans l'épaisseur, y compris les plis dont les fibres sont parallèles au plan de coupe. Les endommagements prévus ne sont donc pas réalistes, dans cette configuration. Ce sur-endommagement ne semble pas lié aux délaminages, concentrés dans les parties inférieure (coupes 1 et 2) et médiane (coupe 1) du stratifié (Figure 6.25), et semble expliquer les saturations observées dans la réponse globale en force (Figure 6.9). Le modèle d'impact simplifié permet néanmoins de mettre en évidence, encore une fois, l'importance de la gestion du contact dans la modélisation de l'impact, à la fois pour la prévision de la réponse globale, mais aussi pour la prévision des endommagements induits. Cela sous-entend que la modélisation idéale de l'impact, avec contact, zones cohésives et comportement adoucissant du pli, atteint les limites des algorithmes implicites, du fait du trop grand nombre de non-linéarités du problème.

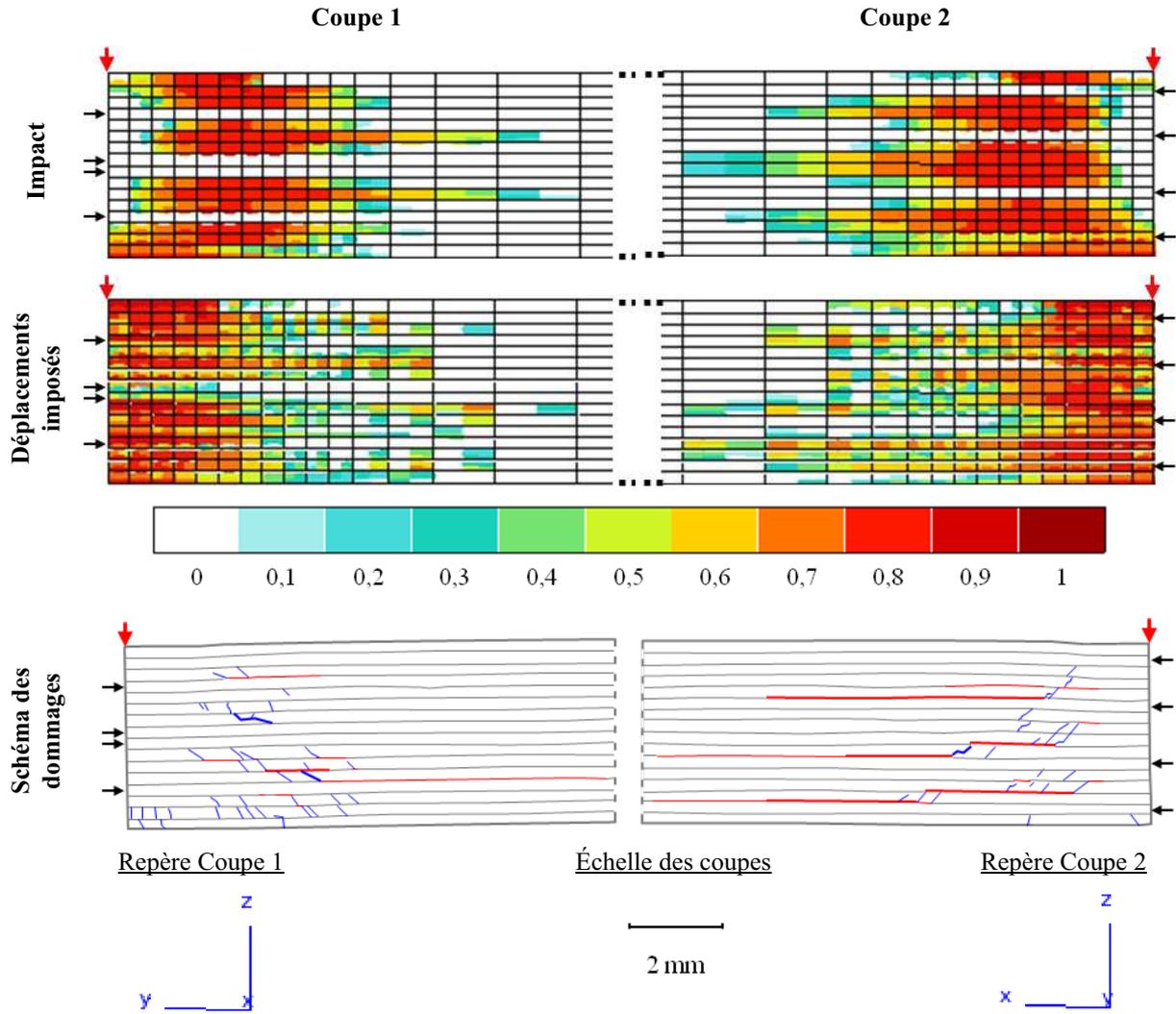


Figure 6.17. Endommagements matriciels, d_{2_bis} , prévus par le modèle OPFM avec le modèle numérique d'impact complet et sans zones cohésives (Impact) et avec le modèle d'impact simplifié (sans contact) et le modèle bilinéaire de zones cohésives (Déplacements imposés), pour l'impact à 10 Joules sur empilement QI encasté. Les schémas des dommages représentent les fissurations matricielles (en bleu) et les délaminages (en rouge) observés sur les micrographies des coupes correspondantes. Les flèches rouges indiquent le point d'impact et les flèches noires indiquent les plis dont les fibres sont orientées dans la direction du plan de coupe.

Comme dans le cas de l'appui simple linéique, seule la simulation d'impact complet, avec prise en compte du contact et sans zones cohésives, donne donc des endommagements matriciels réalistes, avec une absence de fissures dans les plis dont les fibres sont parallèles au plan de coupe. Quelle que soit la modélisation, complète ou simplifiée, les simulations prévoient un endommagement des deux plis les plus proches de la surface impactée, qui n'est pas visible sur les coupes micrographiques. Ceci est sans doute lié, encore une fois, à la non prise en compte de l'effet de la pression hydrostatique. Mis à part ces plis, les plis endommagés dans la simulation d'impact complet présentent une fissuration matricielle sur la micrographie. La répartition de cet endommagement prévu semble respecter celle observée, avec de l'endommagement matriciel dans l'axe d'impact, pour les plis opposés à l'impact. Du point de vue de la densité de fissures, c'est-à-dire du nombre d'éléments où d_{2_bis} est supérieur à 0,9 par pli, le quatrième pli en partant de la face non impactée du stratifié, sur la coupe 2, est effectivement parmi les plus endommagés, dans la simulation, avec cinq éléments qui peuvent être considérés comme rompus. Les densités des autres plis sont plus discutables, si la règle de la valeur 0,9 est strictement respectée. Cependant, les prévisions de

l'endommagement matriciel semblent globalement satisfaire aux observations réalisées expérimentalement, compte tenu de la variabilité du matériau en termes d'endommagements.

6.3.3. Prévision de l'endommagement matriciel du T700GC/M21 suite à un impact selon les conditions aux limites

Les endommagements matriciels prévus par le modèle OPFM avec le modèle d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) sont comparés aux micrographies, selon les conditions aux limites imposées à la cible (Figure 6.18). Numériquement comme expérimentalement, les endommagements matriciels sont plus importants en encastrement qu'en appui simple linéique. Il y a en effet plus d'éléments rompus ou plus de fissures en encastrement, quel que soit le pli considéré. La plaque encadrée ne pouvant se déformer autant que la plaque simplement appuyée, il y a moins d'énergie élastique disponible et une plus grande part de l'énergie d'impact est alors absorbée sous forme d'endommagement. Le modèle OPFM reproduit donc bien cette sensibilité aux conditions aux limites.

