

Acquisition d'une base de données expérimentales pour comparaison avec les résultats numériques

Les travaux présentés dans les chapitres précédents ont permis de mettre en place un outil permettant d'estimer les dommages d'impact de manière simplifiée. Pour évaluer les capacités de cet outil à prévoir ces dommages, il est nécessaire de disposer de données expérimentales pour le matériau retenu, le T700GC/M21, constitué de fibres de carbone et d'une matrice époxy de troisième génération, qui comporte notamment des nodules thermoplastiques. Ces données expérimentales, obtenues sur les deux dispositifs expérimentaux développés dans ce projet et décrits au chapitre 3, pourront alors être confrontées aux résultats obtenus par la méthode des éléments finis. Pour cela, des essais d'impact sont réalisés sur des plaques composites stratifiées, avec différents empilements. Pour les faibles énergies d'impact, des études précédentes [Kaczmarek, 1994] [Sutherland, 2012] ont montré une similitude entre les endommagements obtenus par impact basse vitesse et ceux obtenus par indentation. D'autre part, on souhaite élargir la gamme de chargement vers le quasi-statique, pour lequel le modèle d'endommagement du composite stratifié a été développé et validé. C'est pourquoi des essais d'indentation sont réalisés dans des conditions les plus proches possible des essais d'impact. Ce type d'essai permet, en outre, d'avoir une instrumentation plus riche, notamment le suivi de l'endommagement par émission acoustique. L'ensemble de cette base de données riche est ensuite analysé.

4.1. Définition des essais d'impact réalisés

4.1.1. Choix des empilements et fabrication des éprouvettes

L'étude bibliographique sur les paramètres d'impact a mis en évidence une influence de la séquence d'empilement sur les dommages d'impact obtenus [Liu, 1988] [Lopes, 2009a] [González, 2011]. C'est pourquoi il a été décidé de choisir trois empilements différents, à tester en impact et en indentation. Le premier empilement retenu est un empilement quasi-isotrope (QI) standard de séquence $[(45^\circ/90^\circ/-45^\circ/0^\circ)_2]_s$. Cet empilement respecte les règles classiques de stratification. Il est suffisamment fin pour avoir un modèle numérique de taille raisonnable et suffisamment épais pour être représentatif des pièces composites utilisées en aéronautique. Le second empilement dérive de l'empilement quasi-isotrope standard. Il a été choisi afin d'avoir plus d'interfaces potentiellement délaminantes, où la variation d'orientation des fibres d'un pli à l'autre vaut 90° , et un module de flexion le plus proche possible de l'empilement précédent. Ces interfaces sont aussi éloignées les unes des autres que possible, afin d'éviter d'éventuels problèmes numériques liés à la proximité d'interfaces fortement délaminées. Ce second empilement est dit "quasi-isotrope délaminant" (QId) et a pour séquence $[45^\circ/90^\circ/-45^\circ/45^\circ/0^\circ/0^\circ/90^\circ/-45^\circ]_s$. Le dernier empilement choisi est représentatif d'un empilement utilisé dans l'industrie aéronautique. Il est dit "orienté" (OR)

car il possède plus de plis dans la direction 90° que dans la direction 0° . Sa séquence est $[45^\circ/-45^\circ/90^\circ/0^\circ/90^\circ/90^\circ/-45^\circ/45^\circ]_s$. Tous les empilements sont constitués de 16 plis de 0,26 mm d'épaisseur chacun, soit un stratifié d'environ 4,16 mm d'épaisseur au final. Les modules de ces empilements, estimés par la théorie classique des stratifiés, sont reportés dans le tableau 4.1. Les empilements possédant tous une symétrie miroir, il n'y a pas de couplage du comportement en membrane et du comportement en flexion ($B = 0$).

Empilement	Comportement de membrane			Comportement en flexion		
	A11 (N/mm)	A22 (N/mm)	A66 (N/mm)	D11 (N.mm)	D22 (N.mm)	D66 (N.mm)
QI	231899	292931	27752	985760	1980216	156014
QId	231899	292931	27752	969008	1992174	157101
OR	179183	338837	24910	982197	1983319	155822

Tableau 4.1. Modules des empilements choisis calculés par la théorie classique des stratifiés

Les éprouvettes de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ sont découpées dans des plaques de $300 \times 300 \text{ mm}^2$, drapées manuellement et réalisées sous presse au département DMSC de l'ONERA.

4.1.2. Protocole expérimental

La masse totale de l'impacteur a été de 6,36 kg pour tous les essais. La description d'essai d'impact et les mesures effectuées sont détaillées au chapitre 2. Quel que soit le montage, les éprouvettes sont placées de la même manière. Pour le montage d'appui simple linéique, cela signifie que la direction à 0° est parallèle aux directions des rouleaux du montage. Les autres orientations sont définies selon le sens horaire (Figure 4.1).

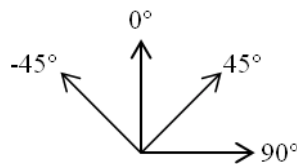


Figure 4.1. Définition des orientations des plis des stratifiés étudiés

A l'issue de chaque essai, la profondeur et la taille de l'empreinte résiduelle du spécimen impacté sont mesurées par corrélation d'images. Les spécimens sont ensuite scannés par ultrasons pour avoir une approximation de l'endommagement créé. Afin de réduire le temps de scan, seule la zone proche du centre de la plaque, où se situent la majorité des dommages, est expertisée. A l'issue du scan, le signal ultrasonore est traité pour en déduire quatre types d'information :

- Le A-scan correspond au signal brut enregistré par le récepteur en chaque point scanné ;
- Le B-scan correspond aux signaux bruts mesurés sur une ligne de la zone scannée ;
- Le C-scan correspond à la cartographie des maxima d'amplitude en chaque points de la zone scannée ;
- Le D-scan correspond à la cartographie des profondeurs où sont détectés les maxima d'amplitude.

Sur les cartographies des profondeurs où la première rupture d'impédance (présence d'un défaut) est rencontrée par les signaux ultrasonores incidents (D-scans) présentées dans ce mémoire, les limites de la plaque sont représentées par un cadre bleu. Lorsque le scan englobe

toute la plaque, ce cadre est blanc, pour éviter les conflits de couleurs. Les conditions aux limites imposées à la plaque sont représentées par un cercle vert figurant l'ouverture des cales de serrage, dans le cas du montage d'encastrement. Dans le cas du montage d'appui simple linéique, les rouleaux sont figurés par deux lignes vertes.

Certaines éprouvettes, majoritairement celles dont l'énergie maximale transmise à la plaque est proche de 20 J, sont ensuite découpées. Les chants internes de ces éprouvettes sont polis pour réaliser des observations plus fines des dommages par microscopie optique. Ces micrographies permettent notamment d'observer les fissures matricielles obtenues, difficilement détectables par scan ultrasonore. Une synthèse des mesures réalisées après un essai d'impact ou d'indentation est disponible sur la figure 4.2.

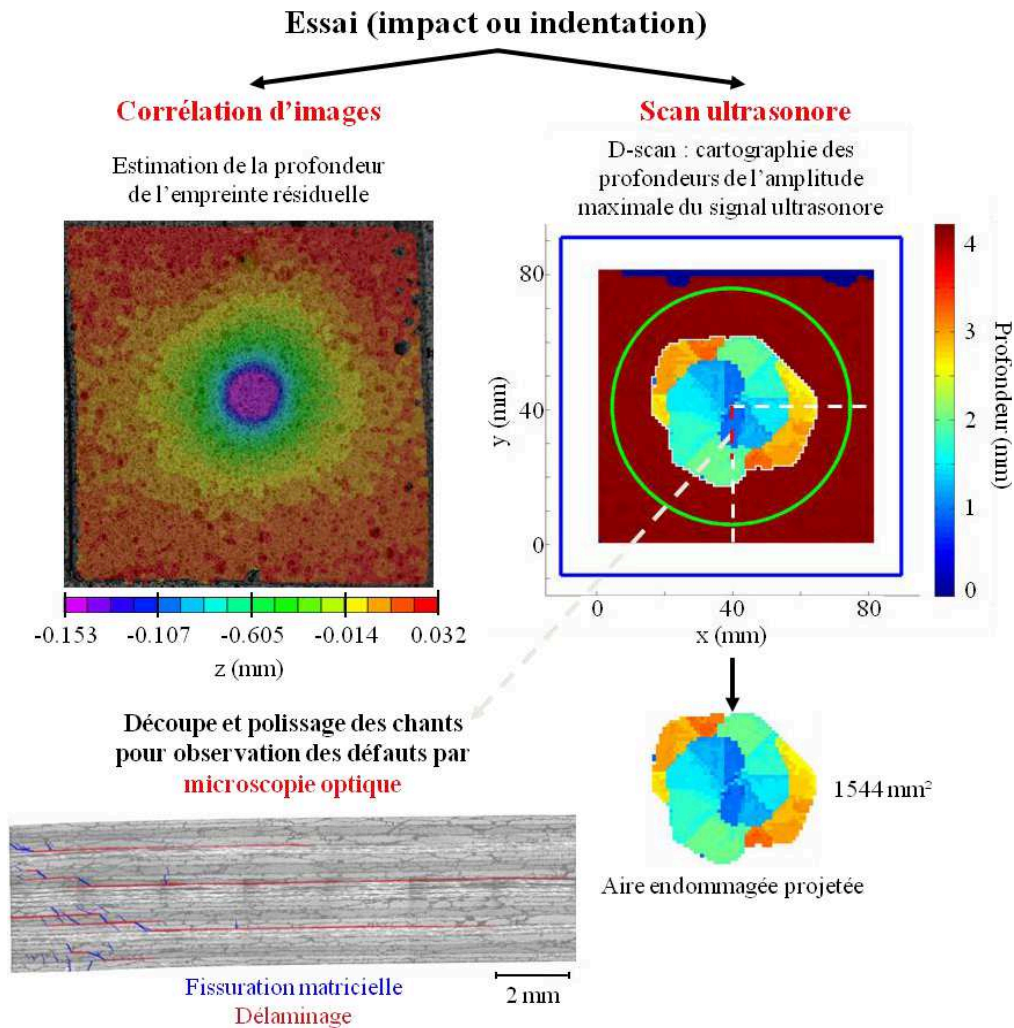


Figure 4.2. Mesures complémentaires réalisées après les essais d'impact ou d'indentation. L'observation par microscopie optique n'est effectuée que pour certaines éprouvettes. Le cas de l'éprouvette QI encastree impactée à 20 Joules est donné en exemple. La coupe micrographique correspond au pointillé rouge, sur le D-scan.

Les D-scans sont utilisées pour estimer les aires projetées des dommages par traitement d'images, à l'aide des logiciels Gimp et IrfanView. L'aire projetée du dommage correspond à l'aire endommagée directement visualisée sur le D-scan. En effet, l'essentiel du signal ultrasonore étant réfléchi au niveau d'un dommage, il n'est souvent plus assez énergétique pour permettre une détection correcte du dommage suivant, donc de l'ensemble des dommages dans l'épaisseur. Dans la littérature, certains auteurs [Bouvet, 2009] [Hautier, 2010] réalisent également un scan ultrasonore de la face non-impactée. Cependant, dans les cas étudiés ici, le délaminage le plus profond est trop étendu et masque les autres

délaminages. Le scan ultrasonore de la face non-impactée n'a donc pas été systématiquement réalisé. L'aire totale des dommages est donc difficile à déterminer, comparée à l'aire projetée, qui sert ici d'indicateur du niveau d'endommagement des stratifiés. Le logiciel Gimp permet de faire un étalonnage en estimant la taille en pixel du scan et donc d'associer une valeur d'aire en mm² par pixel. Les pixels pour lesquels aucun maximum d'amplitude du signal ultrasonore n'a été détecté ou dont la profondeur indique le fond de la plaque sont éliminés du scan pour ne garder que ceux représentant un dommage. Cette procédure n'est pas automatisée du fait que le dispositif de scan ne permet pas d'avoir un parallélisme parfait entre le plan médian du spécimen et la surface du capteur ultrasonore. Cela peut engendrer des étendues non négligeables de pixels légèrement au-dessus de la valeur de la profondeur de la plaque, qui doivent être sélectionnés et éliminés manuellement, au même titre que les pixels précédents. Sur les D-scans présentés dans ce mémoire, les zones considérées pour le calcul de l'aire projetée des dommages sont entourées d'un trait blanc. Une fois la zone endommagée isolée, l'image est transformée en niveaux de gris. Le logiciel IrfanView permet alors d'évaluer le nombre de pixels blancs de l'image résiduelle, via la fonction Histogram. Le nombre obtenu, soustrait au nombre total de pixels du scan, permet de remonter au nombre de pixels endommagés, et donc à l'aire endommagée projetée.

4.1.3. Choix des niveaux d'énergie d'impact

Un premier essai d'impact incrémental est réalisé afin de choisir de manière adéquate les énergies d'impact pour les essais d'impact unique. Lors d'un tel essai la cible est impactée plusieurs fois, les énergies d'impact étant progressivement augmentées, de 5 à 20 Joules pour le montage d'encastrement et de 5 à 28 Joules pour le montage d'appui simple linéique. Les industriels utilisent cet essai afin de déterminer l'énergie d'impact pour laquelle est atteinte la profondeur d'empreinte résiduelle minimale permettant la détection visuelle du défaut de surface. Cette profondeur d'empreinte résiduelle est couramment appelée Barely Visible Impact Damage (BVID).

Entre chaque impact de l'essai incrémental, la plaque est extraite de son montage pour mesurer la profondeur d'empreinte par corrélation d'images. Le spécimen impacté est ensuite scanné par ultrasons puis replacé dans le montage considéré pour l'impact suivant.

A l'issue de ces essais incrémentaux, les différentes profondeurs d'empreintes sont analysées afin de choisir, pour les essais d'impact unique, une énergie inférieure au BVID, une énergie équivalente au BVID et une énergie supérieure au BVID. A titre indicatif, le BVID est fixé par Airbus à une profondeur de 0,3 mm pour une inspection à durée illimitée et à une distance d'inspection de 50 cm et à 1,3 mm pour une inspection de 30 secondes par panneau et à une distance d'un mètre [Léon-Dufour, 2008]. Le tableau 4.2 récapitule l'ensemble des essais d'impacts incrémentaux réalisés.

Montage	Empilement	Énergie (J)	Force maximale (kN)
Encastrement	QI	5	5,8
		10	8,0
		15	10,8
		20	12,9
	QId	5	5,4
		10	7,8
		15	10,5
		20	12,0
	OR	5	5,3
		10	8,0
		15	10,2
		20	11,4
Appui simple linéique	QI	5	4,8
		10	6,0
		15	8,2
		20	9,8
		28	11,0
	QId	5	4,9
		10	5,9
		15	8,0
		20	9,7
		28	9,8
	OR	5	4,8
		10	5,9
15		6,2	
20		9,6	
28		10,7	

Tableau 4.2. Récapitulatif des essais d'impact incrémentaux réalisés

Pour le montage d'encastrement, les mesures de BVID qui font suite aux essais incrémentaux pour les trois empilements considérés sont reportées sur la figure 4.3. Quelle que soit la configuration, le BVID n'est pas atteint ou est à peine dépassé. En revanche, les dommages présents au sein de la plaque ne sont pas négligeables aux énergies les plus élevées (Figure 4.3). Les zones endommagées, visualisées par scan ultrasonore, servent donc à établir les énergies d'impact à appliquer aux essais suivants. Pour le montage d'encastrement, les énergies d'impact sont initialement fixées à 5, 10 et 20 Joules. Les dommages à 5 Joules sont en effet de taille raisonnable pour une détection par ultrasons et les dommages à 20 Joules semblent remplir complètement la zone de dommages potentielle, c'est-à-dire la zone libre de la plaque.