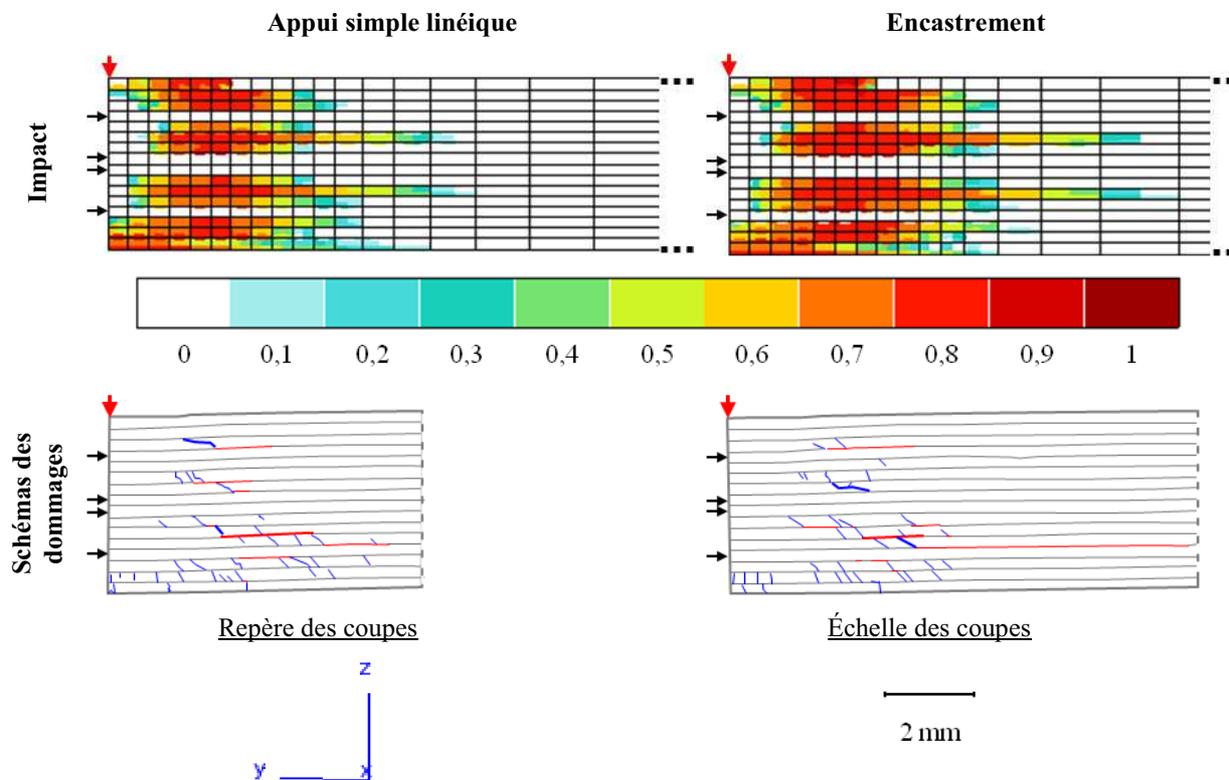


Figure 6.18. Endommagements matriciels, d_{2_bis} , prévus par le modèle OPFM en impact complet sur plaque quasi-isotrope encadrée ou simplement appuyée et schémas des dommages (fissuration matricielle en bleu et délaminages en rouge) observés sur les coupes 1 associés. Les flèches rouges indiquent le point d'impact et les flèches noires indiquent les plis dont les fibres sont orientées dans la direction du plan de coupe.

Les endommagements matriciels prévus ont été confrontés aux résultats expérimentaux. Le modèle OPFM semble prévoir qualitativement les endommagements matriciels, quel que soit l'empilement ou les conditions aux limites. En revanche, quantitativement, ce modèle a tendance à trop endommager les plis supérieurs. La non prise en compte de l'effet de la pression hydrostatique est sans doute, une fois de plus. Mise à part cette amélioration à apporter au modèle OPFM, il semble capable de prévoir correctement les endommagements matriciels dans des configurations très éloignées.

Afin de parfaire l'analyse des capacités des modèles d'impact complet et simplifié à prévoir les dommages d'impact, il reste à confronter, dans le prochain paragraphe, les délaminages prévus par les simulations à ceux observés expérimentalement.

6.4. Capacité du modèle OPFM et du modèle bilinéaire de zones cohésives à prévoir les délaminages

Le modèle OPFM écrit pour les chargements tridimensionnels permet de prévoir un effet de l'endommagement hors-plan sur le comportement du pli. La variable d'effet de l'endommagement hors-plan est alors calculée aux points de Gauss de l'élément. Cette modélisation évite l'usage de modèles de zones cohésives coûteux pour introduire explicitement la fissure mais rend difficile l'interprétation des résultats. En effet, il est difficile d'attribuer l'endommagement prévu à un point de Gauss à l'interface située au-dessus de l'élément considéré ou à celle située en-dessous. D'autre part, la cinétique d'endommagement hors-plan du modèle OPFM est actuellement à perfectionner. Des travaux sont menés au sein du département Matériaux et Structures Composites de l'Onera pour corréliser cette cinétique aux ténacités des interfaces en modes d'ouverture et de cisaillement. Dans cette partie, les endommagements hors-plan du modèle OPFM associé au modèle numérique d'impact complet seront donc exploités pour estimer la capacité de ce modèle à prévoir qualitativement les délaminages. Les aires délaminées projetées pour l'impact complet, sans zones cohésives et avec le modèle OPFM tridimensionnel, sont estimées par traitement d'image, à la manière des aires délaminées projetées expérimentales, estimées à partir des D-scans des éprouvettes impactées (chapitre 4, paragraphe 4.1.2).

6.4.1. Appui simple linéique

En appui simple linéique, dans le cas d'impacts complets (avec contact et sans zones cohésives) à 10 Joules sur les trois empilements, les aires délaminées projetées prévues par simulation sont proches (Figure 6.19 en bas), l'empilement OR semblant s'être légèrement plus endommagé que les deux autres empilements (Figure 6.19 en haut). Ce constat a également été fait expérimentalement, pour les empilements QI et OR simplement appuyés et impactés à 10 Joules. En revanche, la forme des délaminages obtenus est la même dans les deux rangées de points de Gauss d'un même pli et ne permet donc pas de distinguer l'interface représentée par ces points.

L'orientation des délaminages semble correspondre à celle des fibres du pli où ils sont calculés, ce qui laisserait supposer que les endommagements hors-plan calculés dans un pli correspondent aux délaminages de l'interface située au-dessus de ce pli. Les délaminages prendraient ainsi la direction des fibres du pli situé en-dessous de l'interface, comme cela est classiquement observé en impact et expliqué mécaniquement par Renault [Renault, 1994]. Cependant, les dommages hors-plan alors prévus dans le pli supérieur ne correspondent alors plus à une interface, ce qui ne permet pas de les attribuer au délaminage d'une interface particulière. Les critères d'endommagement hors-plan du modèle OPFM ne sont peut-être pas assez fins pour distinguer les effets des délaminages adjacents au pli. Une formulation non locale du critère d'endommagement hors plan, prenant en compte les effets d'un pli sur l'autre, permettrait sans doute d'améliorer la description des effets des délaminages.

Superposition des contours des aires délaménées projetées

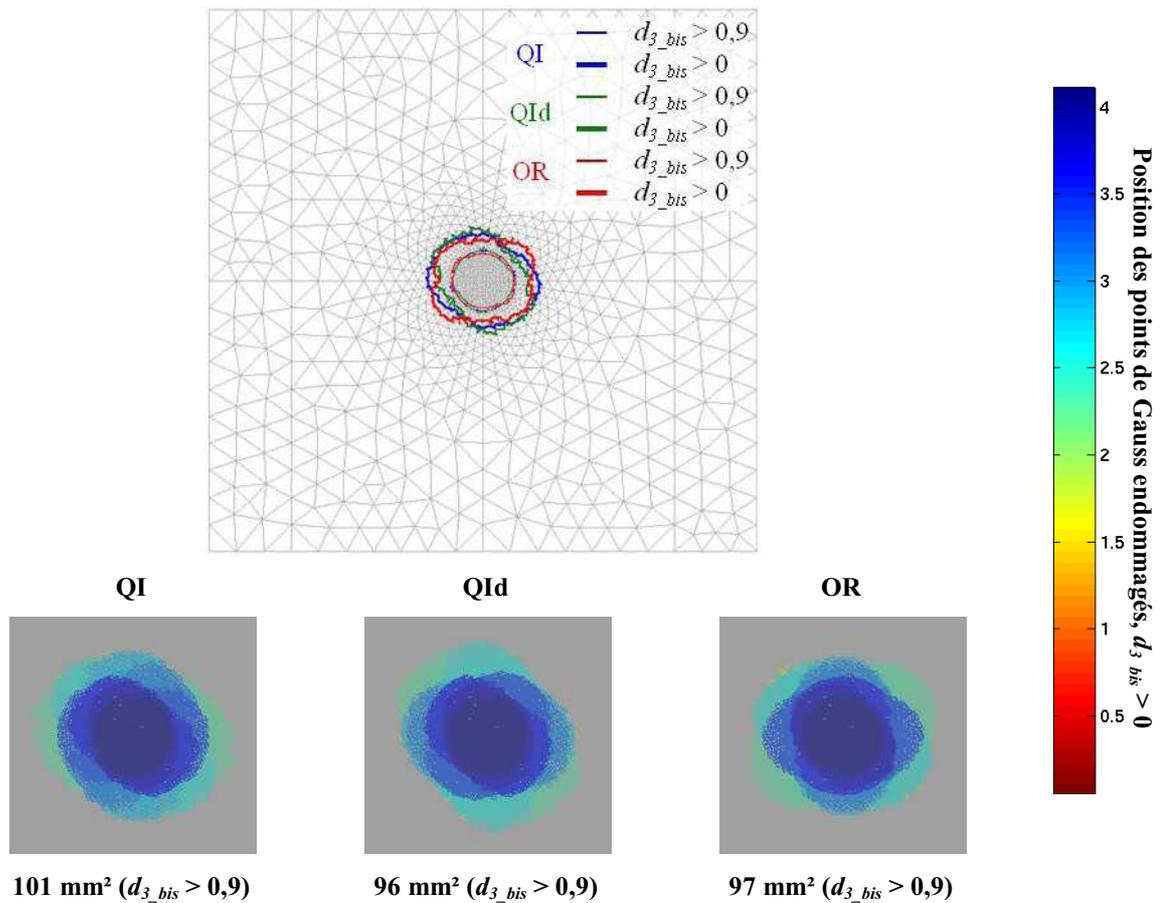
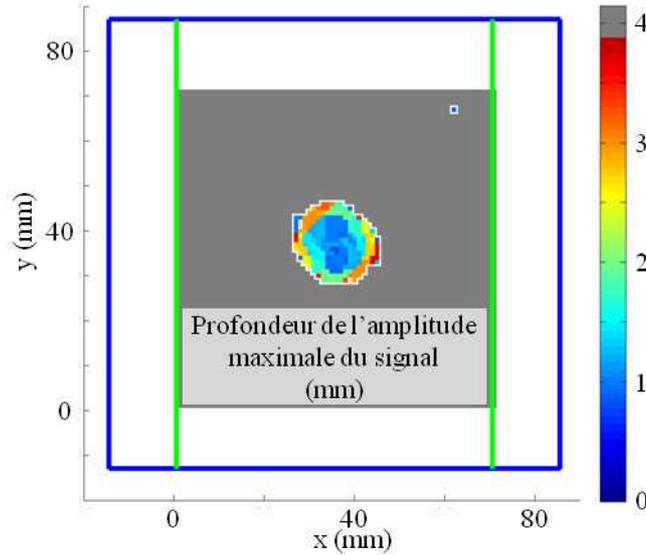


Figure 6.19. Aires délaménées projetées prévues par le modèle OPFM associé au modèle numérique d'impact complet, sans zones cohésives et avec contact, pour les trois empilements simplement appuyés et impactés à 10 Joules

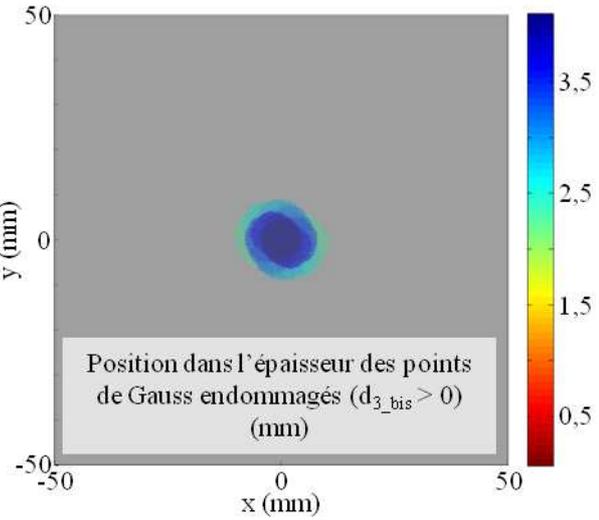
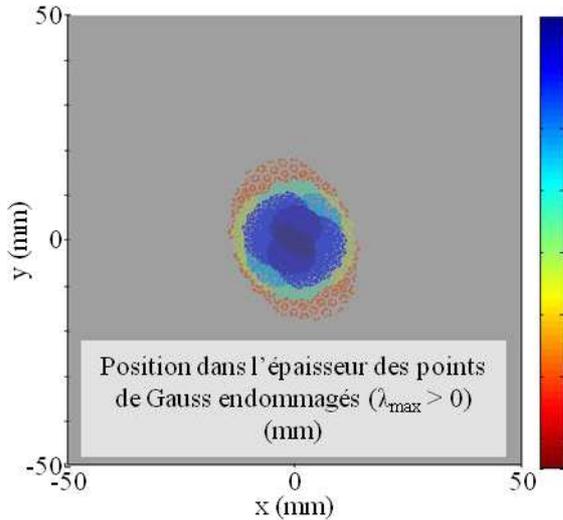
Les délaménages prévus par le modèle d'impact simplifié (sans contact et avec zones cohésives), utilisé pour un impact à 10 Joules, sont confrontés aux observations faites suite à l'essai d'impact à 10 Joules sur l'empilement QI simplement appuyé. La comparaison des aires délaménées indique que l'orientation des ellipses des délaménages, réparties dans l'épaisseur du stratifié, semblent avoir les bonnes orientations, par rapport aux essais (Figure 6.20). Cette observation indique que les zones cohésives sont capables de prendre naturellement en compte l'aspect non local du délaménage, qui semble manquer au comportement hors plan du modèle OPFM. En revanche, l'étendue des délaménages est trop grande, par rapport à celle observée sur la cartographie des profondeurs des défauts détectés par ultrasons. L'aire délaménée projetée est également beaucoup trop grande (+ 159 %), par rapport à l'aire expérimentale.



Aire délaminée projetée expérimentale : 251 mm²

Déplacements imposés (zones cohésives : λ_{max})

Impact (OPFM : d_{3_bis})



Aire délaminée projetée ($\lambda_{max} = 1$): 650 mm²

Aire délaminée projetée ($d_{3_bis} > 0,9$): 101 mm²

Figure 6.20. Aires délaminées expérimentale et numériques prévues par le modèle d'impact simplifié, avec zones cohésives et sans contact (déplacements imposés) et par le modèle d'impact complet, sans zones cohésives et avec contact (impact), pour l'empilement QI simplement appuyé et impacté à 10 Joules

Dans le chapitre 3, paragraphe 3.2.2, il a été montré que l'augmentation de la ténacité en mode II de l'interface permettait de diminuer les aires délaminées aux interfaces, en les renforçant. Or, l'identification des propriétés de l'interface en mode II montre une variabilité importante de ces propriétés [Prombut, 2007]. Le passage de cette ténacité à la valeur de 1600 J/m², identifiée par Prombut sur des interfaces 0°/45°, permettrait sans doute de diminuer partiellement l'aire délaminée projetée finale. D'autre part, dans ce même chapitre, au paragraphe 3.2.3, il a été montré que le couplage de l'endommagement matriciel de la loi OPFM tridimensionnelle avec les propriétés de l'interface avait le même effet sur l'aire délaminée projetée finale, pour la configuration d'encastrement. La prise en compte de ce couplage permettrait peut-être de réduire un peu plus l'aire délaminée projetée finale de l'empilement QI simplement appuyé et impacté à 10 Joules.