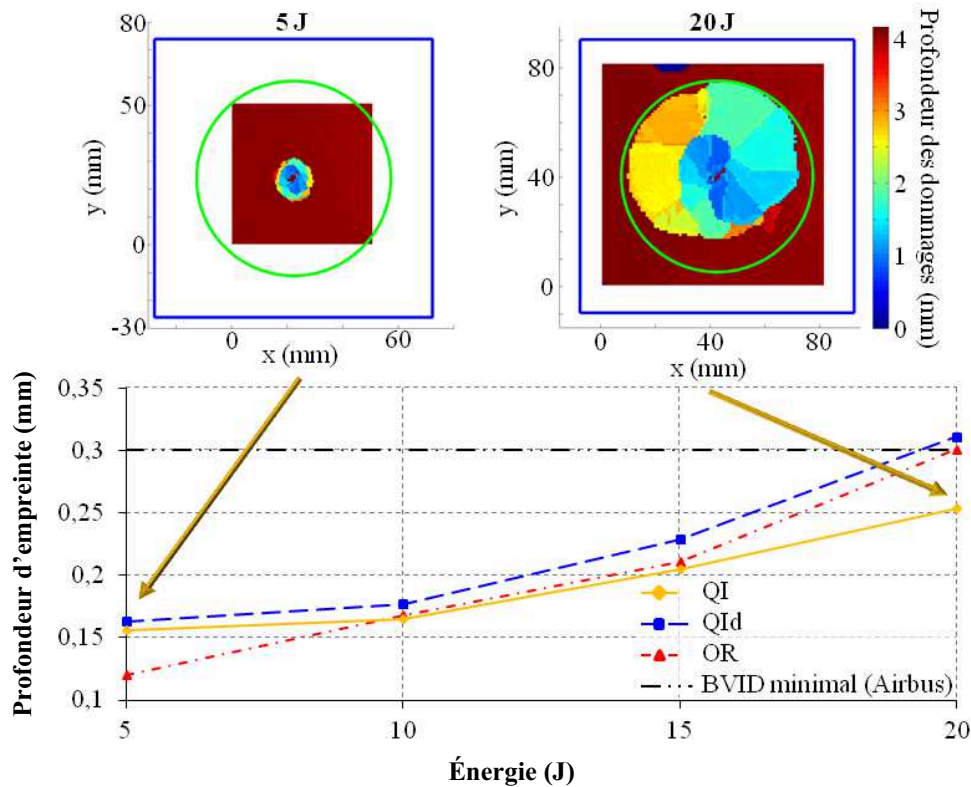


Figure 4.3. Évolution des profondeurs d'empreinte des trois empilements considérés suite aux différents impacts réalisés sur le montage d'encastrement. Les D-scans de l'éprouvette QI encastree après l'impact à 5 Joules et après l'impact à 20 Joules illustrent l'étendue des dommages au cours des impacts incrémentaux.

Pour le montage d'appui simple linéique, l'énergie d'impact est progressivement augmentée de 5 à 28 Joules. Le fait que la plaque puisse absorber de l'énergie en fléchissant permet en effet d'atteindre des énergies plus importantes. Les mesures de BVID qui font suite aux essais incrémentaux pour les trois empilements considérés sont reportées sur la figure 4.4. Ici encore, les profondeurs d'empreinte résiduelle n'atteignent pas la plus petite valeur du BVID prescrite par Airbus. On observe même une saturation de la valeur de la profondeur maximale d'empreinte, aux énergies les plus élevées. Les zones endommagées, mesurées par scan ultrasonore, servent donc à établir les énergies d'impact à appliquer aux essais suivants. Pour le montage d'appui simple linéique, les énergies d'impact retenues sont fixées à 10, 20 et 28 Joules. Les dommages de l'impact à 10 Joules paraissent en effet de taille raisonnable pour une détection par scan ultrasonore. Dans le cas des empilements OR et QI, les dommages causés par l'impact à 28 Joules s'étendent préférentiellement vers le côté gauche, lorsque l'on regarde la plaque par le dessus et dans le sens longitudinal, comparativement aux énergies plus faibles qui présentent des défauts plus symétriques. Cette singularité a conduit à choisir cette énergie maximale, afin de vérifier cette observation sur des impacts uniques.

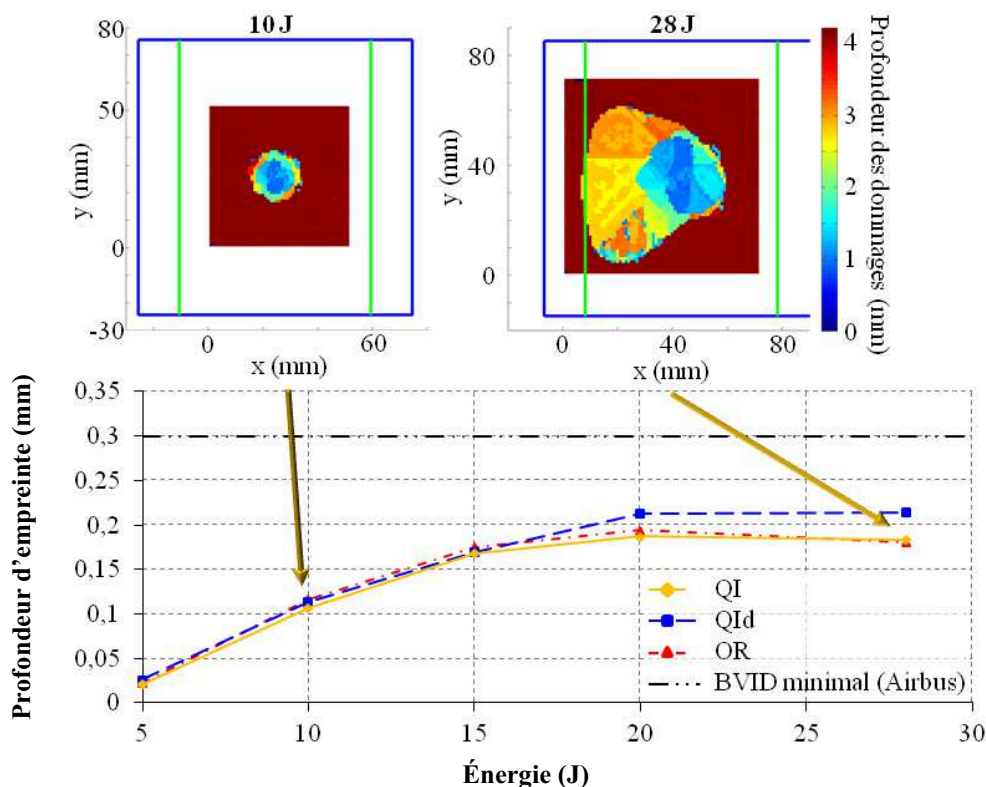


Figure 4.4. Évolution des profondeurs d'empreinte des trois empilements considérés suite aux différents impacts réalisés sur le montage d'appui simple linéique. Les D-scans de l'éprouvette QI simplement appuyée après l'impact à 10 Joules et après l'impact à 28 Joules illustrent l'étendue des dommages au cours des impacts incrémentaux.

4.2. Réalisation et analyse des essais d'impact sur les empilements choisis pour les deux montages définis

Une fois les énergies d'impact fixées pour chaque montage, les essais avec un seul choc sont réalisés sur les trois empilements, pour les trois énergies fixées et pour les deux conditions aux limites. Chaque essai est réalisé une seule fois afin d'économiser la matière. Le but des essais d'impact est en effet d'avoir des tendances et des premières valeurs à confronter aux valeurs numériques. Un essai d'impact à 18 Joules sur l'empilement QI encasturé a néanmoins été répété trois fois afin d'avoir une idée de la dispersion d'un essai. Les mêmes mesures que pour les essais d'impacts incrémentaux sont effectuées.

4.2.1. Analyse des essais d'impact unique sur le montage d'encastrement

Quatre essais d'impact unique à 5, 10, 20 et 28 Joules, respectivement, ont été réalisés par empilement, sur le montage d'encastrement. Les essais à 28 Joules ont été ajoutés aux trois essais initiaux, afin de pouvoir comparer les deux montages à cette énergie, en plus des énergies de 10 et 20 Joules. Trois essais d'impact à 18 Joules sur l'empilement QI ont également été réalisés, afin d'avoir une idée de la dispersion sur les mesures pour un essai donné. Au cours de l'essai d'impact à 10 Joules sur l'empilement QId, le système anti-rebond de l'impacteur n'a pas fonctionné (tentative 1). Il a été décidé d'impacter à nouveau cet empilement à la même énergie (tentative 2). Dans ce cas, le système anti-rebond a fonctionné. Les résultats de la tentative 1 sont présentés mais doivent être interprétés avec précaution. Le tableau 4.3 synthétise l'ensemble des essais d'impact réalisés sur le montage d'encastrement.

Empilement	Énergie (J)	Force maximale (kN)
QI	5	5,6
	10	7,3
	18	10,1
	18	10,1
	18	9,9
	20	10,9
	28	13,0
QId	5	5,7
	10	5,3 & 7,5
	20	10,6
	28	11,2
OR	5	6,5
	10	7,9
	20	11,4
	28	11,9

Tableau 4.3. Récapitulatif des essais d'impact réalisés sur le montage d'encastrement

Les observations faites pour les essais d'impact sur le montage d'encastrement sont celles classiquement faites dans la littérature. Quel que soit l'empilement, le temps d'impact, qui correspond à l'instant pour lequel la force de contact sur l'impacteur s'annule, augmente avec l'énergie d'impact (Figures 4.5 à 4.8). De même, la force maximale de contact au cours de l'impact augmente avec l'énergie.

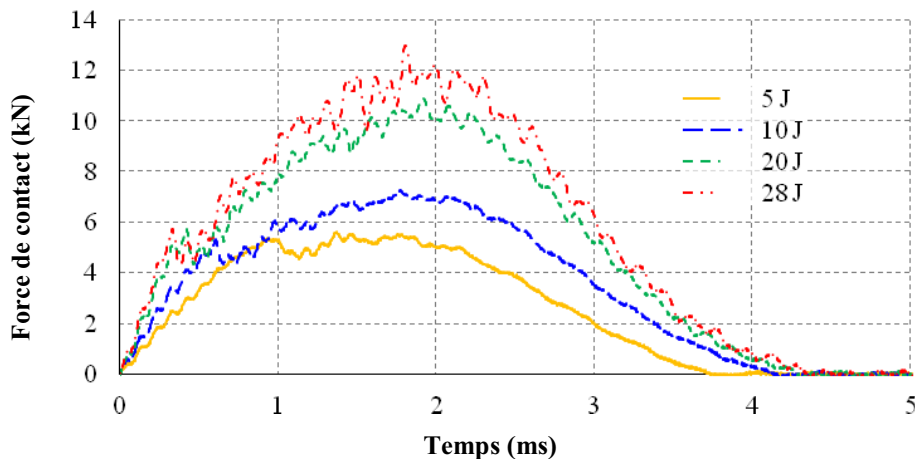


Figure 4.5. Forces de contact mesurées au cours des essais d'impact unique sur le montage d'encastrement, pour les empilements QI impactés à 5, 10, 20 et 28 Joules

Le seuil d'endommagement significatif, qui correspond à la première chute brutale de la force de contact [Belingardi, 2002] [Davies, 2004] est estimé à environ 5,5 kN pour l'empilement QI, à l'exception de l'essai d'impact à 10 Joules, où ce seuil est estimé à 6 kN. Pour l'empilement QId, il est estimé à 5,5 kN à 5 et 20 Joules, à 5 kN à 10 Joules, pour la première tentative d'impact (il n'y a plus de seuil d'endommagement significatif dans le signal force pour la deuxième tentative, comme c'était le cas en impact incrémental), et à 5,7 kN à 28 Joules. Le seuil d'endommagement de l'empilement OR est un peu plus élevé. Il est estimé à 6,3 kN à 5 et 20 Joules et à 6 kN à 10 et 28 Joules. A 5 Joules, la première rupture est suivie d'oscillations plus marquées que pour les autres énergies d'impact. Ce phénomène pourrait être lié au fait que l'impacteur n'a presque plus d'énergie à fournir à la plaque, donc que c'est la plaque qui guide le mouvement et non plus l'impacteur. A 18 Joules, pour l'empilement QI, on constate une bonne concordance des signaux temporels de la force de contact pour les trois répétitions d'essais.

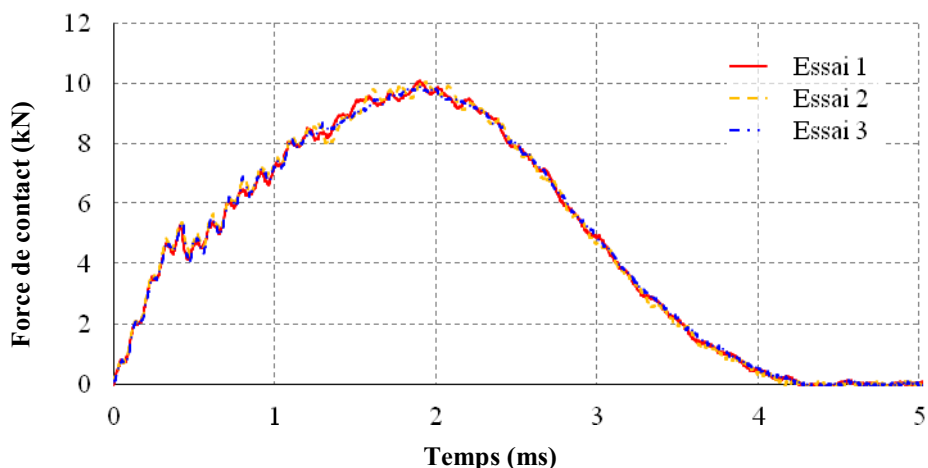


Figure 4.6. Forces de contact mesurées au cours des essais d'impact unique sur le montage d'encastrement, pour les empilements QI impactés à 18 Joules

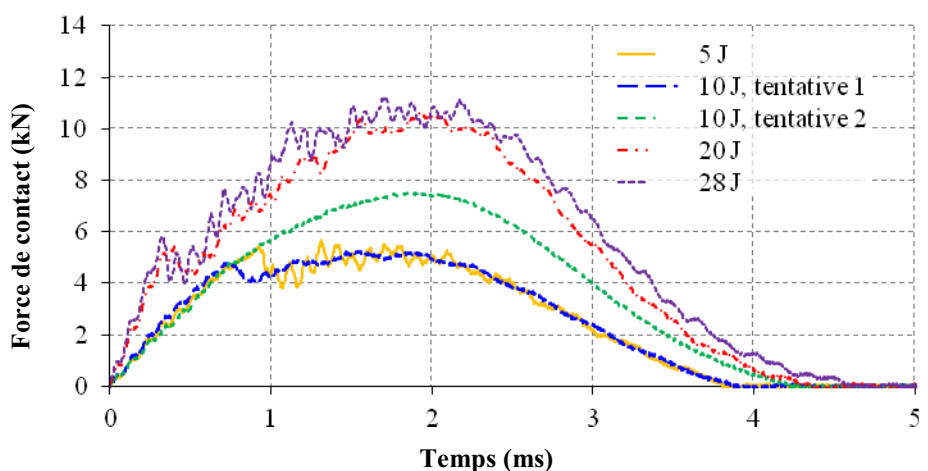


Figure 4.7. Forces de contact mesurées au cours des essais d'impact unique sur le montage d'encastrement, pour les empilements QId impactés à 5, 10, 20 et 28 Joules

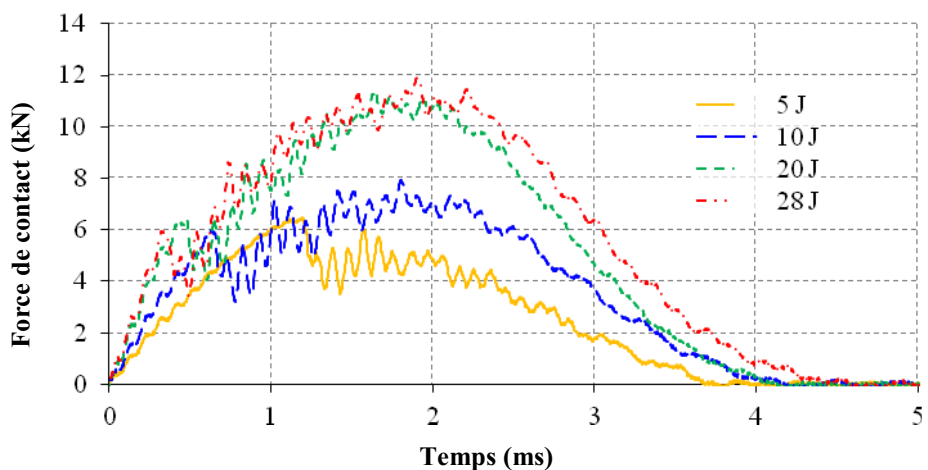


Figure 4.8. Forces de contact mesurées au cours des essais d'impact unique sur le montage d'encastrement, pour les empilements OR impactés à 5, 10, 20 et 28 Joules

Les déplacements maximaux et finaux de la plaque, au point d'impact et au point opposé, face non impactée, augmentent avec l'énergie (Figure 4.9). L'inflexion systématiquement observée à la fin du contact (lorsque la force de contact devient nulle), est peut-être liée à un mouvement vibratoire du bâti. Filmer le déroulement de l'essai par caméra rapide pourrait permettre de vérifier cette hypothèse.