La simulation d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) a, quant à elle, donné une aire délaminée projetée plus raisonnable (plus faible de 60 %), bien que le modèle

OPFM ne soit pas encore correctement identifié pour la cinétique de dégradation hors-plan (Figure 6.20 en bas, à droite).

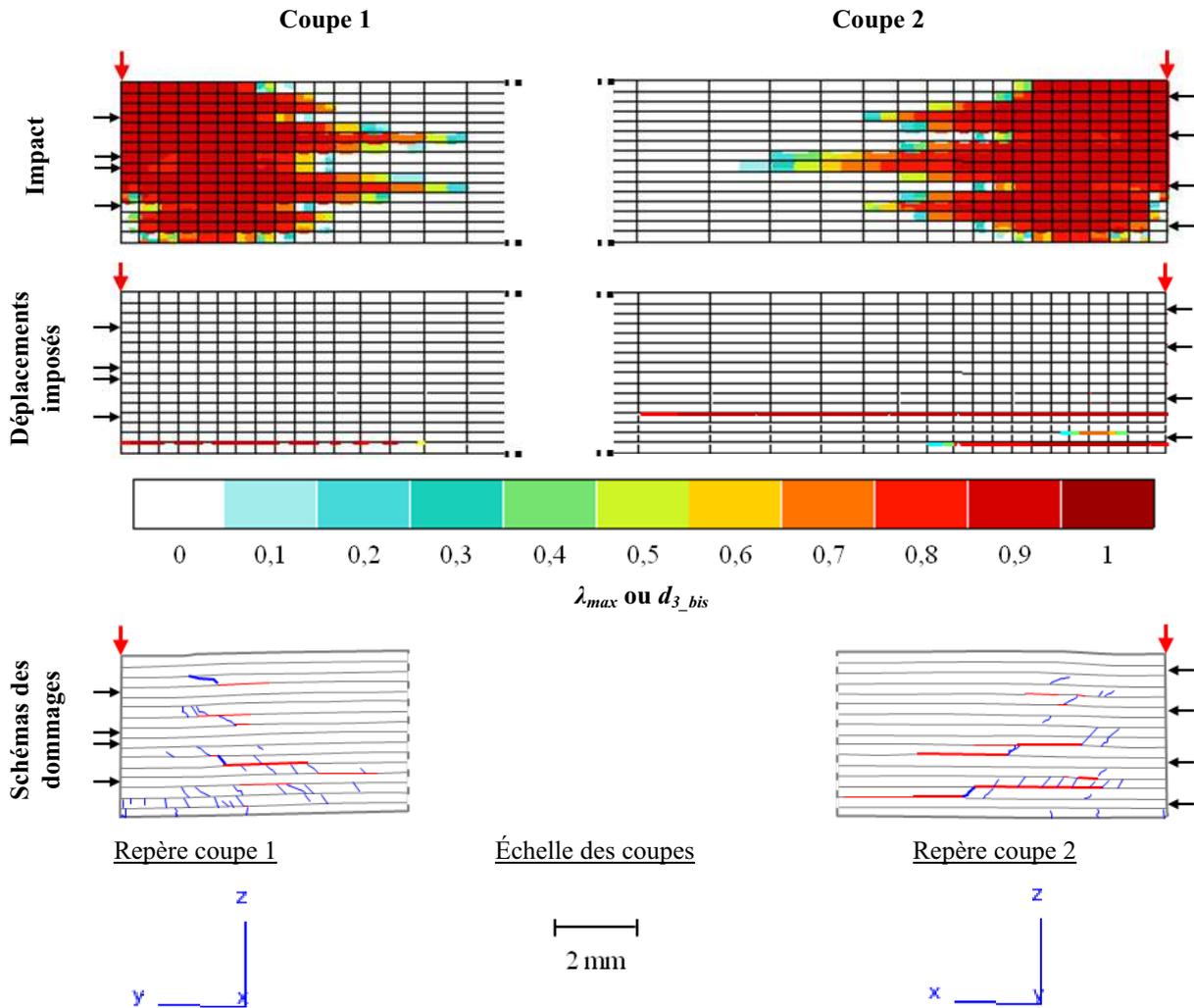


Figure 6.21. Délaminages prévus dans l'épaisseur avec le modèle d'impact complet, sans zones cohésives et avec contact (impact), et avec le modèle d'impact simplifié, avec zones cohésives et sans contact (déplacements imposés), par rapport aux dommages observés sur les coupes micrographiques de l'empilement QI simplement appuyé impacté à 10 Joules. Les flèches rouges indiquent le point d'impact et les flèches noires indiquent les plis dont les fibres sont orientées dans la direction du plan de coupe.

D'autre part, les délaminages prévus sur les coupes numériques correspondantes aux coupes micrographiques montrent qu'en appui simple linéique, ils sont mal prévus par le modèle d'impact simplifié (Figure 6.21). En effet, seules une ou deux interfaces, selon la face considérée, ont délaminé. De plus, ces délaminages sont trop étendus, sur la coupe 2. *A contrario*, le modèle OPFM associé au modèle complet prévoit des délaminages à tous les plis, ce qui semble trop sévère. Ceci est sans doute lié à l'identification imparfaite de la cinétique d'endommagement hors plan.

6.4.2. Encastrement

En encastrement, comme en appui simple linéique, les aires délaminiées projetées prévues par le modèle OPFM tridimensionnel pour les simulations d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) à 10 Joules sur les trois empilements sont proches (Figure 6.22). Cela semble correspondre à l'observation qui a été faite expérimentalement sur les empilements QI et OR encastrés et impactés à 10 Joules.