Les déplacements mesurés dans le cas des impacts à 18 Joules montrent une dispersion significative dans la mesure des déplacements opposés à l'impact. Cette dispersion est peut-être liée au délaminage des interfaces proches de la face opposée à l'impact, dont le scénario d'endommagement varie peut-être suffisamment d'un essai à l'autre pour conduire à des mesures des déplacements opposés à l'impact significativement différents. Le délaminage de l'interface la plus proche de la face opposée à l'impact entraîne en effet de fortes oscillations du signal mesuré, pour l'empilement OR impacté à 20 Joules (Figures 4.12 et 4.13). Seule l'éprouvette impactée lors de l'essai 1 a été découpée pour observation par microscopie optique, ce qui ne permet pas de conclure quant à cette hypothèse. Une autre cause de la dispersion entre les mesures peut être le décollement de la pastille réfléchissante permettant de réaliser la triangulation laser pour la mesure du déplacement axial, face opposée à l'impact.

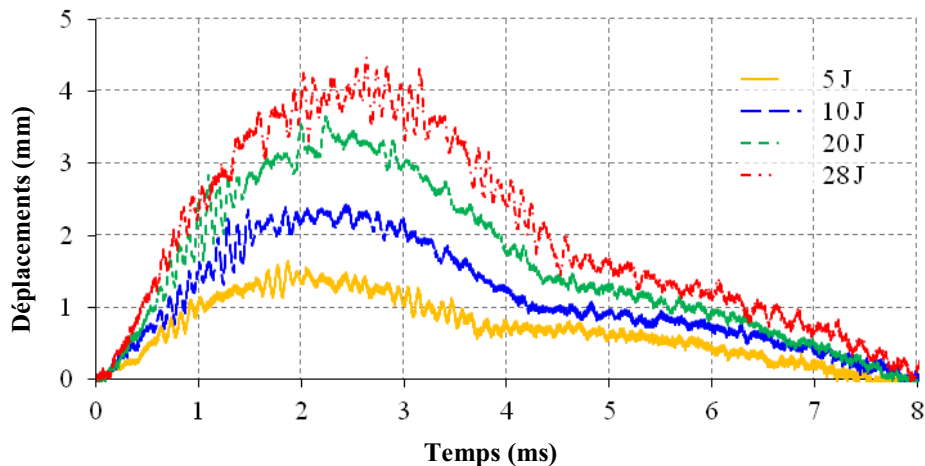


Figure 4.9. Historiques des déplacements du point opposé à l'impact, face non impactée, mesurés au cours des essais d'impact unique à 5, 10, 20 et 28 Joules pour l'empilement QI encastré

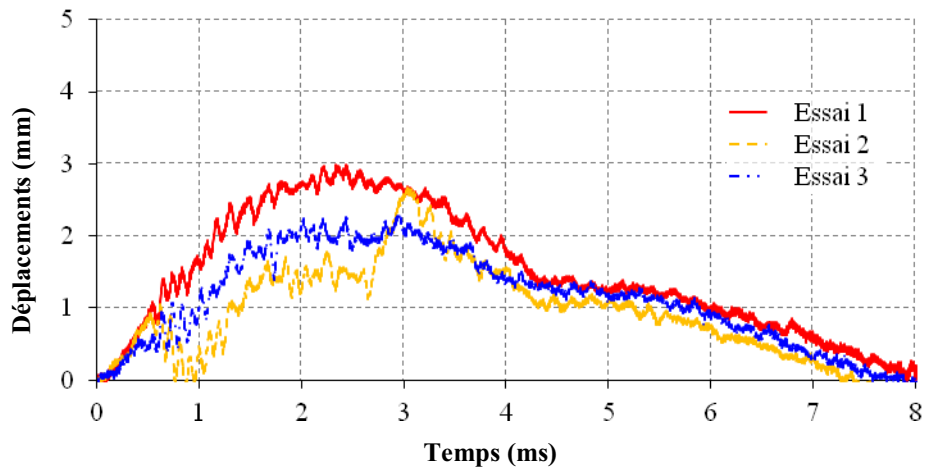


Figure 4.10. Historiques des déplacements du point opposé à l'impact, face non impactée, mesurés au cours des essais d'impact unique à 18 Joules sur l'empilement QI encastré

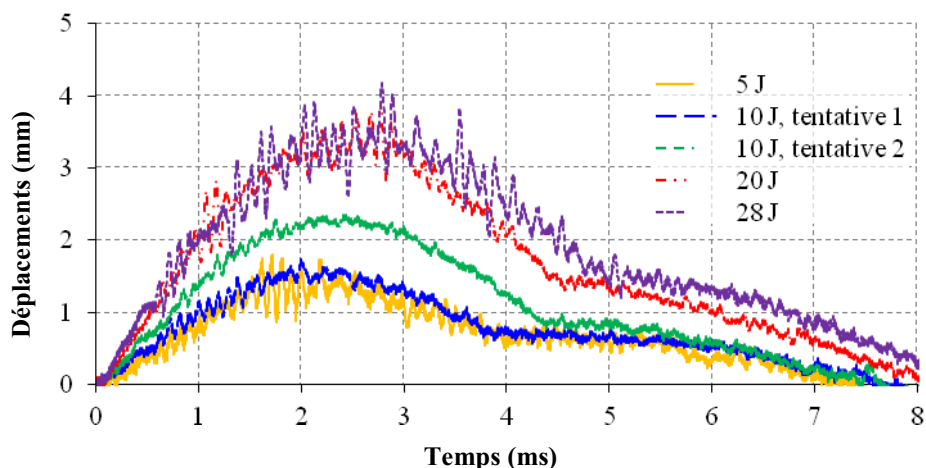


Figure 4.11. Historiques des déplacements du point opposé à l'impact, face non impactée, mesurés au cours des essais d'impact unique sur l'empilement QId encastré

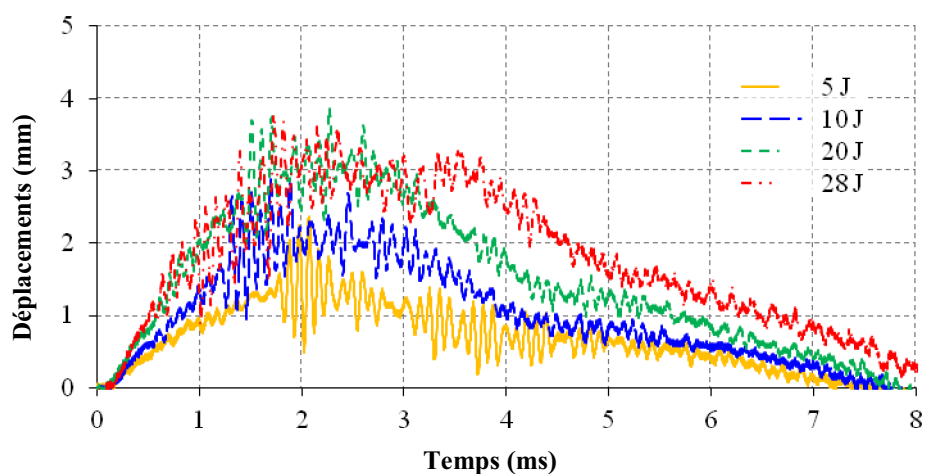


Figure 4.12. Historiques des déplacements du point opposé à l'impact, face non impactée, mesurés au cours des essais d'impact unique sur l'empilement OR encastré

D'autre part, on constate que les mesures comportent des oscillations de plus grandes amplitudes dans le cas de l'empilement OR, comparé aux deux autres empilements. Cela pourrait être un effet du positionnement des interfaces potentiellement plus délaminantes. En effet, dans le cas de l'empilement OR, une telle interface est positionnée proche de la surface du stratifié. Les oscillations observées pourraient donc indiquer un départ du délaminage à cette interface particulière. Cette hypothèse est vérifiée par une observation des dommages par microscopie optique (Figure 4.13). En effet, les coupes micrographiques montrent un fort décollement du pli inférieur. Une partie du pli juste au-dessus a même été arrachée lors des opérations de découpe et de polissage. Ce décollement important du pli inférieur n'est pas visualisé pour les deux autres empilements. Les grandes oscillations observées sur le signal temporel des déplacements axiaux du point opposé à l'impact, face non impactée, traduiraient donc le décollement du pli inférieur de l'empilement OR, dont les modes propres dynamiques diffèrent de ceux du reste du stratifié.

L'énergie absorbée, qui correspond à la part de l'énergie incidente qui n'est pas restituée à l'impacteur et qui est calculée par intégration de la courbe de la force de contact en fonction des déplacements axiaux de l'impacteur (chapitre 2), augmente avec l'énergie d'impact (Figure 4.14). Cela signifie qu'il y a plus d'énergie absorbée par la création d'endommagement, lorsque l'énergie d'impact augmente, ce qui est corrélée par l'évolution de l'aire projetée des dommages, mesurée par ultrasons en immersion, en fonction de

l'énergie d'impact (Figure 4.16). Pour la gamme énergétique considérée, cette croissance semble linéaire.

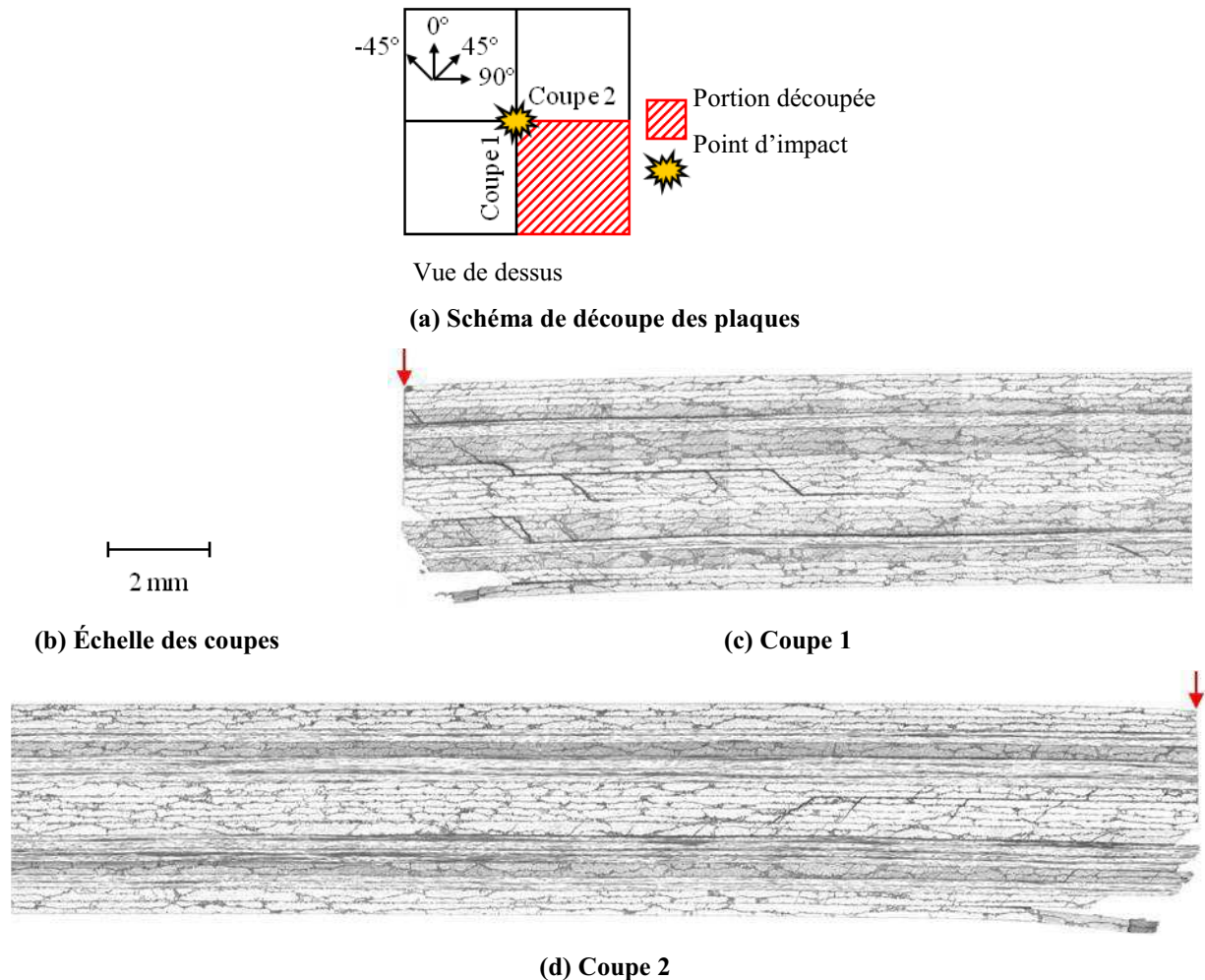


Figure 4.13. Micrographies des dommages induits par l'impact à 20 Joules sur l'empilement OR encastré. La flèche rouge indique le point d'impact.

Les profondeurs d'empreintes résiduelles et les aires projetées des dommages augmentent avec l'énergie d'impact (Figures 4.15 et 4.16). Le BVID minimal, à titre indicatif (la plaque est en effet peu représentative d'une structure industrielle de type panneau raidi, sur laquelle le BVID a été déterminé), est atteint pour les empilements QId et OR impactés à 28 Joules. L'empilement QId présente effectivement une aire projetée des dommages plus grande que dans le cas de l'empilement QI. En revanche, l'empilement OR présente une aire endommagée projetée légèrement plus faible.

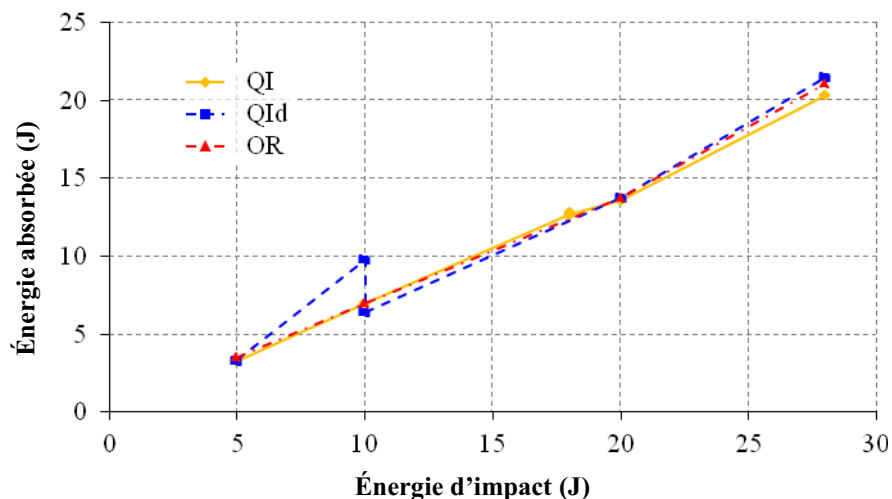


Figure 4.14. Évolution des énergies absorbées en fonction de l'énergie d'impact, pour les impacts uniques sur le montage d'encastrement

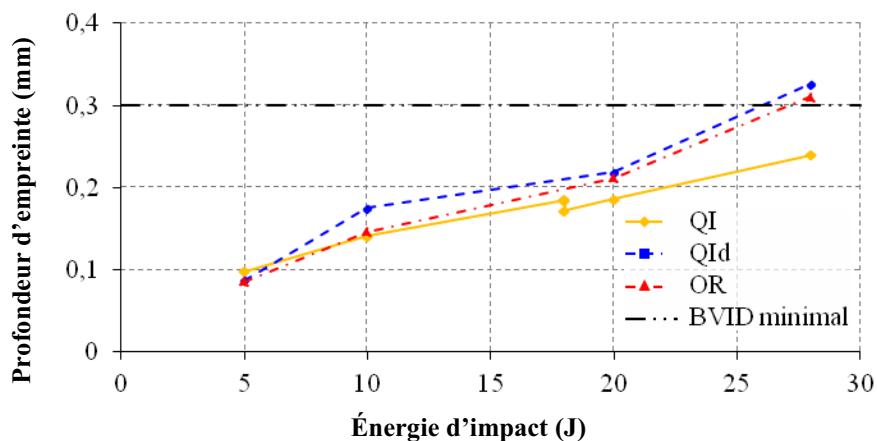


Figure 4.15. Évolution des profondeurs d'empreinte résiduelle en fonction de l'énergie d'impact, à l'issue des essais d'impact unique sur le montage d'encastrement

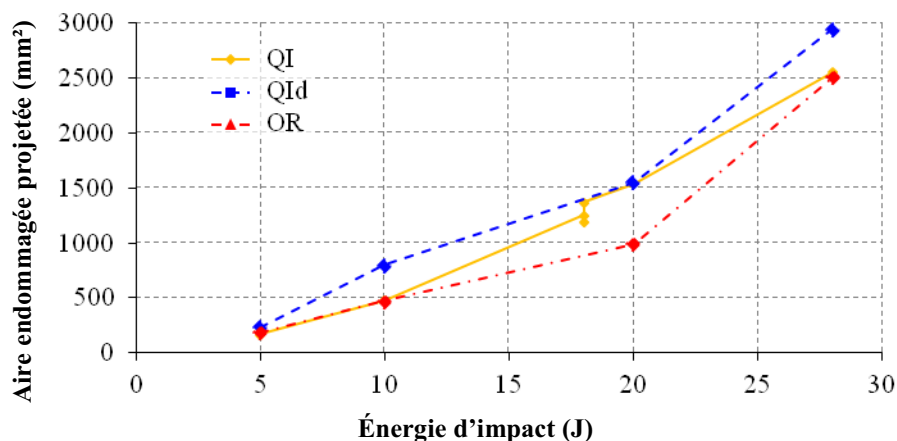
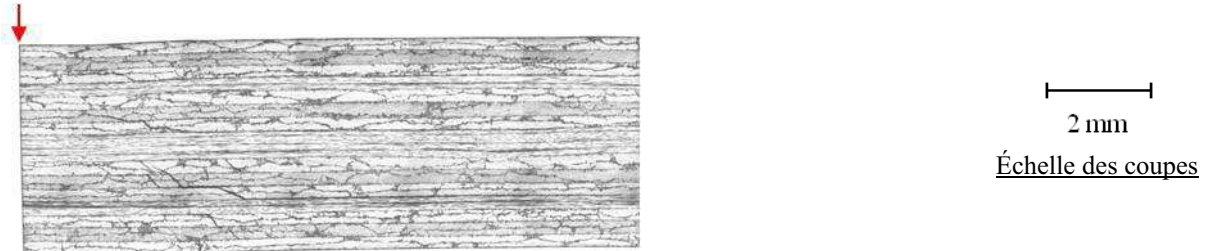


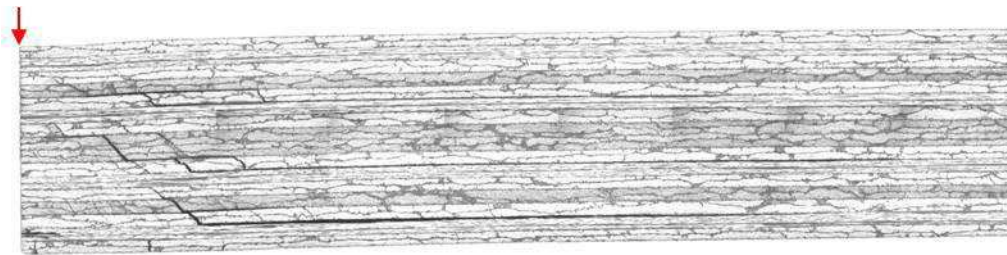
Figure 4.16. Évolution des aires projetées des dommages en fonction de l'énergie d'impact, à l'issue des essais d'impact unique sur le montage d'encastrement

Dans le cas de l'empilement QI encastéré, les spécimens impactés à 10 et 20 Joules et la première éprouvette impactée à 18 Joules ont été découpés pour une observation plus fine des dommages par microscopie optique (Figure 4.17 a, b et c). On constate que, plus l'énergie d'impact est grande, plus les fissures sont ouvertes et plus les dommages, notamment les fissures matricielles, se concentrent vers l'axe d'impact, dans l'épaisseur. Cela signifierait que plus l'énergie d'impact est grande (donc, ici, plus la vitesse d'impact est grande), moins

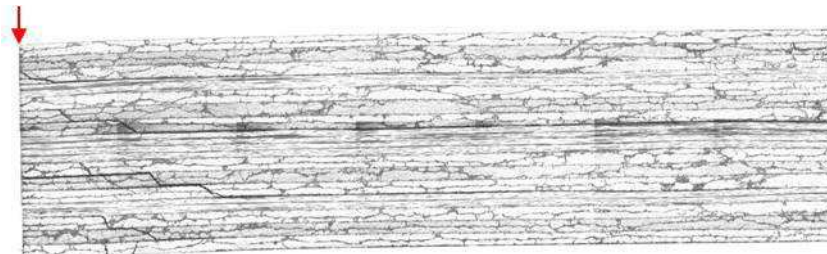
l'effet de la compression hydrostatique, sous l'impacteur, est important. La zone de compression hydrostatique située sous l'impacteur limite en effet l'endommagement, par incompressibilité de la matière. Cela semble signifier que plus l'énergie d'impact est grande, moins l'état de compression hydrostatique est établi et plus la compression hors plan devient prépondérante, par rapport aux compressions longitudinales et transverses. D'autre part, l'empilement QId semble avoir une marque résiduelle, tandis que les deux autres empilements montrent une flexion résiduelle.



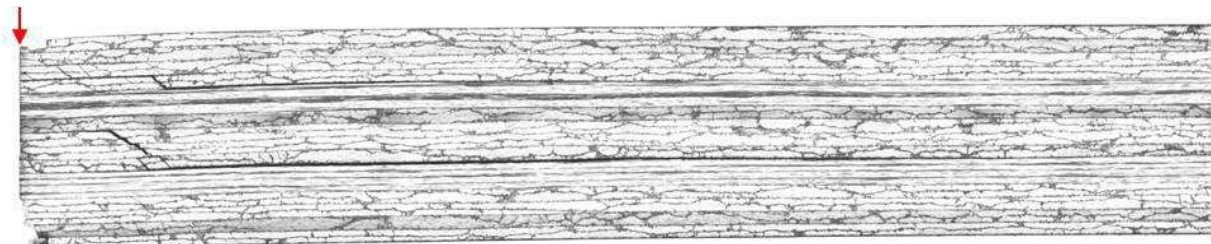
(a) QI encastré impacté à 10 Joules



(b) QI encastré impacté à 18 Joules



(c) QI encastré impacté à 20 Joules



(d) QId encastré impacté à 20 Joules

Figure 4.17. Micrographies (coupe 1) des dommages induits par impact de l'empilement QI encastré impacté à 10 Joules (a), 18 Joules (b) et 20 Joules (c) et de l'empilement QId encastré impacté à 20 Joules (d)

4.2.2. Analyse des essais d'impact unique sur le montage d'appui simple linéique

Trois essais d'impact unique à 10, 20 et 28 Joules, respectivement, ont été réalisés par type d'empilement, sur le montage d'appui simple linéique. Comme dans le cas du montage d'encastrement, le système anti-rebond n'a pas fonctionné pour l'essai d'impact à 10 Joules sur l'empilement QId (tentative 1). Cependant, la profondeur d'empreinte résiduelle et les dommages induits par ce premier impact ont cette fois été mesurés avant d'impacter à nouveau le spécimen à 10 Joules (tentative 2). Les mesures d'empreinte résiduelle et des dommages induits sont ensuite réitérées, après le second impact. Dans le cas de l'empilement QI impacté à 28 Joules, le système d'acquisition des mesures au cours de l'essai n'a pas fonctionné, c'est pourquoi les résultats globaux ne sont pas présentés pour ce cas-ci. Un récapitulatif des essais d'impact réalisés sur le montage d'appui simple linéique est donné dans le tableau 4.4.

Empilement	Énergie (J)	Force maximale (kN)
QI	10	6,2
	20	9,0
	28	Pas de mesure
QId	10	5,2 & 6,2
	20	8,7
	28	9,8
	28 (recentré)	10,0
OR	10	6,1
	20	9,2
	28	9,9
	28 (recentré)	10,3

Tableau 4.4. Récapitulatif des essais d'impact réalisés sur le montage d'appui simple linéique

Quel que soit l'empilement, les historiques des forces de contact montrent une augmentation de la force maximale de contact avec l'énergie d'impact (Figures 4.18 à 4.20). Les temps d'impact pour des énergies d'impact de 10 et 20 Joules sont proches mais ce temps est augmenté pour une énergie de 28 Joules, ce qui traduit une diminution significative de la raideur de la plaque. En effet, les modèles analytiques d'impact ont pu mettre en évidence la relation entre la raideur apparente de la plaque et le temps d'impact ou encore la force de contact [Davies, 2004]. Cette diminution de la raideur de la plaque est attribuée à la création de dommages au sein de la plaque, au cours de l'impact. Le seuil d'endommagement est situé aux alentours des 5 kN, pour les empilements QI et QId. Dans le cas de l'empilement OR, le seuil d'endommagement est estimé à 6 kN, à l'exception de l'impact à 28 Joules initial, où ce seuil est plus proche des 5 kN.

Concernant les déplacements, les valeurs maximales des déplacements du point d'impact comme du point opposé à l'impact, face non impactée, augmentent avec l'énergie (Figures 4.21 à 4.23). De même, les valeurs de ces déplacements à la fin de l'impact augmentent lorsque l'énergie augmente. L'énergie absorbée par la cible augmente avec l'énergie incidente. Cette croissance semble linéaire (Figure 4.24).

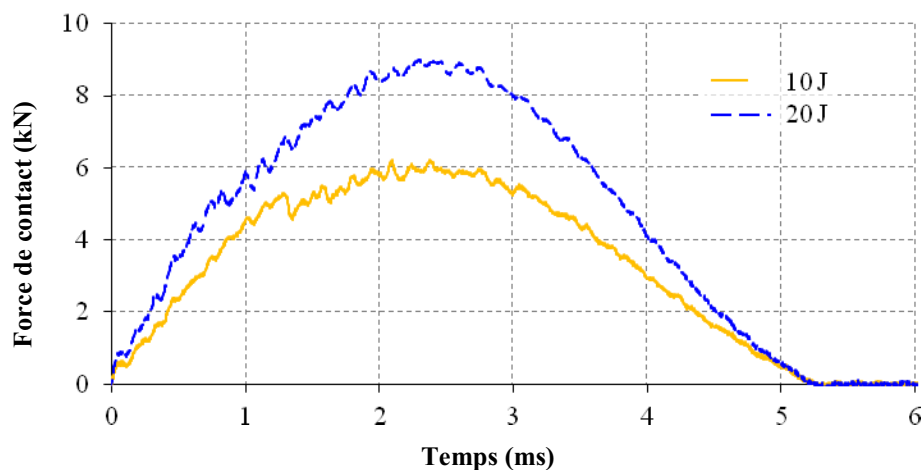


Figure 4.18. Historiques des forces de contact observés pour les impacts uniques sur l'empilement QI simplement appuyé

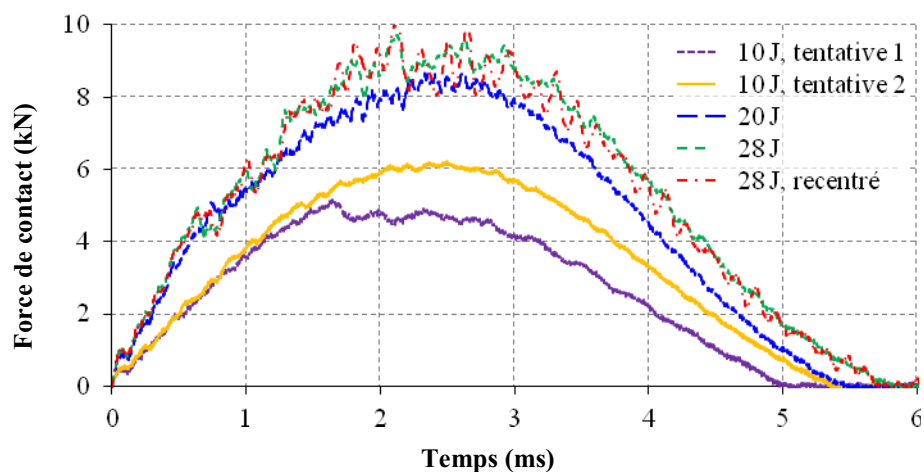


Figure 4.19. Historiques des forces de contact observés pour les impacts uniques sur l'empilement QId simplement appuyé

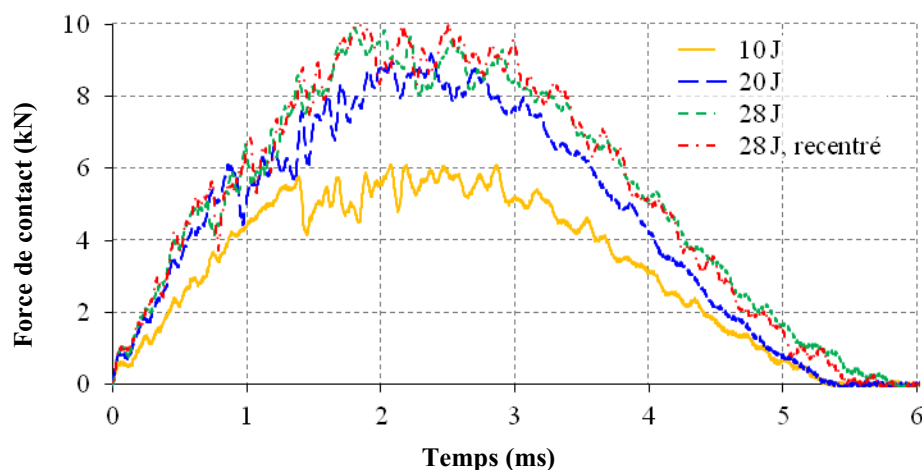


Figure 4.20. Historiques des forces de contact observés pour les impacts uniques sur l'empilement OR simplement appuyé

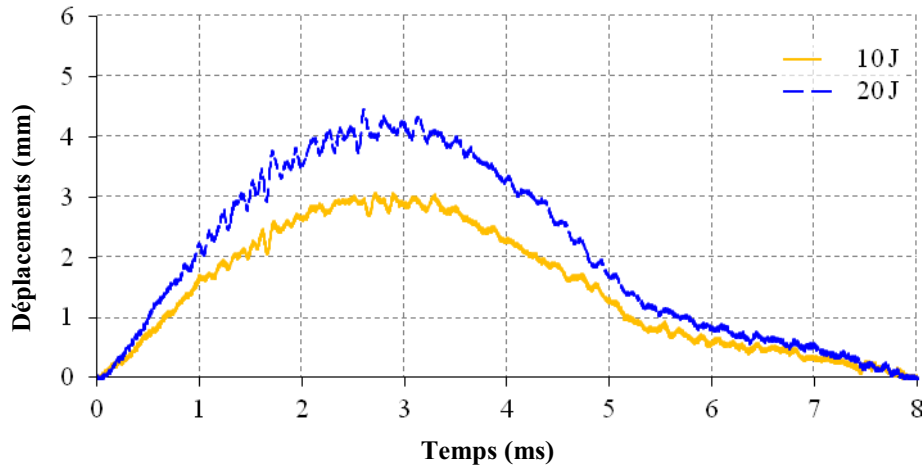


Figure 4.21. Historiques des déplacements axiaux du point opposé à l'impact, mesurés par triangulation laser (chapitre 2), pour les impacts uniques sur l'empilement QI simplement appuyé