Superposition des contours des aires délaminiées projetées

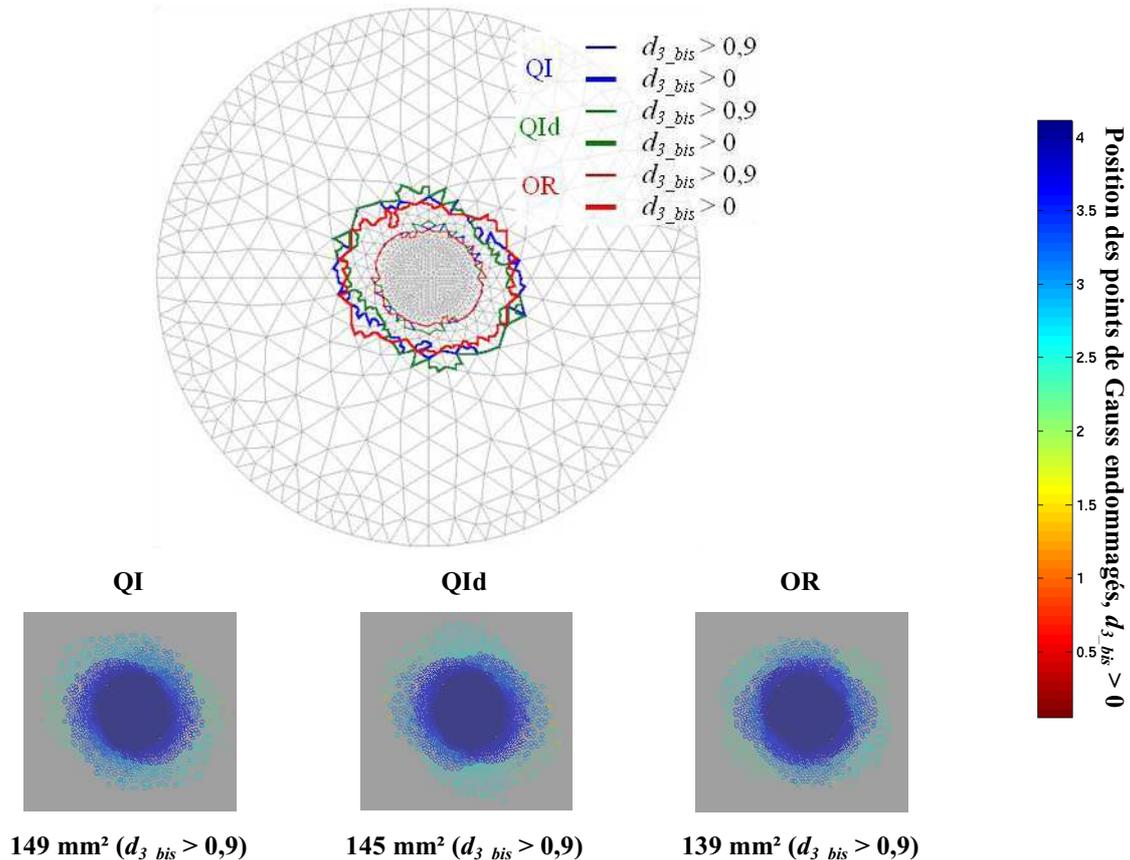


Figure 6.22. Aires délaminiées projetées prévues par le modèle OPFM associé au modèle numérique d'impact complet, avec contact, pour les trois empilements encastrés et impactés à 10 Joules

Comme en appui simple linéique, à l'exception des plis extérieurs, où les délaminages prévus sont circulaires, ceux-ci sont orientés dans la direction des fibres du pli où ils sont calculés et non dans la direction des fibres du pli situé sous l'interface. Cela semble confirmer le fait qu'il manque une information de type non local dans le modèle de comportement OPFM pour qu'il y ait influence de l'endommagement des plis adjacents sur l'endommagement du pli considéré et ainsi orienter les hélices de délaminage en fonction du pli situé sous l'interface que les points de Gauss sont sensés représenter. En encastrement, pour les trois empilements, des effets de bord sont observés (Figure 6.23) : de fines bandes de points de Gauss endommagés sont prévues à proximité des conditions d'encastrement, dans les plis supérieurs. Expérimentalement, aucun délaminage n'est observé à ces endroits. L'usage des modèles de zones cohésives, dans le cas du modèle d'impact simplifié (sans contact), n'a pas montré d'effets de bords, ce qui présente un avantage de ces modèles par rapport au comportement hors plan du modèle OPFM, sans doute trop sensible aux surcontraintes à proximité de l'encastrement.

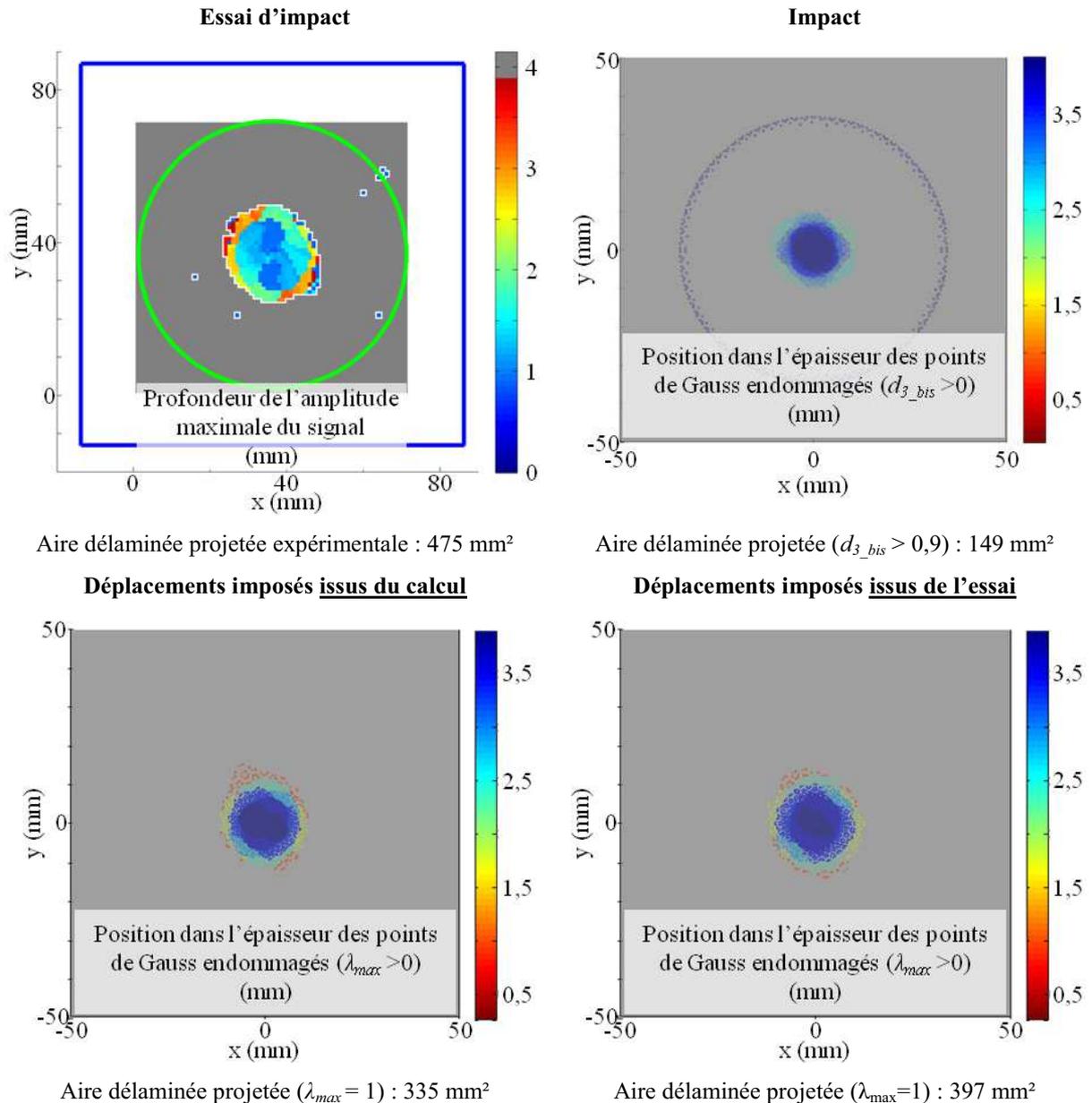


Figure 6.23. Aires délamainées expérimentale et numériques prévues par les modèles d'impact complet (impact), avec contact et sans zones cohésives, et simplifié (déplacements imposés), sans contact et avec zones cohésives, pour l'empilement QI encastré et impacté à 10 Joules

Les délamainages prévus par le modèle d'impact simplifié (sans contact et avec zones cohésives), utilisé pour un impact à 10 Joules, sont confrontés aux observations faites suite à l'essai d'impact à 10 Joules sur l'empilement QI encastré. Contrairement au cas de l'appui simple linéique, l'orientation des premières hélices de délamainage semble un peu moins bien prévue (Figure 6.23). D'autre part, l'aire délamainée projetée estimée par la simulation est inférieure de 29 % à son estimation expérimentale. Cette estimation semble néanmoins plus proche que dans le cas de l'appui simple. Ceci est sans doute lié au fait que les déplacements imposés sont moins importants en encastrement, donc moins sévères pour le délamainage des interfaces prévu par le modèle d'impact simplifié. Dans le cas de la simulation d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives), l'orientation des hélices de délamainages correspond à celle des fibres du pli où l'endommagement hors plan, d_3 , est calculé et non à celle des fibres du pli inférieur. Le caractère non local de la rupture hors plan semble donc manquer dans la formulation tridimensionnelle actuelle du modèle OPFM. L'étendue des

délaminages médians ne correspond pas non plus aux étendues détectées par scan ultrasonore et masque les délaminages inférieurs.