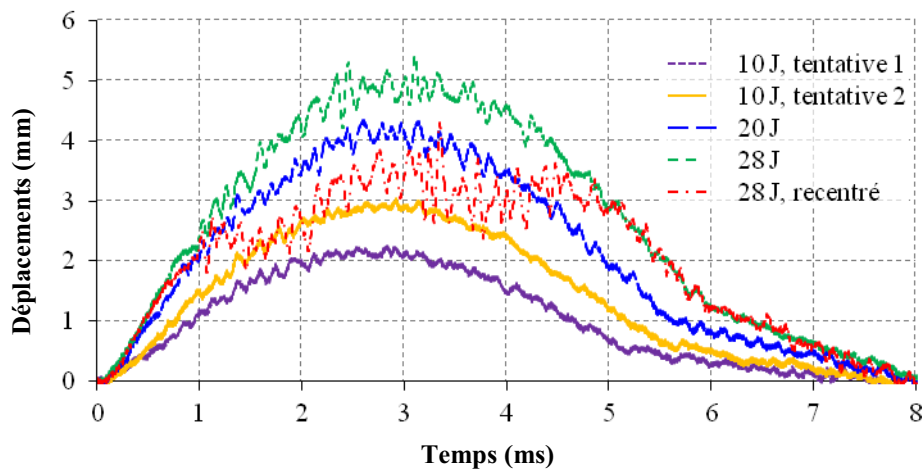


Figure 4.22. Historiques des déplacements axiaux du point opposé à l'impact, mesurés par triangulation laser (chapitre 2), pour les impacts uniques sur l'empilement QId simplement appuyé

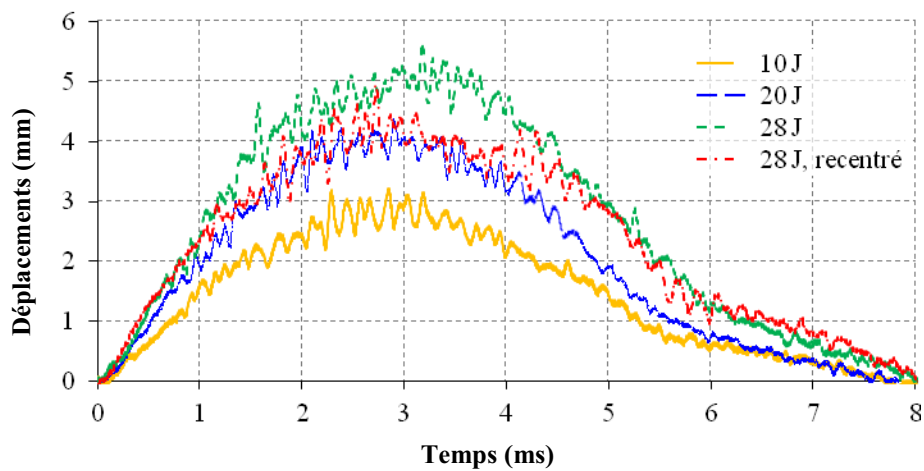


Figure 4.23. Historiques des déplacements axiaux du point opposé à l'impact, mesurés par triangulation laser (chapitre 2), pour les impacts uniques sur l'empilement OR simplement appuyé

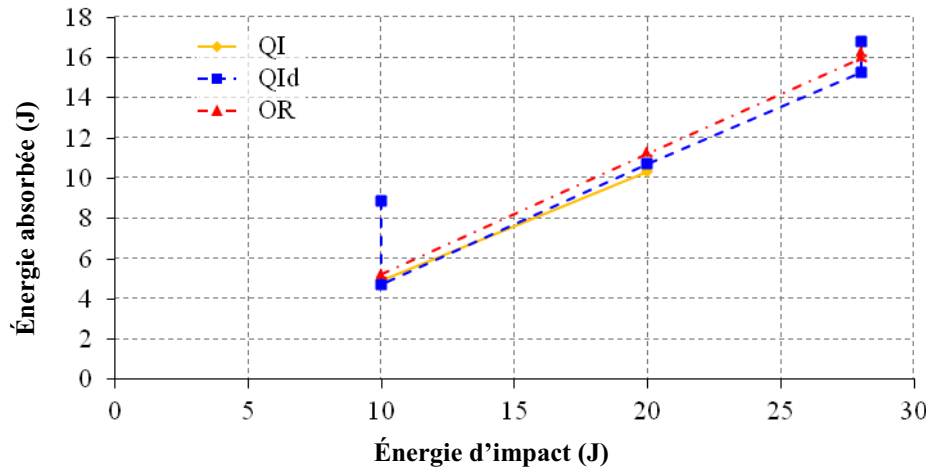


Figure 4.24. Évolution des énergies absorbées par les trois empilements en fonction de l'énergie d'impact, pour le montage d'appui simple linéique

Les profondeurs d'empreintes sont très proches (Figure 4.25). Leurs évolutions en fonction de l'énergie d'impact sont similaires, à l'exception de l'empilement QId qui semble avoir une évolution linéaire, tandis que les deux autres empilements semblent tendre vers une saturation, pour la gamme d'énergies d'impact considérée. L'aire projetée des dommages semble croître fortement, de manière non linéaire, avec l'énergie d'impact, pour la gamme considérée (Figure 4.26). L'aire endommagée projetée ne correspond pas à l'aire endommagée totale, ce qui pourrait expliquer ces différences de comportement. En effet, dans les simulations présentées au chapitre précédent, l'aire totale peut varier d'une configuration à une autre (empilement, loi de comportement des plis...) alors que l'indicateur aire endommagée projetée peut être significativement différente, surtout si une interface a beaucoup plus délaminé que les autres, comme cela semble être le cas à 28 Joules.

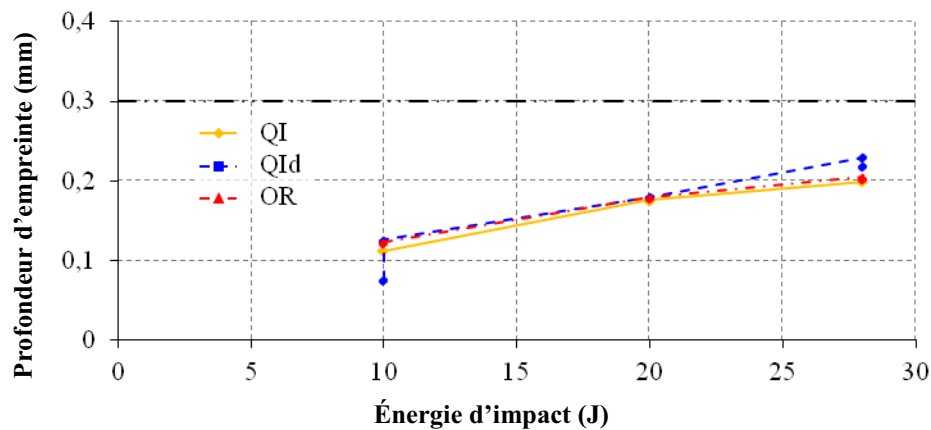


Figure 4.25. Évolution des profondeurs d'empreinte résiduelle en fonction de l'énergie d'impact, pour le montage d'appui simple linéique

Dans le cas des impacts à 28 Joules sur le montage d'appui simple linéique, une direction préférentielle de propagation des dommages à la gauche de la plaque est observée pour tous les empilements (Figure 4.27 en haut). L'hypothèse est faite que cette propagation d'un côté plutôt que de l'autre est dû à un léger décentrage du montage par rapport au point d'impact. Des essais à 28 Joules sont donc réalisés pour les empilements QId et OR sur le montage d'appui simple linéique, où l'impacteur est recentré sur la plaque. Ce recentrage n'a cependant pas d'effet sur la dissymétrie des dommages observés, dans le cas de l'empilement OR (Figure 4.27 en bas, à droite). En revanche, cette dissymétrie est accentuée sur l'empilement QId dans le cas de l'impact à 28 Joules recentré (Figure 4.27 en bas, à gauche).

Ce départ préférentiel pourrait donc être dû à un impacteur légèrement en biais par rapport au plan du stratifié.

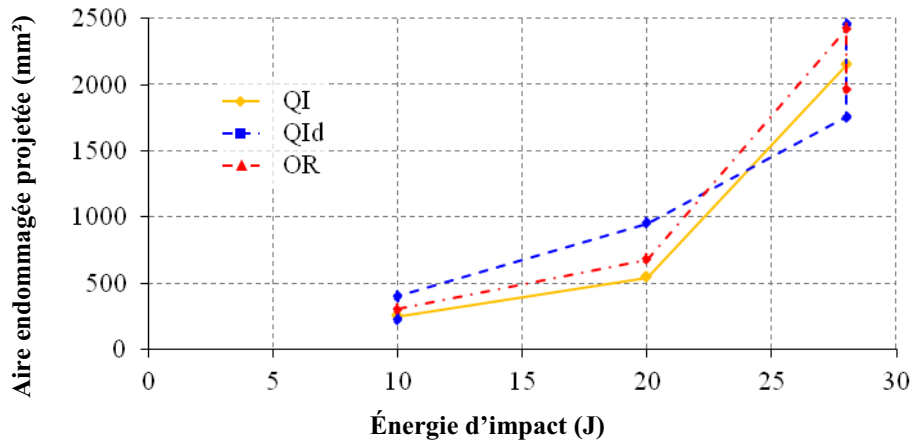


Figure 4.26. Évolution des aires projetées des dommages en fonction de l'énergie d'impact, pour le montage d'appui simple linéique

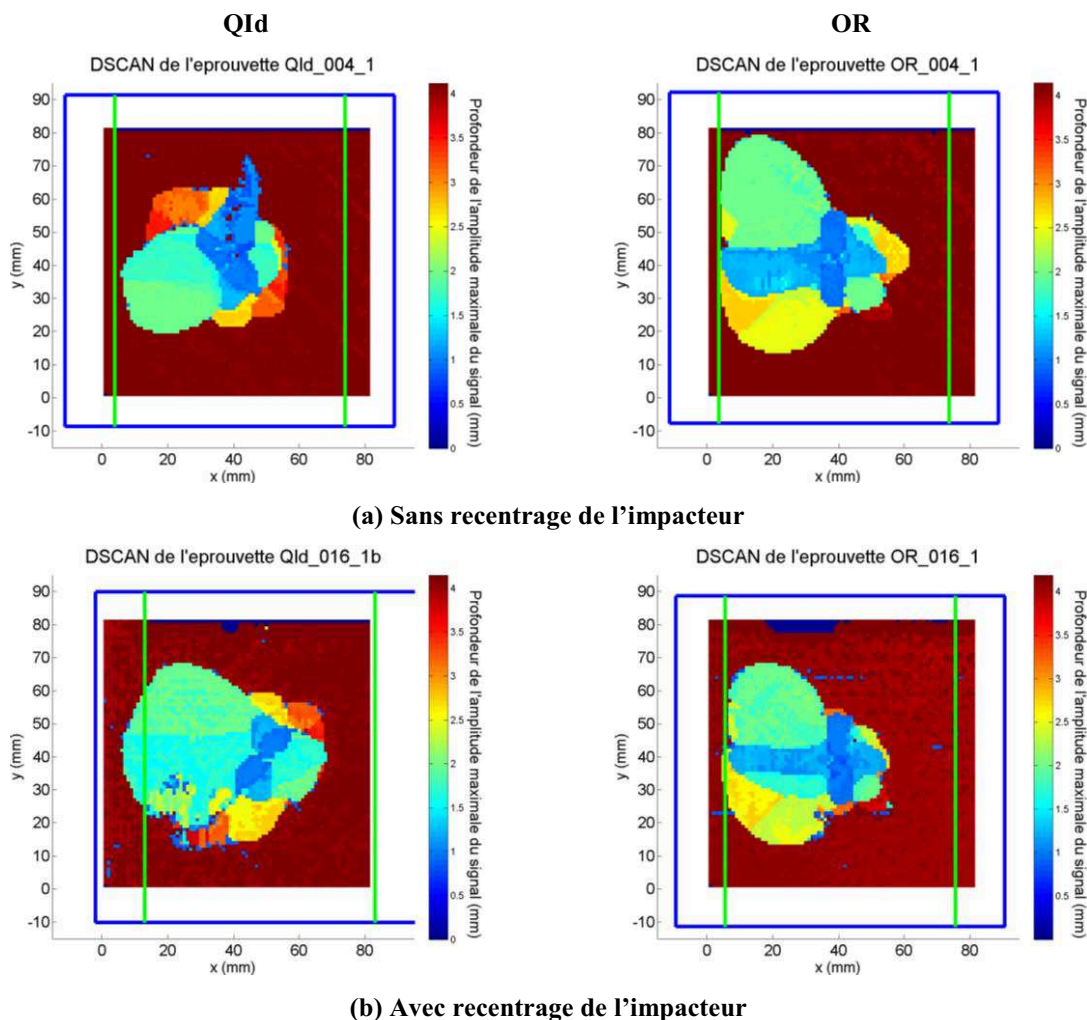


Figure 4.27. D-scans des empilements QId et OR impactés à 28 Joules, dans la configuration initiale (a) et avec recentrage de l'impacteur sur la plaque (b)

Les empilements QI et OR impactés à 10 et 20 Joules, ainsi que l'empilement QId impacté à 20 Joules, sont découpés pour une observation plus fine des dommages par

microscopie optique. L'analyse de ces micrographies amène aux mêmes conclusions que celles faites pour le montage d'encastrement.

4.3. Réalisation et analyse des essais d'indentation sur les empilements choisis pour les deux montages définis

Afin de vérifier l'analogie entre dommages d'impact et dommages induits par une sollicitation quasi-statique hors plan du stratifié, des essais d'indentation sont réalisés. A partir des forces maximales mesurées lors des essais d'impact, des consignes en force maximale d'indentation sont déterminées. Les forces de consigne ne correspondent pas exactement aux forces maximales d'impact afin de pouvoir comparer les empilements et les montages entre eux, pour la sollicitation quasi-statique d'indentation (les mêmes forces maximales de consigne sont ainsi imposées à tous les empilements). Au cours de l'essai, la vitesse de déplacement de la traverse est fixée à une vitesse intermédiaire de la gamme de vitesse de l'appareil (0,6 mm/min, soit 10^{-5} m/s – la vitesse des impacts à basse vitesse et à faible énergie est de l'ordre du mètre par seconde). Cette vitesse est maintenue constante, jusqu'à atteindre la force maximale de consigne. Le sens de déplacement de la traverse est alors inversé et le retour du poinçon se fait à la même vitesse.

4.3.1. Analyse des résultats obtenus en indentation sur le montage d'encastrement

Pour le montage d'encastrement, les forces maximales de consigne sont initialement fixées à 5, 8 et 10 kN. Pour l'empilement QI, deux essais à 7,3 kN sont ajoutés, où la force maximale de consigne correspond exactement à la force maximale mesurée au cours de l'essai d'impact à 10 Joules sur l'empilement QI encasté. L'essai à 10 kN pour cet empilement est réalisé à trois reprises avec trois vitesses différentes (10^{-2} , 10^{-5} et 10^{-7} m/s) pour mettre en évidence des éventuels effets de la vitesse de chargement. L'ensemble des essais d'indentation réalisés est synthétisé dans le tableau 4.5.

Empilement	Énergie (J)	Force maximale (kN)
QI	3	5,0
	9	7,3
	11	8,0
	16 (fluage)	10,0
	16 (10^{-2} m/s)	10,0
	17	10,0
	17 (10^{-7} m/s)	10,0
QId	4	5,0
	11	8,0
	17	10,0
OR	5	8,0
	12	5,0
	17	10,0

Tableau 4.5. Récapitulatif des essais d'indentation réalisés sur le montage d'encastrement

Du fait de l'asservissement du poinçon, la consigne est triangulaire. C'est pourquoi les historiques des forces de contact mesurées sur l'impacteur sont également triangulaires (Figure 4.28). Sur les historiques des forces de contact, un décrochage de la force de contact, aux alentours de 5 kN, comme en impact, est observé vers les 100 secondes. Pour les empilements OR indentés à 5 et 8 kN, ce décrochage survient aux alentours des 4 kN, contre

environ 6 kN en impact. Ce décrochage peut être considéré comme le seuil d'endommagement, pour l'essai d'indentation.

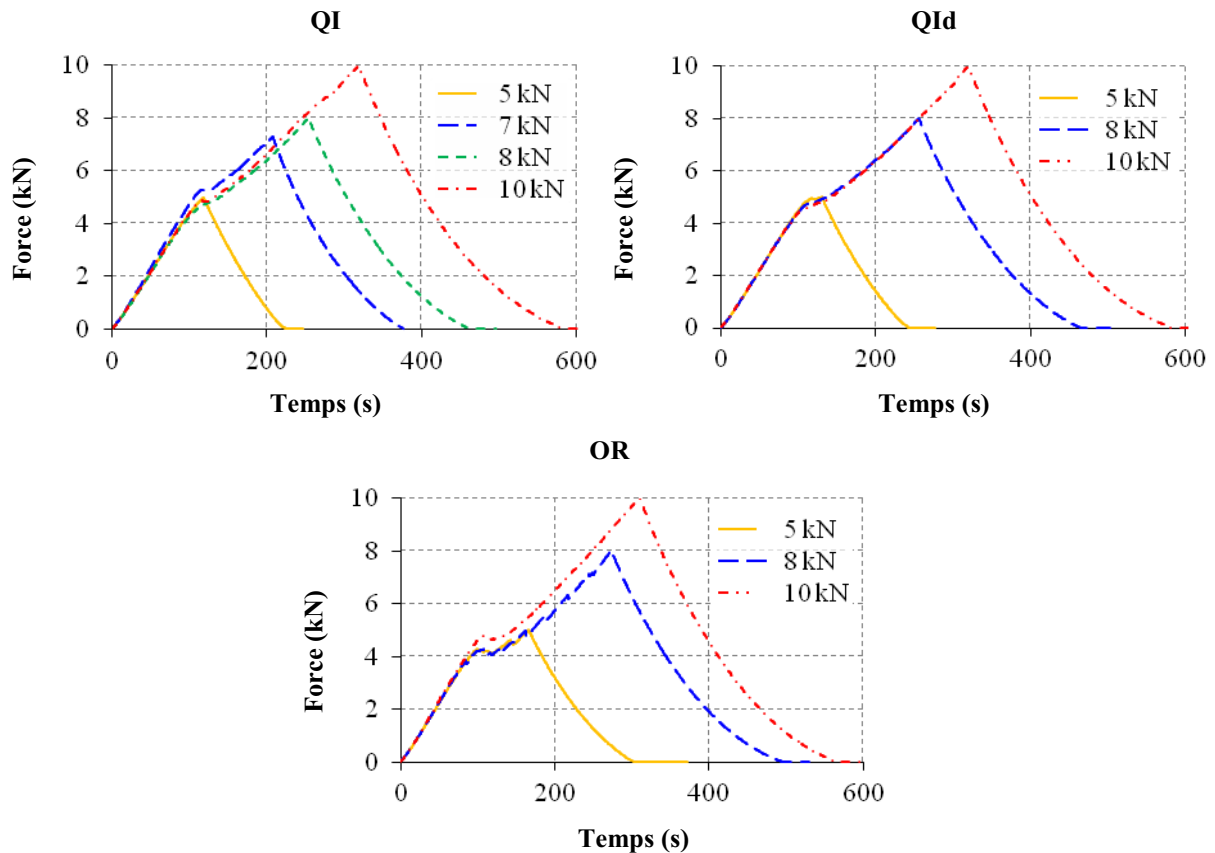


Figure 4.28. Historiques des forces de contact des essais d'indentation sur le montage d'encastrement

Les déplacements maximaux du point de contact et du point opposé augmentent lorsque la force maximale de consigne, donc l'énergie maximale transmise à la plaque, augmente. Les historiques des déplacements du point opposé au contact présentent une légère inflexion au début de la descente du poinçon sur la plaque. Le tracé de la différence entre les déplacements axiaux du poinçon et ceux mesurés sur la face opposée au poinçonnement met en évidence l'écrasement dans l'épaisseur lié au contact (Figure 4.29). Une forte non linéarité survient au même instant que le décrochage de la force de contact, ce qui semble indiquer un changement de comportement important.

L'énergie absorbée, calculée *a posteriori* par intégration (méthode des trapèzes) de la force de contact en fonction des déplacements axiaux du poinçon, augmente avec la force maximale de contact, donc avec l'énergie maximale transmise à la plaque (Figure 4.30). Cette croissance semble linéaire, quel que soit l'empilement.

Pendant les essais d'indentation, l'émission acoustique permet de suivre l'évolution de l'endommagement en fonction de la force appliquée sur la plaque, en cumulant les énergies acoustiques de chaque événement (Figure 4.31). Globalement, le niveau d'endommagement augmente avec l'énergie maximale transmise à la plaque. Seul l'empilement OR indenté à 8 kN, soit une énergie maximale transmise à la plaque de 12 Joules, présente un niveau de dommages plus importants que dans le cas de l'empilement OR indenté à 10 kN, soit une énergie maximale transmise de 17 Joules.

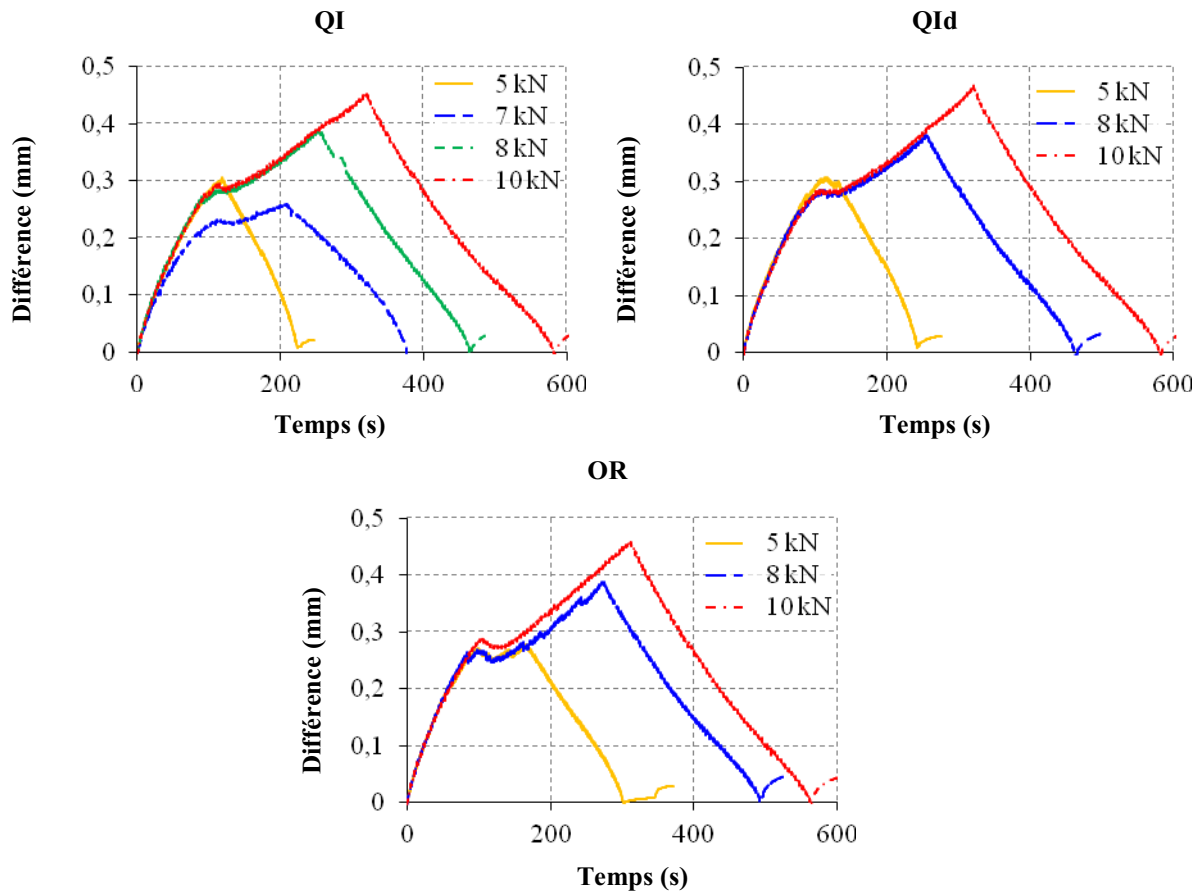


Figure 4.29. Évolutions temporelles des différences des déplacements axiaux du point de contact et du point opposé au contact dans les essais d'indentation sur montage encastré

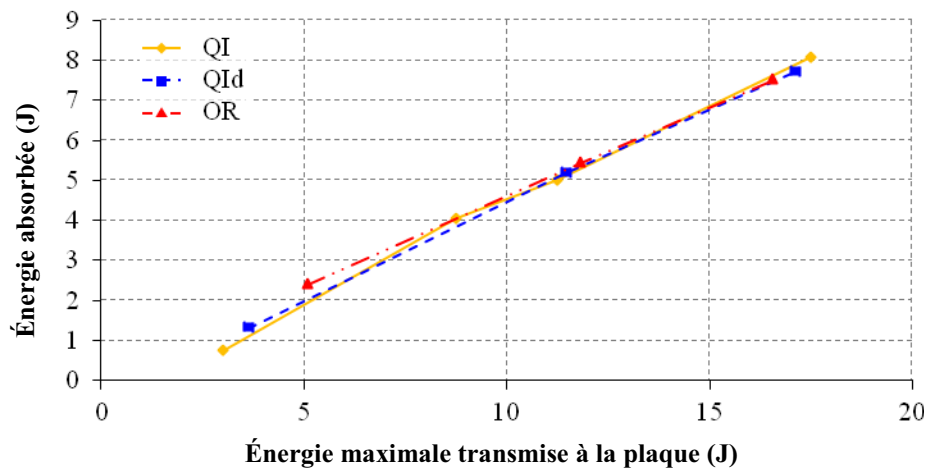


Figure 4.30. Évolution de l'énergie absorbée par la plaque en fonction de l'énergie maximale qui lui est transmise, pour le montage d'encastrement

Les courbes de l'énergie cumulée en fonction de la force appliquée mettent en évidence un retard des dommages. En effet, on constate que, peu après le début de la remontée du poinçon, alors que la force de contact commence à diminuer, les derniers événements très énergétiques surviennent. Les événements suivants sont de faibles énergies et pourraient être liés à des frottements des lèvres de fissures. Afin de vérifier ce possible retard de l'endommagement, un essai de fluage en indentation hors plan est réalisé sur l'empilement QI, où le déplacement du poinçon est maintenu constant pendant 1000 secondes lorsque la force maximale de consigne, de 10 kN, est atteinte (Figure 4.32). Cet essai montre que des

événements acoustiques d'énergie importante ont encore lieu, ce qui semble induire une décroissance de la force de contact. Cela peut alors indiquer des endommagements tardifs.

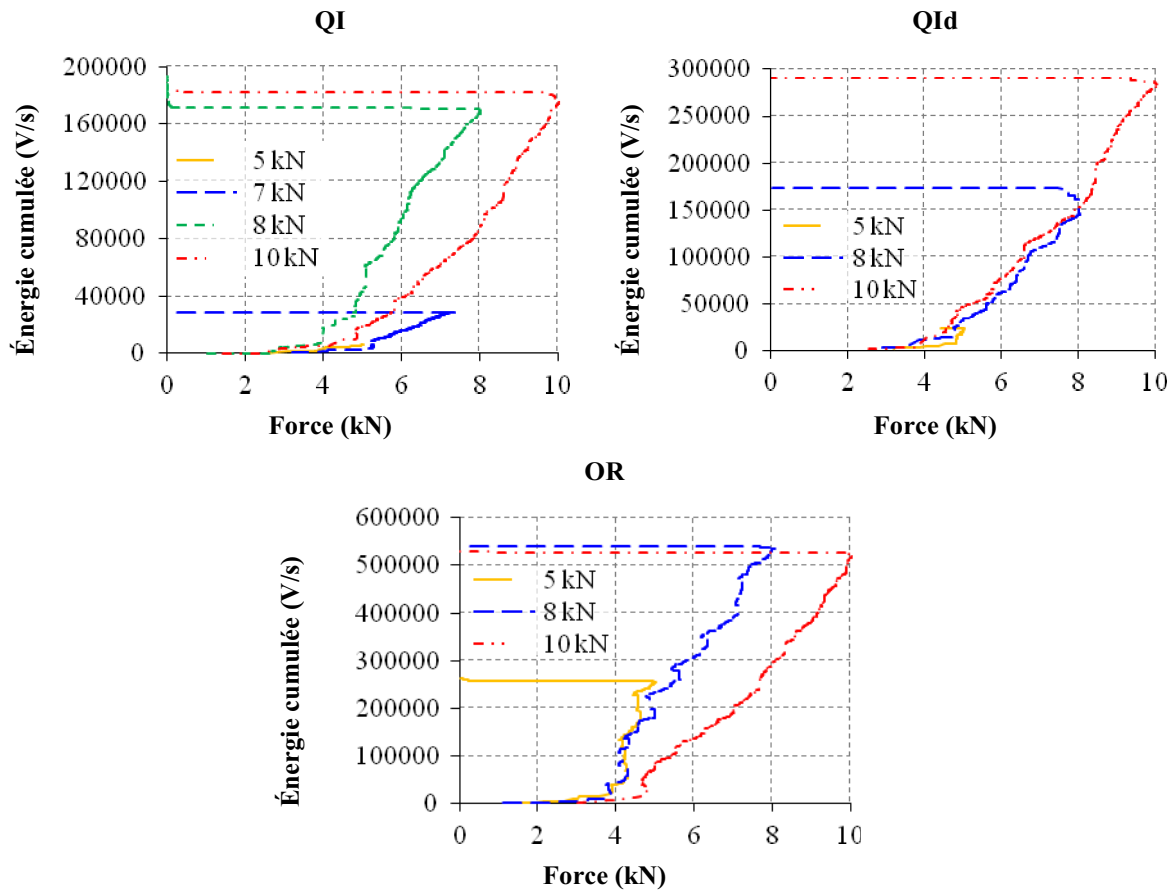


Figure 4.31. Évolution des énergies acoustiques cumulées en fonction des forces de contact pour les essais d'indentation sur le montage d'encastrement

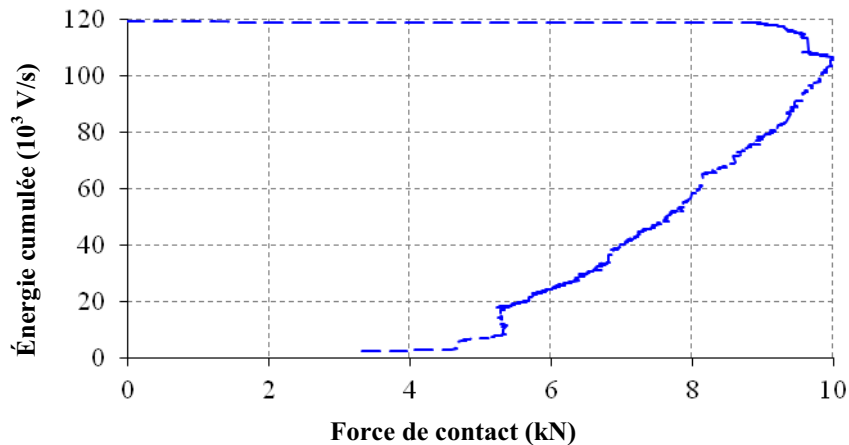


Figure 4.32. Évolutions de l'énergie acoustique cumulée en fonction de la force de contact pour l'essai de fluage sur l'empilement QI encastéré

Les profondeurs des empreintes résiduelles augmentent avec la force maximale de contact (Figure 4.33a). Ces profondeurs ont des valeurs proches, entre les empilements, pour les valeurs les plus importantes de la force maximale de contact. De même, les aires endommagées croissent avec la force de contact (Figure 4.33b).