Le modèle d'encastrement ne reprend peut-être pas correctement les conditions aux limites imposées à la plaque réelle. Des calculs préliminaires élastiques linéaires pour différentes techniques d'encastrement numérique (encastrement des périmètres des faces impactées et non impactées – configuration retenue ; encastrement du bord du disque ; encastrement d'une partie des faces impactées et non impactées, pour une modélisation complète de la plaque - Figure 6.24) n'avaient pourtant pas conduit à des différences notables en termes de réponse globale et de champ de contrainte. D'autre part, l'aspect non local sans doute à l'origine des délaminages n'est pas pris en compte dans le modèle OPFM, comme supposé suite aux confrontations essai / calculs sur le cas de l'empilement QI simplement appuyé, ce qui pourrait expliquer la mauvaise orientation des hélices de délaminage.

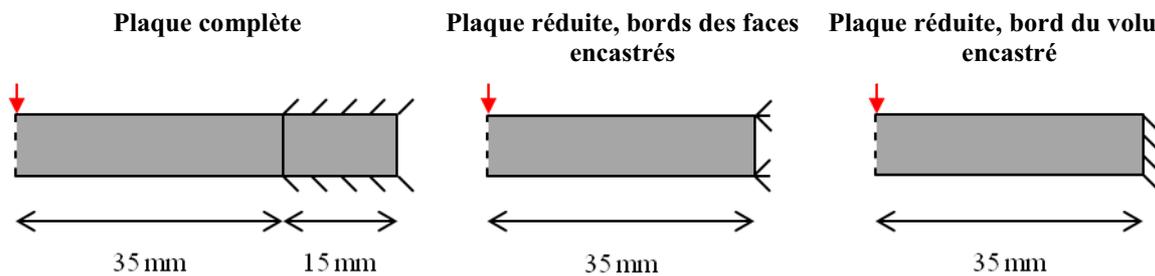


Figure 6.24. Méthodes numériques d'encastrement testées

Afin de tenter de s'approcher des aires délaminées projetées expérimentales, un calcul supplémentaire à déplacements imposés issus de l'essai d'impact à 10 Joules sur l'empilement QI encastres a été réalisé. Le fait d'imposer les déplacements de l'impacteur, calculés pendant l'essai à partir de la mesure de la force, entraîne une légère augmentation des délaminages prévus par les simulations. L'écart par rapport à l'aire mesurée expérimentalement est alors de 16 %, contre 29 % en appliquant les déplacements issus du calcul d'impact élastique linéaire. Le modèle d'impact simplifié, en encastrement, s'avère un peu plus satisfaisant pour la prévision des aires délaminées projetées, contrairement aux autres types d'endommagements. Ce constat présente donc un avantage de la modélisation des délaminages par zones cohésives, par rapport à une modélisation continue qui implique des formulations non locales plus complexes.

La localisation des interfaces délaminées dans l'épaisseur n'est cependant pas satisfaisante (Figure 6.25). Le modèle d'impact simplifié ne prévoit pas les délaminages aux bons endroits dans l'épaisseur, comparativement aux micrographies, tandis que le modèle d'impact complet en prévoit partout, sans doute à cause de l'identification imparfaite de la cinétique d'endommagement hors-plan du modèle OPFM. Les déplacements issus de l'essai ne font qu'étendre la process zone des interfaces, sans doute parce qu'ils ont une amplitude plus grande que celle des déplacements issus du calcul d'impact élastique. La mauvaise localisation des interfaces endommagées dans l'épaisseur semble donc liée au chargement imposé par le modèle d'impact simplifié.

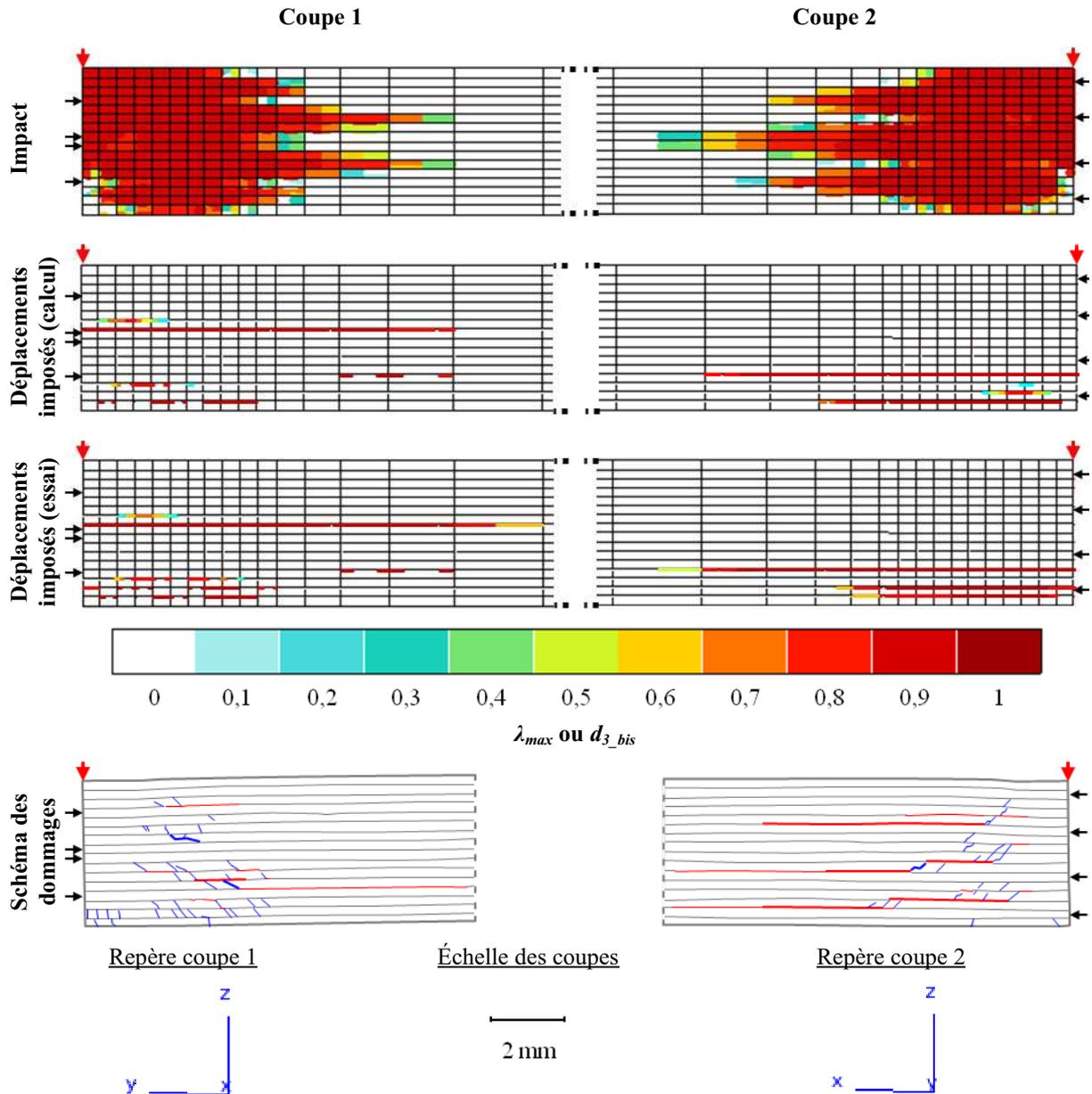


Figure 6.25. Délaminages prévus dans l'épaisseur par le modèle d'impact complet (sans zones cohésives et avec contact – impact) et par le modèle d'impact simplifié (avec zones cohésives et sans contact) dans l'épaisseur du stratifié quasi-isotrope encastré et impacté à 10 Joules selon la nature des déplacements imposés : issus du calcul d'impact élastique linéaire (calcul) ou des données expérimentales (essai). Les schémas des dommages observés dans les coupes micrographiques réalisées sur l'empilement QI encastré impacté à 10 Joules permettent de comparer les résultats numériques à l'expérience. Les flèches rouges indiquent le point d'impact et les flèches noires indiquent les plis dont les fibres sont orientées dans la direction du plan de coupe.

6.4.3. Prédiction des délaminages induits par un impact pour le T700GC/M21 selon les conditions aux limites

Le modèle d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) montre une aire délaminée projetée plus grande de 47 % en encastrement qu'en appui simple linéique (Figure 6.26), comme cela est observé expérimentalement (475 mm² mesurés sur la plaque QI encadrée contre 251 mm² mesurés sur la plaque QI simplement appuyée, à 10 Joules). En revanche, le modèle d'impact simplifié (sans contact mais avec zones cohésives) ne permet pas de retrouver cette tendance, puisque l'aire délaminée projetée obtenue en appui simple linéique est supérieure de 94 % à celle obtenue en encastrement. Cela est sans doute lié au fait que les déplacements imposés en appui simple linéique ont une amplitude plus grande qu'en encastrement, ce qui induit des contraintes de cisaillement plus importantes au sein du stratifié.

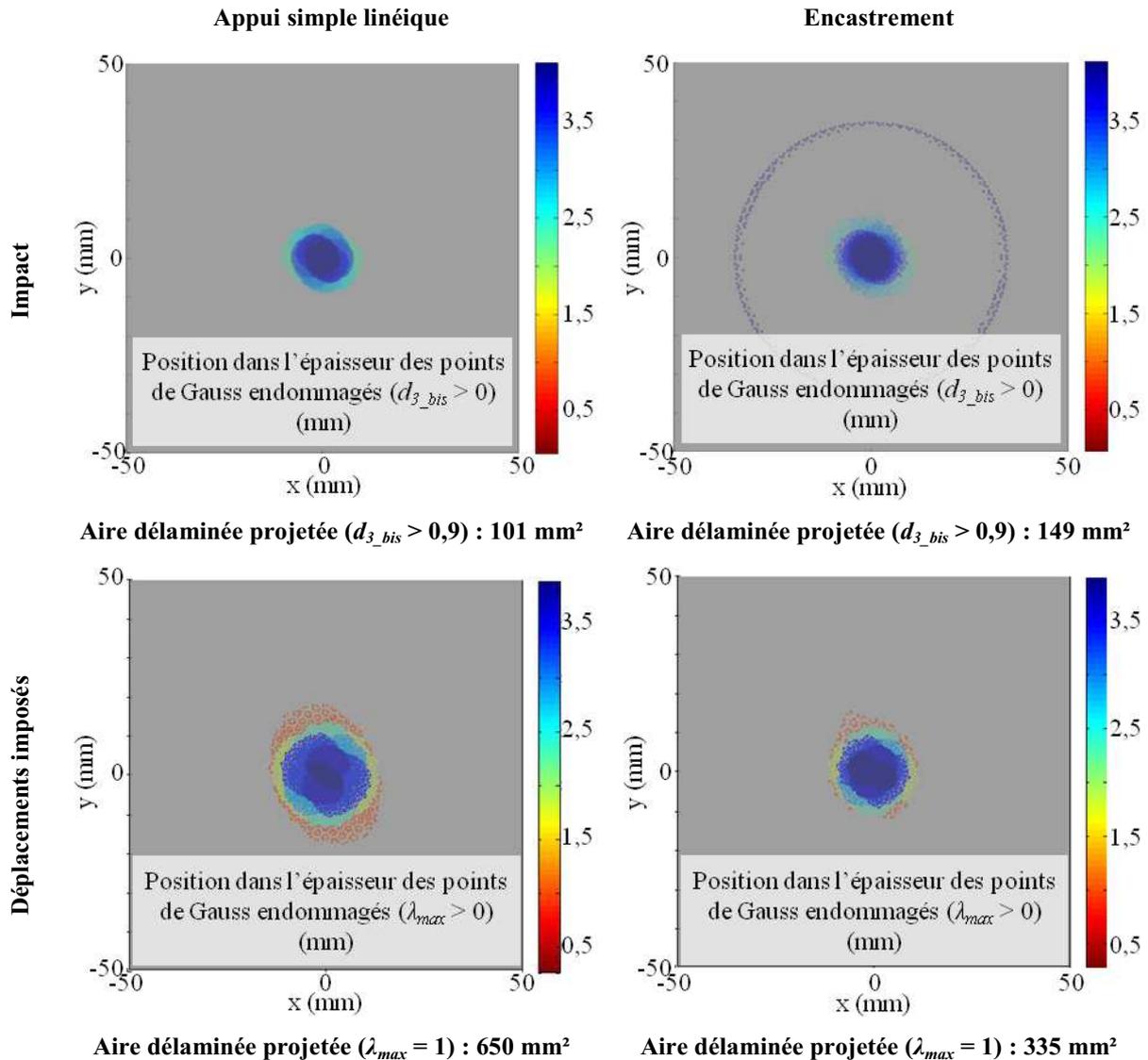


Figure 6.26. Aires délaminées prévues en appui simple et en encastrement par le modèle d'impact complet, avec contact, associé au modèle OPFM et par le modèle d'impact simplifié, sans contact, associé au modèle OPFM et au modèle bilinéaire de zones cohésives

Sur les coupes, le modèle d'impact complet montre des délaminages moins étendus en appui simple qu'en encastrement, comme c'est le cas expérimentalement (Figure 6.27). En revanche, pour la face 2, le modèle d'impact simplifié prévoit des délaminages plus étendus

en appui simple qu'en encastrement, ce qui ne correspond pas aux observations. Le modèle d'impact simplifié ne permet pas de prévoir la sensibilité aux conditions aux limites pour le délaminage du T700GC/M21.