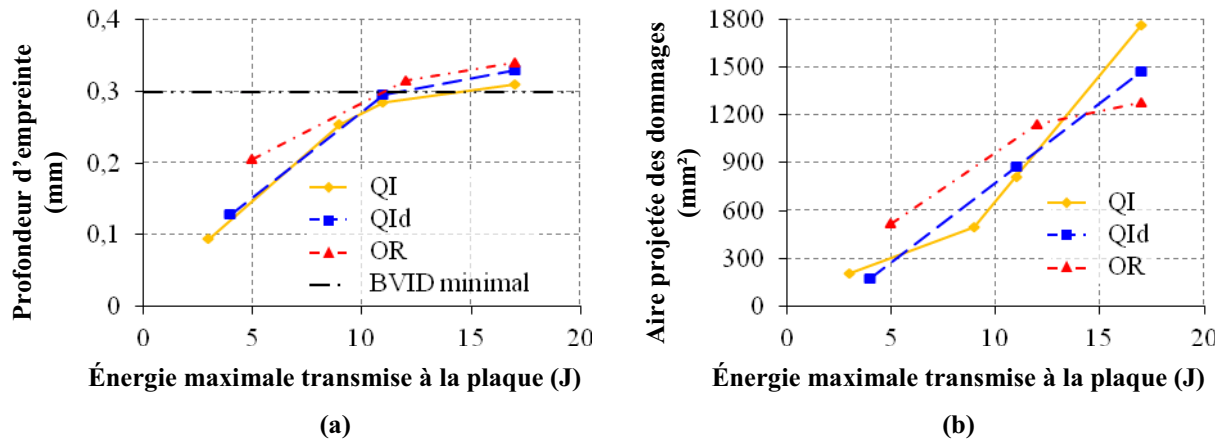


Figure 4.33. Évolutions des profondeurs d'empreinte résiduelle (a) et des aires projetées des dommages (b) pour les essais d'indentation sur le montage d'encastrement

L'empilement OR semble atteindre une saturation de l'indicateur aire projetée des dommages. Cependant, le scan par ultrasons en immersion indique que la zone libre de l'encastrement, située dans le cercle vert sur le D-scan, n'est pas complètement endommagée (Figure 4.34). Il s'agit donc peut-être d'un effet de la projection des dommages : le délaminage a sans doute augmenté dans l'ensemble des interfaces mais cette croissance est masquée par les interfaces qui ont le plus délaminé.

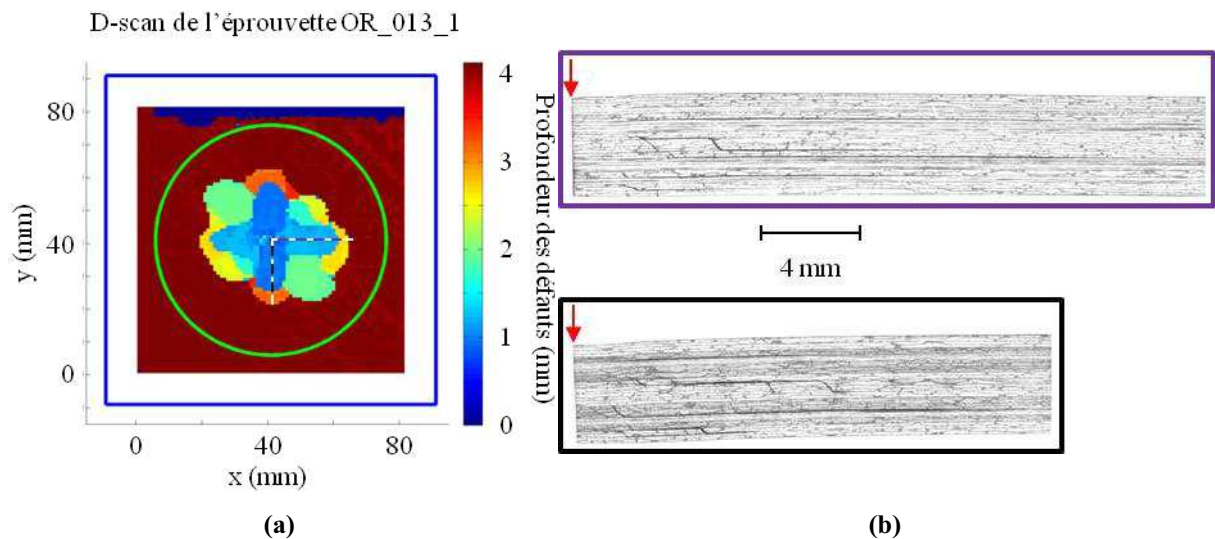


Figure 4.34. D-scan (a) et micrographies (b) de l'empilement OR encastré indenté à 10 kN

Afin d'avoir une idée des effets de la vitesse du chargement sur l'endommagement et la profondeur d'empreinte résiduelle, deux empilements QI sont à nouveau sollicités à 10 kN, avec deux vitesses supplémentaires de déplacement du poinçon, différentes de la vitesse initiale (10^{-5} m/s) et inférieures à la vitesse d'impact, de l'ordre du mètre par seconde. Le décrochage de la force de contact est plus marqué dans l'essai à 10^{-5} m/s que dans l'essai à 10^{-7} m/s (Figure 4.35). À la vitesse de 10^{-2} m/s, l'historique de force ressemble à une courbe de fluage. La consigne imposée à cette vitesse ressemble en effet plus à un fluage qu'à une consigne en triangle. Les courbes forces / déplacements montrent d'ailleurs des comportements très différents entre les vitesses les plus faibles et la vitesse la plus rapide (Figure 4.36).

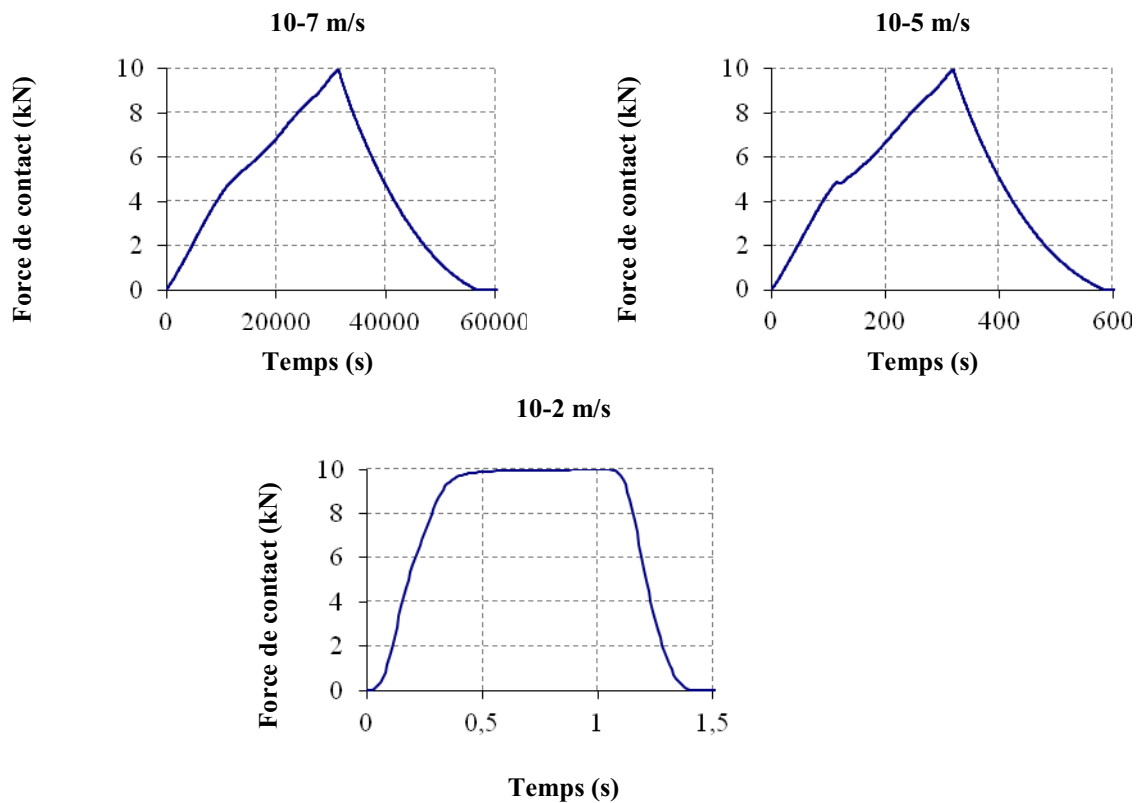


Figure 4.35. Historiques des forces de contact des essais d'indentation à 10 kN, soit une énergie transmise maximale de 17 Joules, sur l'empilement QI encastré, selon la vitesse de déplacement du poinçon

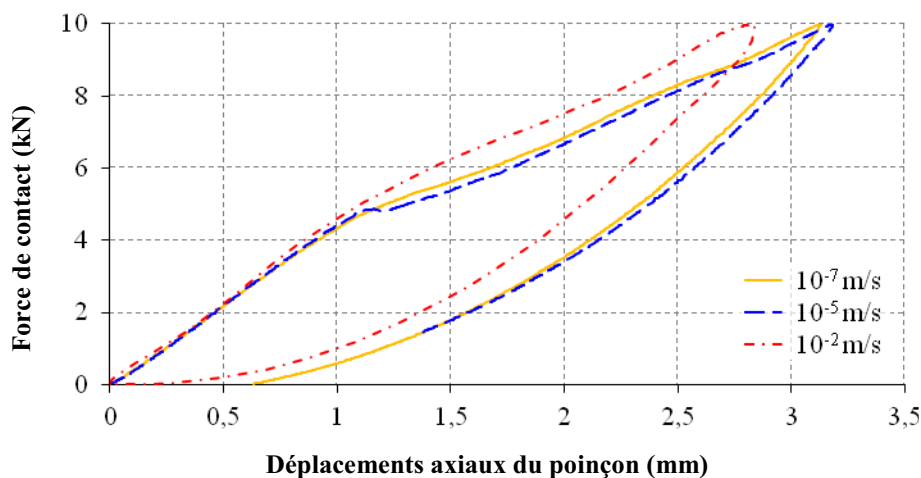


Figure 4.36. Courbes force – déplacements des empilements QI encastrés indentés à 10 kN (17 J), selon la vitesse de déplacement du poinçon

L'énergie absorbée, la profondeur d'empreinte résiduelle, l'aire projetée des dommages et l'énergie acoustique cumulée diminuent lorsque la vitesse de chargement augmente (Figures 4.37 à 4.39). Cela signifierait que plus la vitesse de chargement est lente, plus la plaque a le temps de s'endommager. Les mécanismes visqueux semblent plus actifs également, puisque la profondeur d'empreinte résiduelle est plus grande.

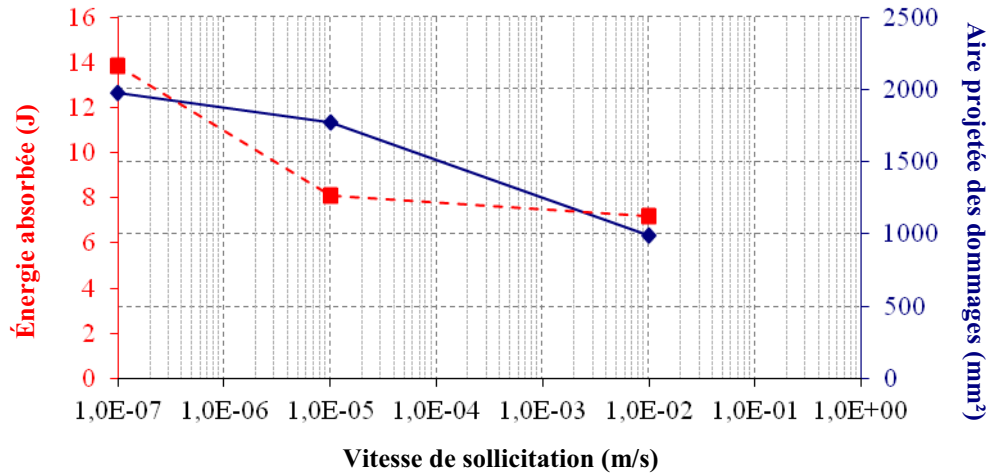


Figure 4.37. Évolutions de l'énergie absorbée et de l'aire projetée des dommages en fonction de la vitesse de sollicitation, dans le cas de l'empilement QI indenté à 10 kN, soit une énergie maximale transmise à la plaque de 17 Joules

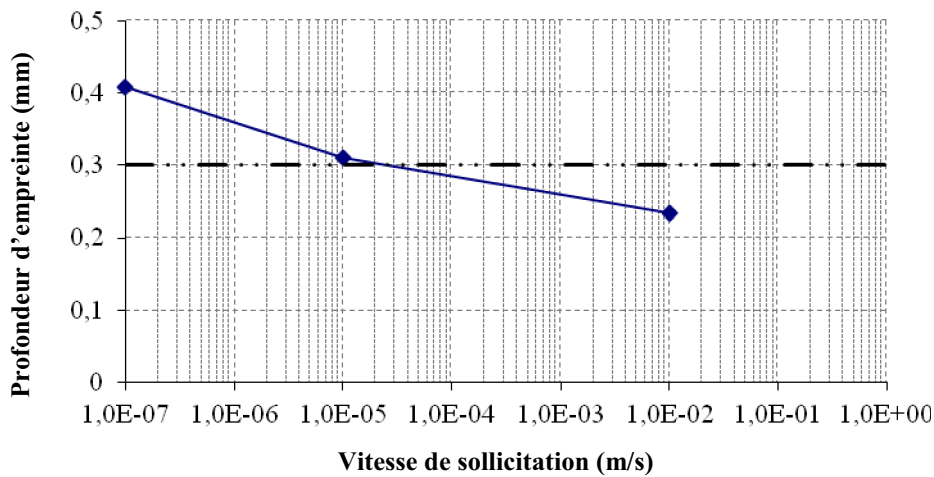


Figure 4.38. Évolution de la profondeur d'empreinte résiduelle en fonction de la vitesse de sollicitation, dans le cas de l'empilement QI indenté à 10 kN, soit une énergie maximale transmise à la plaque de 17 Joules

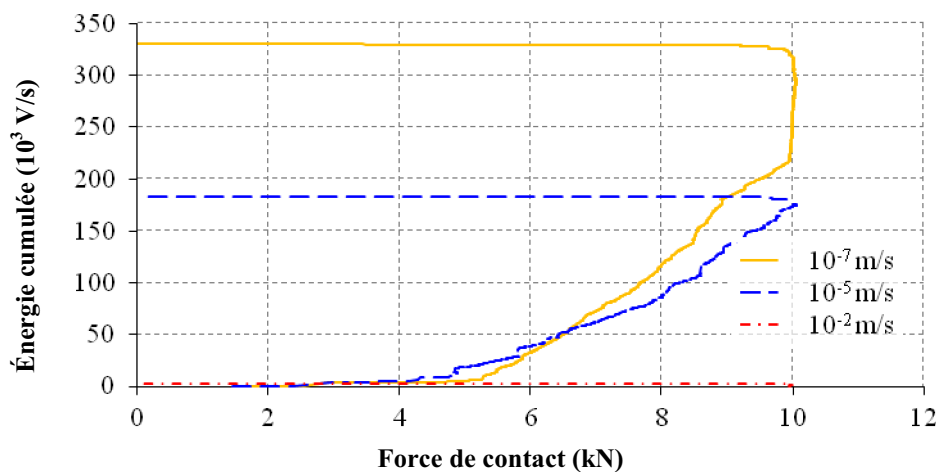


Figure 4.39. Évolutions de l'énergie absorbée, de l'aire projetée des dommages et de la profondeur d'empreinte résiduelle en fonction de la vitesse de sollicitation, dans le cas de l'empilement QI indenté à 10 kN, soit une énergie maximale transmise à la plaque de 17 Joules

4.3.2. Analyse des résultats obtenus en indentation sur le montage d'appui simple linéique

Pour le montage d'appui simple linéique, les forces maximales de contact sont initialement imposées à 5, 8 et 10 kN, comme dans le cas du montage d'encastrement. La valeur de 10 kN est proche des forces maximales mesurées lors des essais d'impact à 28 Joules sur le montage d'appui simple linéique. Cependant, l'éprouvette OR rompt en indentation avant d'atteindre cette charge. Les valeurs des forces maximales consignes en indentation, pour le montage d'appui simple linéique, sont donc revues à 6 kN, 7,5 kN et 9 kN. Le tableau 4.6 récapitule l'ensemble des essais d'indentation réalisés sur ce montage.