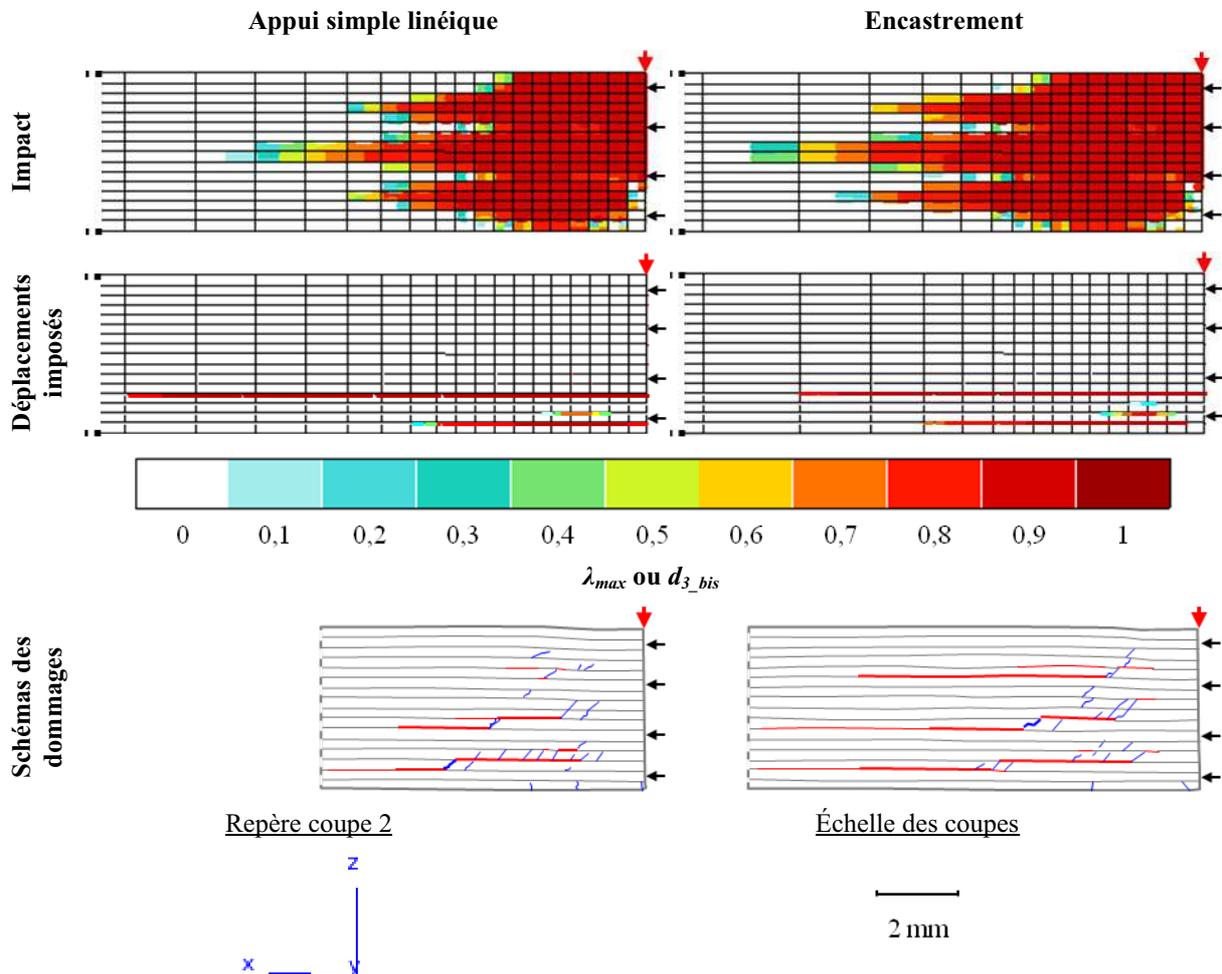


Figure 6.27. Délaminages prévus sur la coupe 2, en appui simple et en encastrement, dans l'épaisseur du stratifié quasi-isotrope impacté à 10 Joules, selon la modélisation

6.5. Conclusion

L'analyse des réponses globales montre que le modèle OPFM dans sa formulation tridimensionnelle permet de prévoir correctement le comportement des plaques stratifiées en T700GC/M21 à l'impact, en termes de sensibilité à l'énergie et à la vitesse d'impact incidente, aux conditions aux limites et à la séquence d'empilement. Il est cependant à noter qu'il ne permet pas de capter le seuil d'endommagement, c'est-à-dire la première propagation brutale des délaminages. Il n'endommage pas assez, par rapport au comportement expérimental, et ne dissipe pas suffisamment d'énergie. L'absence d'adoucissement dans l'implémentation actuelle du modèle pourrait être la cause de cet endommagement insuffisant pour la réponse globale et d'une partie manquante de l'absorption de l'énergie, notamment en hors plan. Le modèle d'impact simplifié montre en effet que l'introduction de lois cohésives adoucissantes permet une absorption supplémentaire d'énergie. Quant à l'énergie dissipée, il semble manquer un autre mécanisme majeur dans le modèle matériau, qui pourrait être la prise en compte de la viscoplasticité de la matrice.

Pour intégrer les modèles de zones cohésives, qui semblent pertinents pour la simulation des délaminages induits par un impact et pour éviter les problèmes de convergence liés au solveur global, un modèle d'impact simplifié, sans contact, a été proposé. Cette simplification permet de se concentrer sur l'objectif de ce chapitre, à savoir identifier les éléments nécessaires pour une bonne description des dommages d'impact. Dans ce cas, le modèle d'impact simplifié permet d'évaluer les capacités des modèles de zones cohésives pour la représentation des délaminages. Le remplacement du contact par des déplacements imposés n'autorise cependant pas une adaptation du chargement à l'état d'endommagement de la plaque. Il faudrait disposer dans *Z-set* d'une méthode de gestion du contact moins chronophage. Malgré ces difficultés, la représentation des interfaces par le modèle bilinéaire de zones cohésives permet de capturer un seuil d'endommagement, ce que le modèle OPFM ne permet pas actuellement. Cette observation semble indiquer que la description du caractère adoucissant de l'endommagement hors plan permettrait peut-être de capturer ce seuil avec OPFM.

L'analyse des ruptures de fibres prévus par le modèle OPFM, associé ou non aux zones cohésives, avec les coupes micrographiques présentées au chapitre 4 montre que le modèle OPFM prévoit des ruptures de fibres sous l'impacteur, alors qu'aucune rupture de fibres n'est observée sur les coupes micrographiques. Cette sévérité du modèle vis-à-vis de l'impact semble liée à la non prise en compte de l'effet de la pression hydrostatique sous l'impacteur. En effet, la matrice est sensible à cette pression et son comportement est modifié sous l'effet d'un tel chargement. En étant ainsi comprimée et en ne s'endommageant pas, la matrice vient retarder l'endommagement par kinking des fibres en compression. Le critère de rupture des fibres en compression, tout comme le critère de rupture de la matrice en compression, ne tiennent pas compte, pour le moment, de cet effet indirect de la pression hydrostatique sur l'endommagement des fibres. Il s'agit là d'une piste d'amélioration du modèle.

Mis à part ce point, concernant les endommagements matriciels, la sensibilité à la séquence d'empilement et aux conditions aux limites du T700GC/M21 sont correctement prévues par le modèle OPFM, en impact complet. Ce modèle donne une prévision correcte de la fissuration matricielle, avec les bonnes localisations de l'endommagement.

Enfin, du point de vue des aires délaminées projetées prévues, la sensibilité du T700GC/M21 à la séquence de l'empilement impacté semble bien reproduite pour les deux types de modèles d'impact. Les délaminages prévus dans l'épaisseur par le modèle OPFM associé au modèle d'impact complet (avec contact et sans zones cohésives) sont trop importants, par rapport aux délaminages observés. Cela est sans doute lié à l'identification de la cinétique d'endommagement hors plan, qui est à améliorer. Des travaux sont en cours au sein du Département Matériaux et Structures Composites de l'Onera pour assimiler cette cinétique aux ténacités des modes d'ouverture et de cisaillement des interfaces. L'absence d'information non locale pour caractériser l'influence de l'endommagement des plis adjacents sur le pli considéré pourrait également améliorer les performances du modèle OPFM, notamment concernant l'orientation des hélices de délaminages prévue via la variable d'effet de l'endommagement hors-plan du modèle OPFM. Les modèles de zones cohésives semblent cependant mieux représenter les délaminages. Elles prennent naturellement mieux en compte les effets de l'orientation des plis adjacents, ce qui permet de prévoir des hélices de délaminage plus réalistes. Elles semblent également mieux décrire la cinétique de l'endommagement, notamment la propagation rapide des délaminages responsable du seuil d'endommagement significatif.

Pour conclure, ce chapitre met en évidence les éléments essentiels à intégrer dans la modélisation pour une simulation correcte de l'impact, et donc des pistes d'amélioration à

apporter au code de calcul par éléments finis *Z-set* et aux modèles de comportement matériau. La gestion du contact est essentielle pour avoir une description correcte du chargement, et donc prévoir des endommagements réalistes. La méthode de contact proposée dans *Z-set* est actuellement un frein à la modélisation de l'impact. De plus, les limites des codes implicites semblent être atteintes. Ceux-ci ont en effet du mal à donner une solution lorsque les problèmes deviennent trop peu réguliers, comme expliqué au chapitre 2, paragraphe 2.3.1. Du point de vue de la description du comportement endommageable du stratifié, les critères de rupture doivent prendre en compte toutes les composantes du tenseur des contraintes et ne peuvent pas être réduits aux seules contraintes planes. Le caractère adoucissant et la viscoplasticité de la matrice semblent eux aussi être incontournables pour prévoir une absorption suffisante de l'énergie d'impact. La représentation des interfaces par des modèles de zones cohésives, malgré les difficultés numériques qu'elle soulève, paraît être la manière la plus simple de prévoir les délaminages. En effet, ces modèles permettent de prendre naturellement en compte les effets de l'orientation des plis sur celle des hélices de délaminage et semblent pouvoir prévoir des étendues cohérentes des délaminages, grâce à leur corrélation plus directe aux propriétés des interfaces.