Empilement	Énergie (J)	Force maximale (kN)
QI	9	6,0
	14	7,5
	21	9,0
QId	9	6,0
	15	7,5
	21	9,0
OR	10	6,0
	14	7,5
	31	9,0

Tableau 4.6. Récapitulatif des essais d'indentation réalisés sur le montage d'appui simple linéique

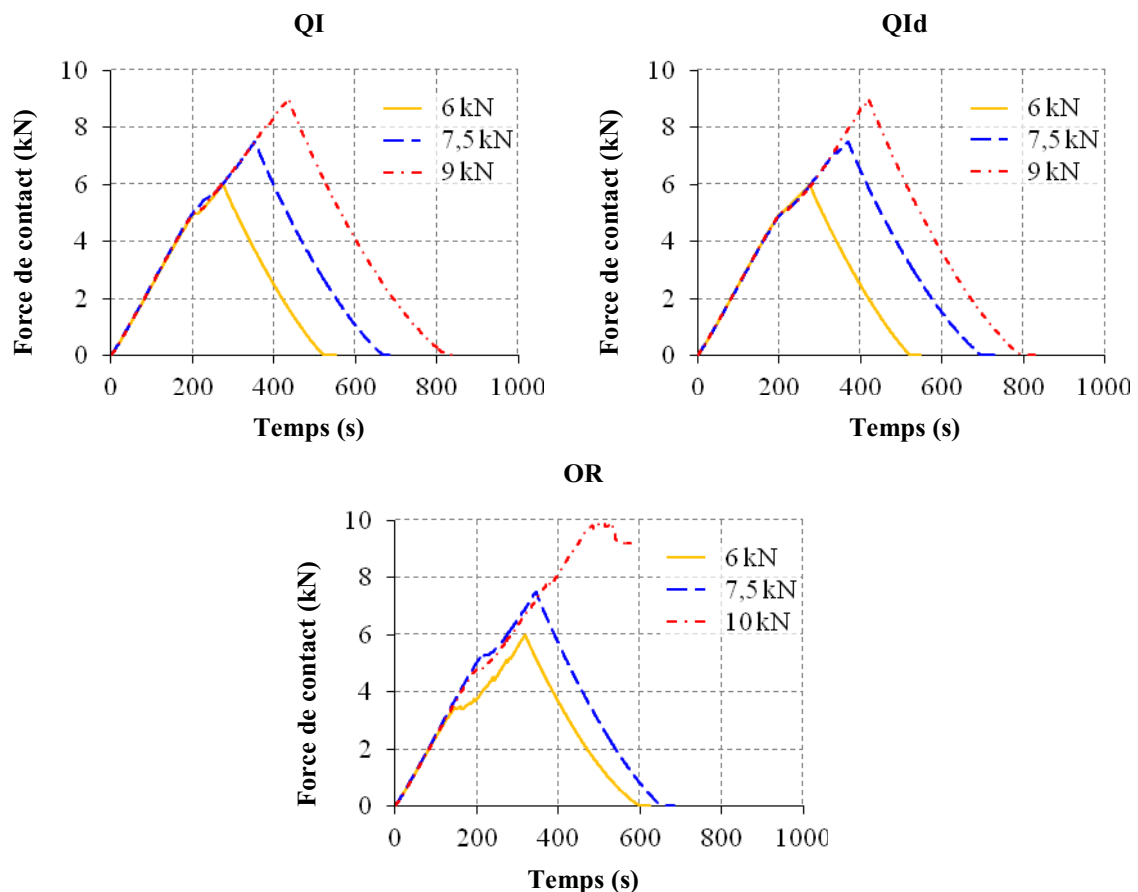


Figure 4.40. Historique des forces de contact dans le cas des essais d'indentation sur le montage d'appui simple linéique

Le déplacement imposé étant triangulaire, la force de contact l'est aussi dans la phase linéaire (Figure 4.40). Les historiques des forces de contact présentent un décrochage autour de 5 kN pour les empilements QI et QId, comme en impact, ainsi que pour l'empilement OR indented à 7,5 kN. L'empilement OR indented à 6 kN présente en revanche un décrochage plus faible, vers 4 kN, contre environ 6 kN en impact.

Comme pour le montage d'encastrement, les déplacements maximaux et l'énergie absorbée augmentent avec la force de contact, donc avec l'énergie maximale transmise à la plaque (Figure 4.41). L'augmentation de l'énergie absorbée semble être linéaire pour l'empilement QI, alors que l'empilement QId semble atteindre un palier.

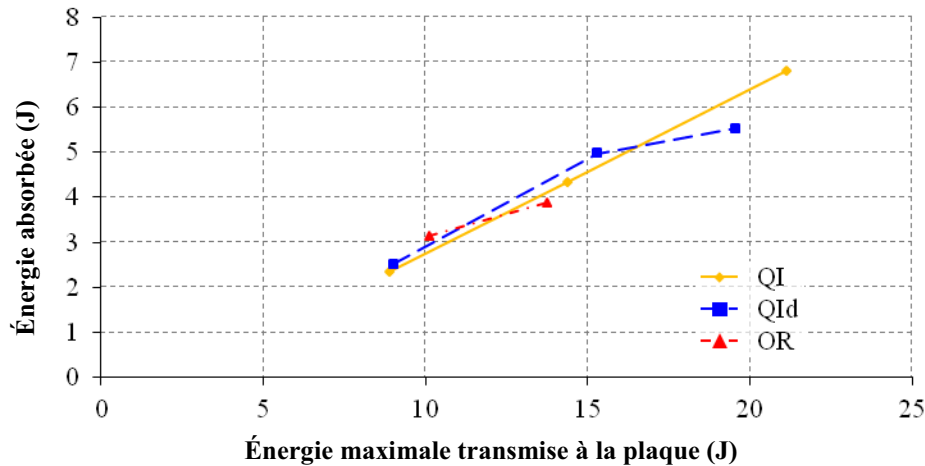


Figure 4.41. Évolution de l'énergie absorbée par la plaque en fonction de l'énergie maximale qui lui a été transmise, dans le cas des essais d'indentation sur le montage d'appui simple linéique

L'émission acoustique montre que l'augmentation de la force maximale de contact n'entraîne pas nécessairement une augmentation de l'énergie cumulée, pour le montage d'appui simple linéique (Figure 4.42). Pour l'empilement QId, l'essai à 7,5 kN crée plus d'endommagement que l'essai à 9 kN. De même, pour l'empilement OR, l'essai à 6 kN crée plus d'endommagement qu'à 7,5 kN.

On observe sur les courbes d'évolution de l'énergie acoustique cumulée en fonction de la force de contact des endommagements tardifs, comme en encastrement. En effet, des événements de forte énergie acoustique ont encore lieu alors que la force de contact a commencé à diminuer. Ensuite, ces endommagements sont remplacés par des événements acoustiques de faible énergie, qui doivent correspondre aux frottements des lèvres des fissures créées, qui sont en train de se refermer.

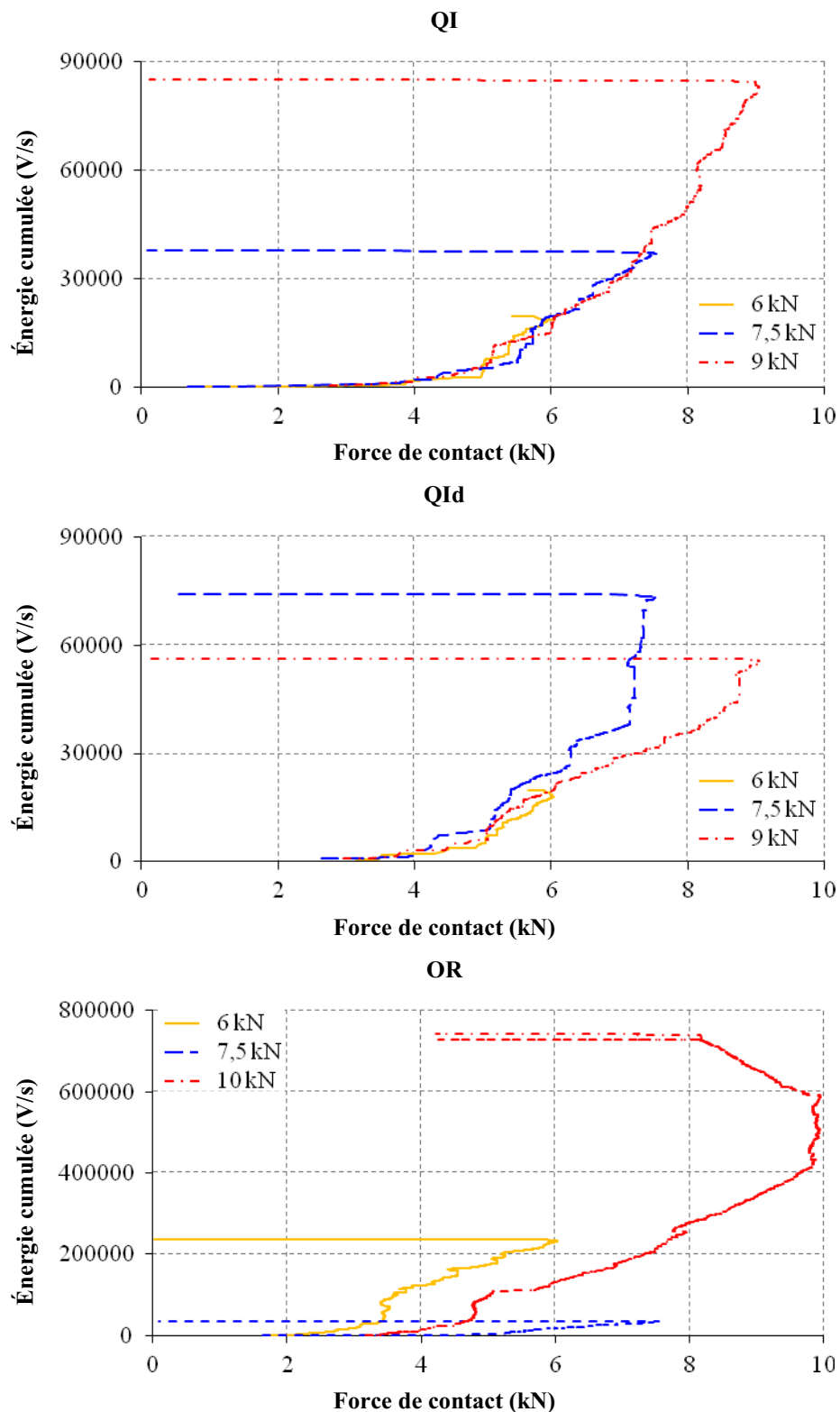


Figure 4.42. Évolution de l'énergie acoustique cumulée en fonction de la force de contact appliquée, dans le cas des essais d'indentation sur le montage d'appui simple linéique

Les profondeurs des empreintes résiduelles augmentent avec la force maximale de contact, donc avec l'énergie maximale transmise à la plaque, à l'exception de l'empilement OR entre 6 et 7,5 kN (Figure 4.43). L'empilement OR a notamment marqué plus que les deux autres empilements, à 6 kN.

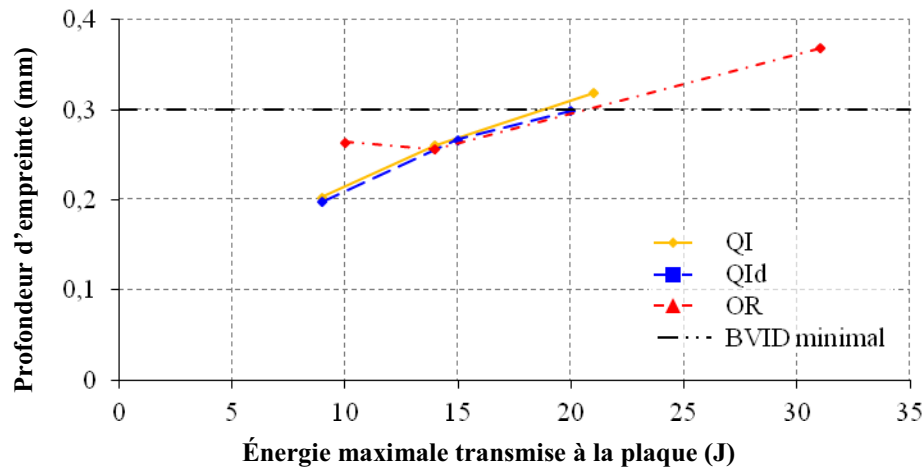


Figure 4.43. Évolution de la profondeur d'empreinte résiduelle en fonction de l'énergie maximale transmise à la plaque, dans le cas des essais d'indentation sur le montage d'appui simple linéique

En regardant les aires projetées des dommages obtenues, on constate que l'empilement OR indenté à 6 kN, soit une énergie maximale transmise à la plaque de 10 Joules, s'est plus endommagé que les deux autres empilements et que l'empilement OR indenté à 7,5 kN, soit une énergie maximale transmise à la plaque de 14 Joules (Figure 4.44). Cela pourrait expliquer la différence de profondeur d'empreinte observée et le fait que l'énergie acoustique cumulée soit plus grande à 6 kN qu'à 7,5 kN, pour cet empilement. Mis à part ce cas particulier, l'aire endommagée semble croître avec la force maximale de contact, donc avec l'énergie maximale transmise à la plaque.

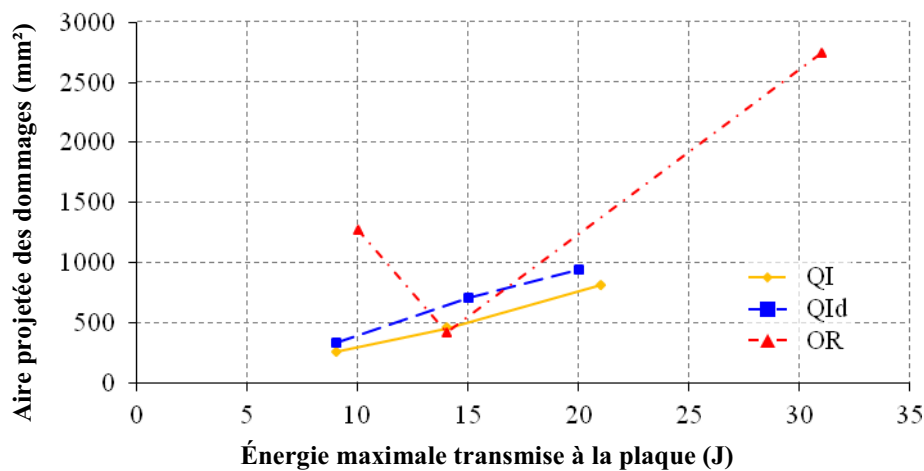


Figure 4.44. Évolution de l'aire projetée des dommages en fonction de l'énergie maximale transmise à la plaque, dans le cas des essais d'indentation sur le montage d'appui simple linéique

4.4. Conclusion

Des essais d'impact et d'indentation ont été réalisés sur les montages développés dans le but d'avoir des conditions aux limites plus simples à modéliser. L'ensemble de ces essais constituent une base de données expérimentales pour le T700/M21, un matériau identifié sur le modèle OPFM, développé à l'Onera pour les composites stratifiés. L'ensemble de ces essais ont permis de faire un certain nombre d'observations, dans des gammes de vitesse assez lentes (du mètre par seconde à 10^{-7} m/s).

On note tout d'abord une réponse à l'impact classique de la part du T700/M21. Lorsque l'énergie d'impact augmente (donc, ici, lorsque la vitesse d'impact augmente), la force de contact et les déplacements augmentent. De même, plus l'énergie d'impact est grande, plus le niveau d'endommagement est important. Les endommagements observés sont constitués de fissurations matricielles et de délaminages.

Les différents empilements testés ont des réponses similaires. Cette similitude est probablement liée aux modules de flexion proches des trois empilements, comme c'était le cas dans l'étude de Lopes *et al.* [Lopes, 2009a]. On note cependant des endommagements plus sévères dans le cas de l'empilement OR que sur les deux autres empilements, sans doute à cause du nombre plus élevé d'interfaces potentiellement plus délaminantes, c'est-à-dire dont les plis adjacents ont des orientations différentes de 90°.

La base de données d'essais réalisés est très riche. Des comparaisons sont effectuées entre les différents types d'essai dans le chapitre suivant, entre impacts incrémentaux et impacts uniques d'une part, entre impact et indentation d'autre part, afin de vérifier la similitude des dommages obtenus, et, enfin, entre la condition d'encastrement et la condition d'appui simple linéique, afin d'établir la sensibilité aux conditions aux limites du T700GC/M21 impacté. Ces tendances permettront d'analyser qualitativement les capacités du modèle numérique d'impact et des modèles matériaux associés à reproduire les dommages d'impact, dans le chapitre 6.

